بررسی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح با اختلاف تراز طبقه

علی خیرالدین
استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
پست الکترونیک:
kheyroddin@semnan.ac.ir

علی کارگران*
دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
پست الکترونیک:
a.kargaran@semnaniau.ac.ir

محمد حاجی
دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
پست الکترونیک:
mohammadhaji70@yahoo.com

در زلزله‌های گذشته وجود پدیده ستون کوتاه یکی از عوامل مؤثر خرابی ساختمان‌های دوبلکسی بوده که در این سازه‌ها کف‌های طبقات با اختلاف ترازی نسبت به هم در دو یا چند تراز ارتفاعی مختلف ایجاد می‌شوند. عمده مشکلات در سازه‌های دوبلکسی، ناشی از عدم پیوستگی دیافراگم کف می‌باشد که باعث تغییرات چشم‌گیری در دوره تناوب، سختی و پخش نیروی زلزله می‌گردد. در این مقاله با بررسی شاخص حساسیت، تغییرمکان، الگوی مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها، طیف ظرفیت و غیره به بررسی رفتار خطی و غیرخطی تخریب پیش‌رونده در دو سازه دوبلکسی چهار و هشت طبقه پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که سازه‌های دوبلکسی کوتاه، سختی و ظرفیت باربری بیشتری داشته و هرچه اختلاف ارتفاع کمتر باشد، شاخص حساسیت بیشتر است.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، سازه با اختلاف تراز طبقه (دوبلکسی)، بتن‌آرمه، الگوی مفصل پلاستیک، شاخص حساسیت(SI).

۱- مقدمه

ساختمان‌ها در طول عمر خود ممکن است در برابر حوادث طبیعی و یا انسان‌ساز قرار گیرند. دانش مهندسی در مورد پدیده‌های طبیعی مانند باد، زلزله و غیره و نحوه تأثیر این پدیده‌ها بر ساختمان‌ها، همچنین واکنش عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای ساختمان‌ها در برابر این پدیده‌ها گسترش یافته است. امروزه با به‌کار بردن آیین‌نامه‌های معتبر در ساختمان‌های متعارف و با بررسی‌های بیشتر، با هزینه معقول می‌توان به طرحی قابل‌اعتماد در برابر این پدیده‌ها دست یافت. یکی از موضوعاتی که اخیراً در مهندسی سازه و در زیرساخت‌های عمرانی توجه زیادی به آن شده است، موضوع خرابی پیش‌رونده می‌باشد. پدیده خرابی پیش‌رونده یک واکنش زنجیره‌ای یا انتشار خرابی است که در آن تحت عللی خاص، صدمه موضعی در ناحیه نسبتاً کوچکی از سازه رخ می‌دهد و در شرایطی، این صدمه موضعی به بخش‌های دیگری از سازه گسترش یافته تا منجر به فروریزش کل سازه یا بخشی از آن گردد [۱] (شکل ۱).

در دیدگاه مهندسی سازه، طراحی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی در برابر پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده به‌عنوان راه‌حلی مناسب و پیشگیرانه در مقابل حوادث طبیعی و یا انسان‌ساز نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین مسئولین در بسیاری از کشورها بر آن شدند تا تحقیقات برای تدوین ضوابط طرح ساختمان‌ها تحت اینگونه حوادث را مورد توجه قرار دهند. چنین مطالعاتی در جنبه‌های مختلف ملاحظات معماری، تمهیدات طراحی شهری و

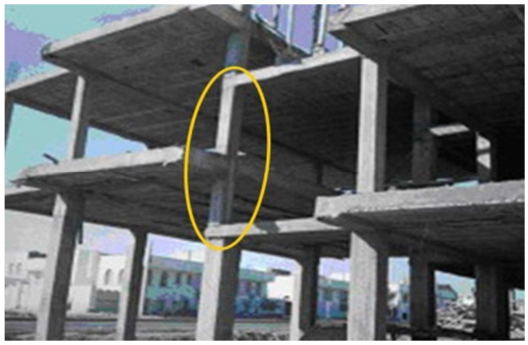
* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۲۷، بازنگری ۱۳۹۵/۱۱/۲۶، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۰۸.

شریان‌های حیاتی مطرح هستند. یکی از این ساختمان‌های خاص را می‌توان ساختمان‌های با اختلاف تراز طبقه (دوبلکسی) دانست.

شکل ۱- ساختمان بتنی رونان پوینت در انگلستان دچار خرابی پیش‌رونده ناشی از انفجار گاز [۲]

در سازه‌های با اختلاف تراز طبقه، کف‌های طبقات با اختلاف ترازی نسبت به هم در دو یا چند تراز ارتفاعی مختلف ایجاد می‌شوند. طول مؤثر ستون‌های واقع در فصل مشترک این سازه‌ها، به اندازه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود که هریک از آن‌ها به‌صورت یک ستون کوتاه عمل می‌کنند (شکل ۲).

در سازه‌ها عمده مشکلات، ناشی از عدم پیوستگی دیافراگم کف است. دیافراگم‌ها نقش مهمی در انتقال نیروهای جانبی بین اعضای مقاوم در برابر زلزله دارند؛ به‌طوری‌که هرگونه نامنظمی یا انقطاع در دیافراگم کف باعث تمرکز تنش در محل اتصال آن‌ها با اجزای قائم می‌گردد. مهم‌ترین نقش آن‌ها انتقال نیروهای اینرسی ناشی از زلزله به ستون‌هاست. با توجه به اختلاف سختی ستون‌ها، قسمت زیادی از این نیروها به ستون‌های کوتاه طبقه می‌رسد که در صورت عدم طراحی مناسب، هنگام زلزله دچار آسیب جدی می‌گردند. نکتهٔ حائز اهمّیت در این سازه‌ها وجود اختلاف ارتفاع بین دو جزء سازه با اختلاف تراز طبقه است که باعث تغییرات چشم‌گیری در پریود، سختی، پخش نیروی زلزله و بارگذاری لرزه‌ای سازه می‌گردد. براساس مطالعات و تحقیقات انجام شده در خصوص نیروهای وارد بر فصل مشترک سازه‌های دوبلکسی، مشخص شده است که نیروی برشی در ستونی (ستون کوتاه) که دو سازه با اختلاف تراز طبقه را به هم متصل می‌کند، نسبت به برش در ستون مشابه در سازه معمولی بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد [۳].



شکل ۲- ستون‌های کوتاه سازه بتن مسلح با اختلاف تراز طبقه [۳]

با توجه به اهمیت موضوع، محققین بسیاری در این زمینه تحقیق نموده‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات خیرالدین و میرنظامی با آنالیز سه ساختمان فلزی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه اشاره کرد. محققان، پارامترهای لرزه‌ای اعم از تغییرات دوره تناوب، تغییرمکان و همچنین تشکیل ستون کوتاه و عوامل تشدیدکننده آن را مورد بررسی قرار داده و روشی برای بارگذاری استاتیکی معادل ساختمان‌های با اختلاف تراز طبقه پیشنهاد داده‌اند [۴]. این محققان در پژوهشی دیگر با بررسی رفتار غیرخطّی بیش از ۳۰ مدل سازه با اختلاف تراز طبقه فلزی با شش جزئیات مختلف و مقایسهٔ آن‌ها در شرایط متفاوت، اختلاف تراز طبقهٔ دوبلکسی، اثرات تقویت بال و جان، ورق پیوستگی و سخت‌کننده، مناسب‌ترین روش و جزئیات اجرائی را برای اتصالات خمش قاب‌های با اختلاف تراز طبقه و دارای پدیدهٔ ستون کوتاه ارائه کردند [۵]. خیرالدین و کارگران عملکرد لرزه‌ای ستون‌های کوتاه و سازه‌های دوبلکسی چهار، هشت و ۱۰ طبقه تحت دو رکورد زلزله طبس و ال‌سنترو را با بررسی نتایج حاصل از حداکثر پاسخ، برش، شاخص خسارت، نسبت سهم ستون

کوتاه در خرابی سازه‌های دوبلکسی و غیره را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۳ و ۶].

در بحث تخریب پیش‌رونده اولین تحقیقات صورت گرفته در سال ۱۹۹۴ توسط سکوگلو[1] و همکاران بوده است. محققان دریافتند که قالب‌های دربرگیرنده ستون حذف‌شده، بیشتر بار ناشی از حذف ستون را جذب می‌کنند. در نتیجه برای محاسبه خیز، نحوه توزیع مفصل‌های خمیری و بررسی نسبت نیاز به ظرفیت (DCR) اعضا در یک سازه سه‌بعدی، کافی است قالب‌های دوبعدی شامل ستون حذف‌شده بررسی شوند [۷]. تی سای و لین[2] با بررسی قاب‌های خمشی بتنی مقاوم در برابر زلزله دریافتند که تحلیل غیرخطی استاتیکی، ظرفیت سازه را بیشتر از تحلیل دینامیکی غیرخطی محاسبه می‌کند. همچنین ضریب بار دینامیکی با افزایش تغییرمکان نقطه متصل به ستون حذف‌شده، کاهش می‌یابد [۸]. همچنین موهامد[3] با تحلیل قاب سه‌بعدی بتنی، به بررسی تنش‌های برشی ناشی از پیچش در تیرهای متصل به ستون کناری حذف‌شده پرداخت [۹]. این تنش‌ها باعث شکست ترد تیر می‌شوند. نقص مدل دوبعدی این است که این تنش‌ها در مدل‌های دوبعدی وارد محاسبات نمی‌شود. خیرالدین و همکاران روشی ساده و جدید برای محاسبه ضریب افزایش نیروی دینامیکی با توجه به حذف ناگهانی ستون ابداع کردند. در این پژوهش، با بارگذاری سه‌نقطه‌ای بر روی یک تیر T شکل و حذف ناگهانی ستون میانی، نموداری برای تعیین این ضریب پیشنهاد شد [۱۰]. در تحقیقی دیگر خیرالدین و مهرابی با آنالیز استاتیکی خطی دریافتند که با افزایش ابعاد چشمه‌های طبقه، خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ناگهانی ستون گوشه محدود می‌شود. این تحقیق به بررسی و کاربرد محافظت از پانل‌های کف در برابر شکست تدریجی ناشی از حذف ناگهانی ستون گوشه، زمانی‌که ابعاد پانل‌های کف از محدودیت‌های خرابی تجاوز می‌کند، پرداخته است. مطالعه موردی بر روی دو سازه فولادی طراحی‌شده ۱۲ و ۲۰ طبقه و با روش مسیر جایگزین صورت گرفت. آن‌ها نشان دادند در سازه‌ای که برای زلزله طراحی می‌گردد، باید خرابی پیش‌رونده نیز کنترل گردد. همچنین مهار مناسب گوشه سازه منجر به کاهش این پدیده می‌شود [۱۱]. مشهدی‌علی و خیرالدین به بررسی ظرفیت مقاومت سازه‌هایی با سیستم‌های لوله‌ای دیاگراید و هگزاگراید در اثر خرابی پیش‌رونده پرداختند. در این مطالعه از تحلیل بار افزون قائم و تاریخچه زمانی به ترتیب جهت ارزیابی رفتار غیرخطی استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها استفاده شد. محققان پس از حذف اعضای گوشه‌ی دو سازه ۲۸ و ۴۸ طبقه دریافتند که سیستم سازه‌ای دیاگراید از سیستم سازه‌ای هگزاگراید در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب‌پذیرتر می‌باشد. نتایج نشان داد که پس از حذف اعضا، شکل خاص سیستم هگزاگراید موجب باز توزیع بهتر نیروها می‌شود. نمودارهای تحلیل بار افزون نشان داد که سیستم هگزاگراید، شکل‌پذیر و سیستم دیاگراید ترد و شکننده می‌باشد [۱۲ و ۱۳]. چوی[4] و همکاران به تعریف شاخص حساسیت (SI[5]) و بررسی عضو کلیدی یک سازه به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی پرداختند. عضو کلیدی عضوی است که در صورت حذف آن، ساختمان موردنظر حساسیت زیادی را نسبت به آن نشان دهد و در واقع با حذف این عضو احتمال وقوع پدیده خرابی پیش‌رونده بسیار زیاد گردد [۱۴].

۲- مفهوم خرابی پیش‌رونده و عوامل ایجاد آن

گسترش یک خرابی موضعی از عضوی به عضو دیگر و منجر شدن به خرابی کل سازه و یا خرابی نامتناسب بخش اعظمی از سازه را خرابی پیش‌رونده می‌گویند

[1]- Sucuoglu
[2]- Tsai and Lin
[3]- Mohamed
[4]- Choi
[5]- Sensitivity Index

[۱۵]. هرگاه یک یا چند عضو سازه‌ای ناگهان گسیخته شوند و پس از آن ساختمان یا بخشی از آن به‌صورت پیش‌رونده خراب شود، در این حالت هر توزیع بار، موجب شکست دیگر المان‌های سازه‌ای یکی پس از دیگری می‌شود. به‌عبارت دیگر، بعضی مواقع خرابی محل عضو، به‌صورت موضعی باقی نمانده و در کل سازه به‌صورت پیش‌رونده منتشر می‌شود. ویژگی اصلی این پدیده این است که خرابی نهایی تناسبی با خرابی اولیه ندارد و به همین دلیل به آن خرابی غیرمتجانس نیز می‌گویند [۱].

خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها بیشتر به دو علت زیر اتفاق می‌افتد:

الف) خطاهای طراحی و اجرایی

ب) بارهای غیرعادی.

به‌طورکلی بارهای غیرعادی را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- تغییرات شدید در فشار هوا، نظیر: انفجار بمب، انفجار گاز، انفجار مواد سوختی، انفجار خارج ساختمان.

۲- برخوردهای تصادفی نظیر: برخورد وسایل نقلیه موتوری با ساختمان، برخورد هواپیما با ساختمان.

۳- بارهای غیرعادی ناشی از نشست‌های پیش‌بینی نشده.

۴- فشارهای غیرعادی ناشی از ایجاد گودال در زمین مجاور.

سازه‌ها بایستی طوری طراحی شوند که وقتی صدمه محلی اتفاق افتاد، بدون توجه به علت خرابی، احتمال قابل قبولی وجود داشته باشد که صدمه مذکور به سایر بخش‌های سازه گسترش پیدا نکرده و باعث خرابی کلی نگردد [۱۶].

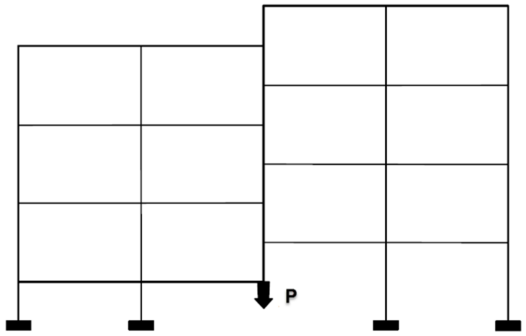
۳- بررسی خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ستون در سازه

انفجار ناگهانی قادر است طی چند هزارم ثانیه به خرابی و نابودی کامل یک عضو باربر اصلی (ستون) ساختمان منجر شود. پس از این حذف ناگهانی ستون، سازه‌هایی که قبلاً بار ثقلی را تحمل می‌کردند، دچار ارتعاشات دینامیکی شده و غالباً در زمان بسیار کوتاهی می‌توانند به پاسخ حداکثر جابه‌جایی برسند. لذا این اثرات در زمره بارگذاری ضربه‌ای دسته‌بندی می‌شوند. تحلیل انهدام پیش‌رونده، برای پیش‌بینی و بررسی عملکرد ساختمان بعد از حذف ناگهانی یک یا چند ستون انجام می‌گیرد [۱۷-۲۰].

ساختمان باید تحمل بارها در جهت ثقلی را داشته باشد و پایداری جانبی آن نیز از بین نرود. در ارزیابی سازه، یک راه‌حل متعارف، درنظرگرفتن از بین رفتن آنی یک ستون و باقی ماندن بقیه سازه به‌عنوان یک سناریوی خرابی و تحلیل سازه بعد از بارگذاری در سازه آسیب‌دیده‌ای است که فقط در معرض بار ثقلی قرار دارد. پس از حذف عضو منفجرشده و شروع ارتعاش آزاد، بسته به ویژگی‌های سازه ممکن است خرابی در یک ناحیه از آن مهار گردد یا طی باز توزیع نیروها و مفاصل خمیری به‌صورت پیش‌رونده به نقاط دیگر سرایت و حتی نهایتاً به انهدام کلی سازه منجر شود. مطالعات رفتار غیرخطی تحت مدل‌سازی و آزمایش‌های انفجاری نشان داده که در صورت تأمین ظرفیت کافی، اتصال با پدیده‌ای به نام اثر زنجیری به کمک کشش تیرها و با افزایش سختی معادل قاب، بارگذاری را تحمل می‌کند [۱۷ و ۱۹].

در این شیوه تحلیل و طراحی، در واقع نوسان آزاد سازه تحت شرایط جابه‌جایی اولیه نسبت به حالت سکون استاتیکی در محل درجه آزادی قائم انتهای فوقانی ستون حذف‌شده، بررسی می‌شود (شکل ۳). لذا در عوض ویژگی‌های بار انفجاری، نحوه توزیع مقاومت و سختی و ظرفیت اتصالات سازه در برآورد پاسخ ارتعاشی سازه مؤثر خواهد بود و شیوه اخیر در زمره روش‌های طراحی ظرفیتی به شمار می‌آید. با توجه به سهولت روند طراحی بدون نیاز صریح به مشخصات انواع مختلف خرج‌های انفجاری اتفاقی یا تعمدی، روش اخیر امروزه در بسیاری از

تحقیقات و آیین‌نامه‌ها در زمینه پدافند غیرعامل پذیرفته شده و به‌کار گرفته می‌شود [۲۰-۲۳].

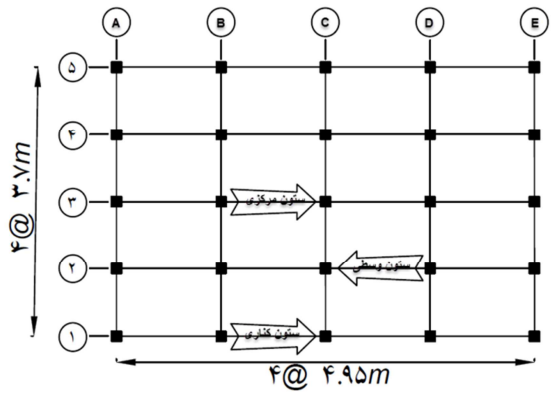


شکل ۳- حذف ستون در سازه با اختلاف تراز طبقه

۴- معرفی مسئله و روش تحقیق

در این تحقیق عملکرد و رفتار لرزه‌ای دو سازه معمولی و دو سازه دوبلکسی چهار و هشت طبقه که دارای اختلاف تراز ارتفاعی ۱/۶ متر می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پلان هر چهار سازه به‌صورت کاملاً یکسان فرض گردیده و مدل‌های دوبلکسی از لحاظ ارتفاع، متغیر و شامل سازه‌های چهار طبقه و هشت طبقه می‌باشند. پلان سازه‌ها به ابعاد ۱۴/۸×۱۹/۸ مترمربع بوده که دارای پنج دهانه ۴/۹۵ متری در جهت x و چهار دهانه ۳/۱ متری و یک دهانه ۲/۴ متری در جهت y است (شکل ۴). به‌دلیل کاربردی بودن طرح، ابعاد و دهانه‌ها واقعی و سازه متقارن در نظر گرفته شده است. سیستم باربر جانبی (سیستم لرزه‌بر) در تمامی سازه‌ها بر طبق آیین‌نامه زلزله ایران استاندارد ۲۸۰۰ [۲۴] بوده و از لحاظ شکل‌پذیری از نوع قاب خمشی بتنی متوسط و برای بارگذاری ثقلی مبحث ششم مقررات ملی [۲۵] استفاده شده است. از آنجاکه سازه با اختلاف تراز طبقه در ارتفاع نامنظم محسوب می‌شود، بارگذاری لرزه‌ای از دو روش استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی انجام شده است. کاربری ساختمان‌ها مسکونی بوده و نوع سقف‌ها از جنس تیرچه‌بلوک می‌باشد. بار مرده طبقات به‌همراه بار گسترده تیغه‌بندی برابر $380\ kg/m^2$، بار مرده بام $360\ kg/m^2$ و بار زنده طبقات و بام به ترتیب $200\ kg/m^2$ و $150\ kg/m^2$ می‌باشد. محل احداث سازه‌ها در شهر سمنان (با خطر نسبی زیاد و A=۰/۳)، ضریب اهمیت ساختمان ۱ (مسکونی و I =۱) و نوع زمین تیپ ۲ فرض شده است. ضریب زلزله برای سازه‌های چهار، هشت و ۱۰ طبقه به ترتیب ۰/۱۰۷، ۰/۰۸ و ۰/۰۷۱ می‌باشد [۳].

ابعاد ستون‌ها و تیرها در سازه چهار طبقه به ترتیب در طبقه اول، دوم و دو طبقه آخر ۴۵×۴۵، ۴۰×۴۰ و ۳۵×۳۵ سانتیمتر و ابعاد تیرها ۳۰×۴۰ و ۳۰×۳۵ سانتیمتر در هر دو طبقه تیپ‌بندی شده‌اند. در سازه هشت طبقه ستون‌ها در دو طبقه اول ۵۰×۵۰ سانتیمتر، در طبقه دوم، ۴۵×۴۵ سانتیمتر، در طبقه سوم ۴۰×۴۰ سانتیمتر و دو طبقه آخر ۳۵×۳۵ سانتیمتر و برای تیرها به ترتیب ۵۰×۴۵، ۴۵×۴۵، ۴۰×۳۵ و ۳۵×۳۰ سانتیمتر تیپ‌بندی انجام شده است [۳].



شکل ۴- پلان سازه‌ها و موقعیت ستون‌ها

۴-۱- کاربرد تحلیل بار افزون قائم

روش تحلیل غیرخطی استاتیکی یا پوش‌آور به‌طور عمده در رشته مهندسی زلزله استفاده می‌شود. در این تحلیل، بار ثقلی از ابتدا به‌طور کامل و بار جانبی به‌صورت گام‌به‌گام به سازه اعمال می‌گردد و ارزیابی رفتار سازه با منحنی ظرفیت صورت می‌گیرد که این منحنی رابطه بین نیروی برش پایه و تغییرمکان بام را نمایش می‌دهد [۲۶]. از مفهوم تحلیل پوش‌آور می‌توان برای ارزیابی سازه‌ها در خرابی پیش‌رونده بهره برد که به آن تحلیل بار افزون قائم گفته می‌شود. مزیت این روش توانایی آن برای محاسبه

اثرات غیرسطحی بدون نیاز به مدل‌سازی پیچیده مصالح می‌باشد. این روش برای تخمین حدود شکست و حدود الاستیک سازه مفید می‌باشد.

۴-۲- روش تحلیل بار افزون قائم

از آنجاکه تحلیل پوش- داون از نوع کنترل‌شونده توسط تغییرشکل است، لذا با افزایش تدریجی تغییرمکان تا یک سطح اختیاری در نقطه ستون حذف‌شده همراه است [۲۷]. همان‌طور که توسط مارجانا شویلی و اگنیو[۶] گفته شد، احتمال وقوع عدم همگرایی در تحلیل کنترل‌شونده توسط تغییرشکل خیلی کمتر می‌باشد. درصورتی‌که، تحلیل کنترل‌شونده توسط نیرو به تعداد گام‌های بار و آزمون خطای زیادی برای همگرایی بستگی دارد [۲۸]. در هر گام از تحلیل، بار معادل مربوط به سطح جابه‌جایی تعین می‌گردد و چون افزایش نامنظمی در ارتفاع، باعث تغییر مقدار بار وارد به سازه می‌گردد، ارزیابی مقادیر بار معادل توسط ضریب بی‌بعدی به‌نام ضریب بار انجام می‌شود. یکی از راه‌های ارزیابی رفتار قاب‌ها در این روش، رسم نمودار بار- تغییرمکان است. ضریب بار نسبت مقدار بار معادل در هر تغییرمکان به کل بار می‌باشد [۲۷]. تعداد مراحل کنترل تغییرمکان عمودی و بار تعیین شده باید به برنامه داده شود. در پایان، این اطلاعات در قالب نتایج تحلیل در اختیار کاربر گذاشته می‌شود که می‌توان با این اطلاعات نمودارهای مورد نیاز را رسم کرد.

۴-۳- بارگذاری در تحلیل بار افزون قائم

تحلیل سازه را می‌توان براساس دو نوع بارگذاری انجام داد. هرکدام از این دو نوع بارگذاری، به نحوه بررسی رفتار المان‌ها بستگی دارد. رفتارها براساس کنترل مقدار تغییرشکل یا کنترل مقدار نیرو بررسی می‌شوند [۲۹]. در این پژوهش، تلاش‌ها و نیروها از نوع کنترل‌شونده با تغییرشکل به‌کار برده می‌شوند. بارهای گرانشی و بارهای جانبی، براساس روابط گفته‌شده در آیین‌نامه موردنظر، به سازه وارد می‌شوند. اثر P-Δ نیز در تحلیل در نظر گرفته می‌شود.

در بارگذاری برای به‌دست آوردن تلاش‌های روش کنترل تغییرشکل، دهانه‌ها به دو دسته دهانه‌های بالای ستون حذف‌شده و سایر دهانه‌ها تقسیم می‌شوند. ضرایب بارگذاری روی این دو دهانه باهم یکسان نمی‌باشد. در دهانه‌های دسته اول، بارهای گرانشی براساس رابطه زیر وارد می‌شوند:

$$G_N = \Omega_N \left[(0.9 \; or \; 1.2) D + (0.5l \; or \; 0.2S) \right] \quad (۱)$$

در این رابطه، G_N بار گرانشی افزایش‌یافته وارد بر سازه، D بار مرده، L بار زنده و S بار برف هستند که بر کف طبقات اعمال می‌شوند. از آنجاکه پدیده خرابی پیش‌رونده و حذف ستون، ماهیتی دینامیکی دارند؛ آیین‌نامه‌ها برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی ضریب بزرگ‌نمایی یا ضریب افزایش دینامیکی را در بارگذاری خرابی پیش‌رونده پیشنهاد داده‌اند. ضریب بزرگ‌نمایی در آیین‌نامه GSA[۷] [۲۸] برابر ۲ و در آیین‌نامه DOD۲۰۰۹[۸] برابر Ω_N می‌باشد. این ضریب فقط در دهانه‌های فوقانی ستون حذف‌شده اعمال می‌گردد؛ و بار به سایر دهانه‌ها بدون ضریب بزرگ‌نمایی وارد می‌شود. Ω_N ضریب افزایش دینامیکی برای محاسبه تلاش‌های کنترل‌شونده توسط تغییرشکل و نیرو مطابق فرمول (۲) می‌باشد:

$$\Omega_N = 1.08 + \frac{0.76}{(\frac{\theta_{pra}}{\theta_y}) + 0.83} \quad (۲)$$

θ_{pra} دوران پلاستیک اعضا یا اتصالات و نیز دوران تسلیم می‌باشد. این ضریب با توجه به ابعاد مقاطع اعضای اصلی و براساس آیین‌نامه ASCE41[۹] و DOD محاسبه

[6]- Marjanishvili and Agnew

[7]- General Services Administration
[8]- Department of Defense
[9]- American Society of Civil Engineers

می‌شود. برای محاسبه ضریب افزایش دینامیکی جهت تحلیل کل سازه از کمترین نسبت دوران پلاستیک به دوران تسلیم در اعضای اصلی که به نحوی در ناحیه بار ثقلی افزایشی قرار دادند، باید استفاده کرد. در این مطالعه ضریب افزایش دینامیکی با روش آزمون خطا برابر ۱/۴ محاسبه شده است.

برای کل قاب، بارگذاری جانبی براساس رابطه زیر خواهد بود:

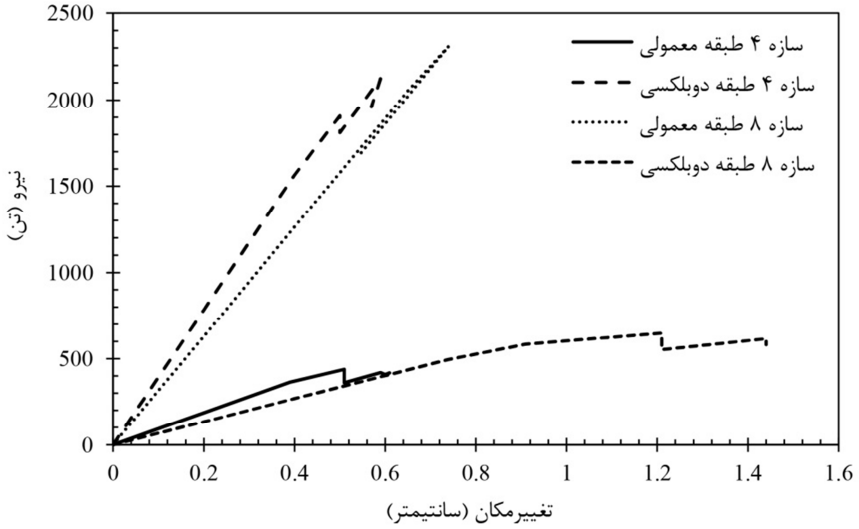
$$L_{LAT} = 0.002 \sum p \qquad (۳)$$

در این رابطه بار به‌صورت جانبی بر سازه اعمال می‌گردد.

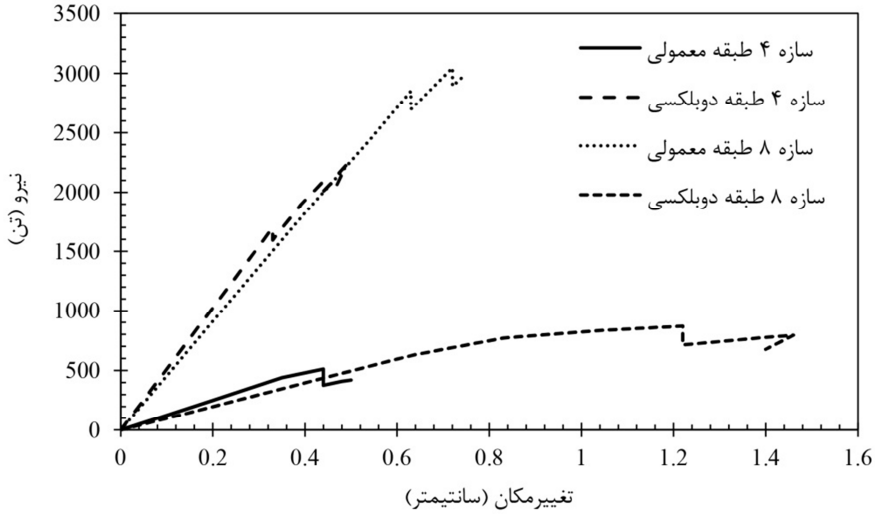
این بار جانبی برابر ۰/۰۰۲ بارهای گرانشی وارد به هر طبقه می‌باشد که دلیل اعمال آن در آیین‌نامه مذکور، ملاحظات خطای ساخت بیان شده است [۳۰].

۵- بررسی تغییرمکان سازه‌ها تحت اثر استاتیکی غیرخطی بار افزون قائم

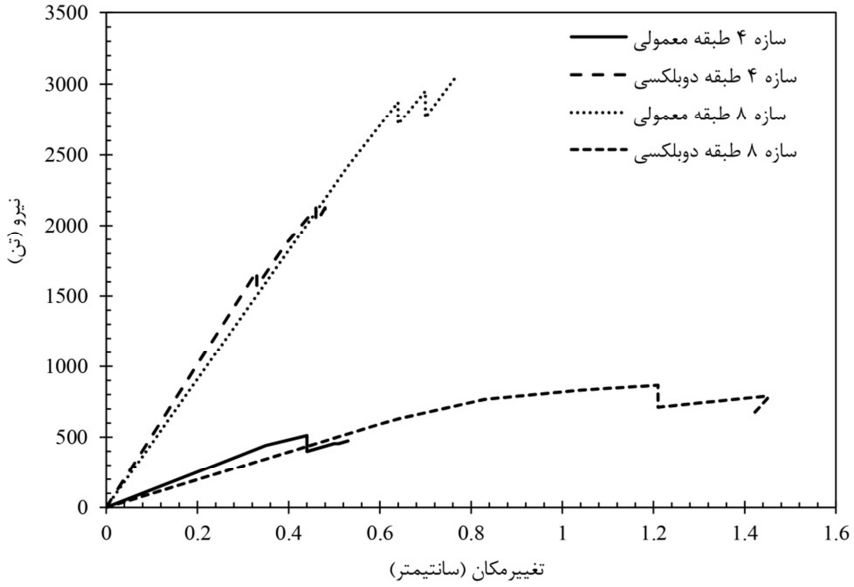
نتایج حاصل از منحنی شکل‌های ۵ الی ۷ از حذف ستون در قاب‌های کنار (خارجی)، وسط و مرکزی (شکل ۳) سازه‌های چهار و هشت طبقه معمولی و دوبلکسی نشان می‌دهد که، در کلیه مدل‌های سازه‌ای دوبلکسی، تغییرمکان و ظرفیت باربری نسبت به مدل‌های سازه‌ای معمولی بیشتر است. این مسئله حاکی از سختی بیشتر سازه‌های دوبلکسی می‌باشد. به‌طوری‌که این میزان در مدل‌های با حذف ستون وسط و مرکز دارای بیشترین و در مدل‌های با حذف ستون کنار دارای کمترین مقدار می‌باشند. به‌عبارت‌دیگر، ظرفیت باربری در سازه‌های چهار طبقه با حذف ستون کنار، وسط و مرکز در مدل دوبلکسی به ترتیب به میزان ۶۹، ۶۹ و ۴۷ درصد بیشتر از مدل معمولی و ظرفیت باربری در سازه‌های هشت طبقه با حذف ستون کنار، وسط و مرکز در مدل دوبلکسی به ترتیب به میزان ۴۴، ۳۶ و ۸ درصد بیشتر از مدل معمولی است. همچنین مطابق منحنی‌های شکل‌های نشان داده شده، با افزایش ارتفاع سازه از چهار طبقه به هشت طبقه، درصد افزایش ظرفیت باربری مدل‌های دوبلکسی نسبت به معمولی کاهش‌یافته که دلیل آن را می‌توان تأثیر دوبلکسی بودن سازه‌ها در سازه‌های کوتاه نسبت به سازه‌های بلند دانست.



شکل ۵- منحنی بار– تغییرمکان سازه‌ها با حذف ستون کنار



شکل ۶- منحنی بار– تغییرمکان سازه‌ها با حذف ستون وسط



شکل ۷- منحنی بار– تغییرمکان سازه‌ها با حذف ستون مرکز

۶- آنالیز حساسیت و خرابی کل سازه‌ها

شاخص حساسیت (شاخص حساسیت ظرفیت باربری قائم) ناشی از حذف عضو برای قاب‌های سازه‌ای براساس رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۴]:

$$SI = (\lambda_0 - \lambda_{damage}) / \lambda_0 \qquad (۴)$$

در این رابطه λ_0، حداکثر ظرفیت باربری سازه قبل از حذف عضو و λ_{damage}، حداکثر ظرفیت باربری سازه بعد از حذف عضو می‌باشد.

طبق فرمول فوق وقتی با حذف یک عضو، ظرفیت باربری ساختمان به‌اندازه ناچیزی تغییر کند، حساسیت سازه به آن عضو قابل صرف‌نظر کردن است (SI=0) و حذف آن عضو اهمیت کمتری در حفظ ظرفیت باربری سازه دارد. از سوی دیگر، حذف عضوی با SI=1 باعث تخریب ناگهانی کل سازه یا بخشی از سازه می‌شود. چنین عضوی به‌عنوان عضو کلیدی یا یک نقطه آسیب‌پذیر قاب مورد توجه قرار می‌گیرد [۱۴].

مطابق جدول ۱، در کلیه سازه‌ها، ستون‌ها و قاب‌های کناری دارای بیشترین شاخص حساسیت بوده و

قاب‌های مرکزی و میانی تقریباً رفتاری مشابه هم داشته‌اند و این شاخص در آن‌ها تقریباً یکسان است. میزان افزایش این شاخص در مدل‌های دوبلکسی نسبت به مدل‌های معمولی مشهودتر بوده؛ به‌طوری‌که در ستون کناری در سازه‌های دوبلکسی چهار و هشت طبقه به ترتیب ۱۲/۲ و ۱۱ درصد بیشتر نسبت به ستون‌های میانی و وسطی می باشد. از این‌رو، مشخص می‌گردد که ستون‌های کوتاه در قاب‌های کناری در سازه‌های دوبلکسی دارای حساسیت بیشتری در برابر تخریب پیش‌رونده ناشی از حذف ستون نسبت به سایر ستون‌ها می‌باشند. همچنین با دوبلکسی شدن سازه، میزان خرابی کل و شاخص حساسیت در ستون‌های کناری در سازه چهار طبقه به میزان حدود ۲۳ درصد و در سازه هشت طبقه به میزان حدود ۹ درصد و در ستون‌های وسط و مرکزی در سازه چهار طبقه و هشت طبقه به ترتیب ۳۸ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد که این نشانگر کاهش شاخص حساسیت سازه در رفتار دوبلکسی نسبت به رفتار معمولی است (با دوبلکسی شدن سازه، شاخص حساسیت و خرابی آن کاهش می‌یابد). از طرفی این موضوع در سازه چهار طبقه نسبت به سازه هشت طبقه مشهودتر است؛ یعنی هرچه ارتفاع سازه افزایش یابد، رفتار سازه معمولی و دوبلکسی در بحث تخریب پیش‌رونده به هم نزدیک‌تر می‌گردد.

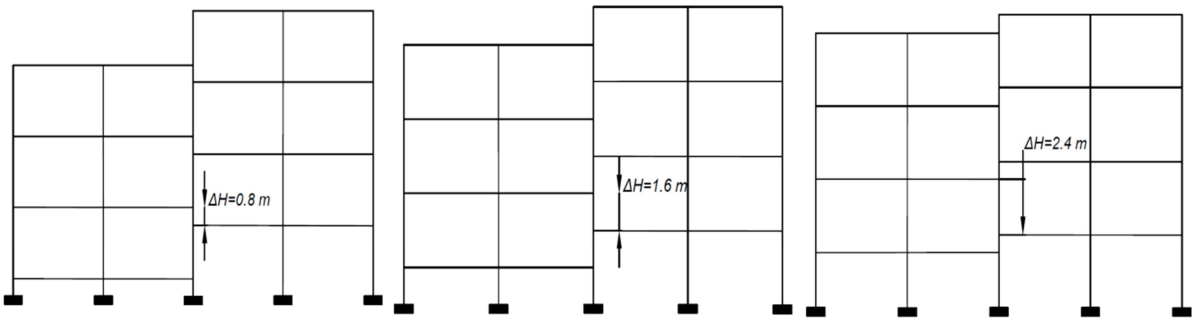
جدول ۱- شاخص حساسیت سازه‌ها

سازه	ستون	$\lambda_p(ton)$	$\lambda_{damage}(ton)$	شاخص حساسیت (SI)	خرابی کل (٪)
۴ طبقه معمولی	کنار	۵۲۰۱	۴۳۹/۳۹	۰/۹۱۵۵	۹۱/۵۵
	وسط	۵۲۰۱	۵۱۲/۲	۰/۹۰۱۵	۹۰/۱۵
	مرکز	۵۲۰۱	۵۱۲/۷	۰/۹۰۱۴۵	۹۰/۱۴۵
۴ طبقه دوبلکسی	کنار	۲۵۱۱	۶۴۷/۹۴	۰/۷۴۲	۷۴/۲
	وسط	۲۵۱۱	۸۶۸/۹	۰/۶۵۴	۶۵/۴
	مرکز	۲۵۱۱	۸۶۶/۳	۰/۶۵۵	۶۵/۵
۸ طبقه معمولی	کنار	۱۳۲۵۴	۲۱۲۲/۵	۰/۸۳۴	۸۳/۴
	وسط	۱۳۲۵۴	۲۲۳۱/۵	۰/۸۳۱	۸۳/۱
	مرکز	۱۳۲۵۴	۲۱۲۶/۸	۰/۸۳۲	۸۳/۲
۸ طبقه دوبلکسی	کنار	۹۸۸۷	۲۳۰۸/۸	۰/۷۶۶	۷۶/۶
	وسط	۹۸۸۷	۳۰۴۷/۲	۰/۶۹۱	۶۹/۱
	مرکز	۹۸۸۷	۳۰۶۴/۹	۰/۶۸۹	۶۸/۹

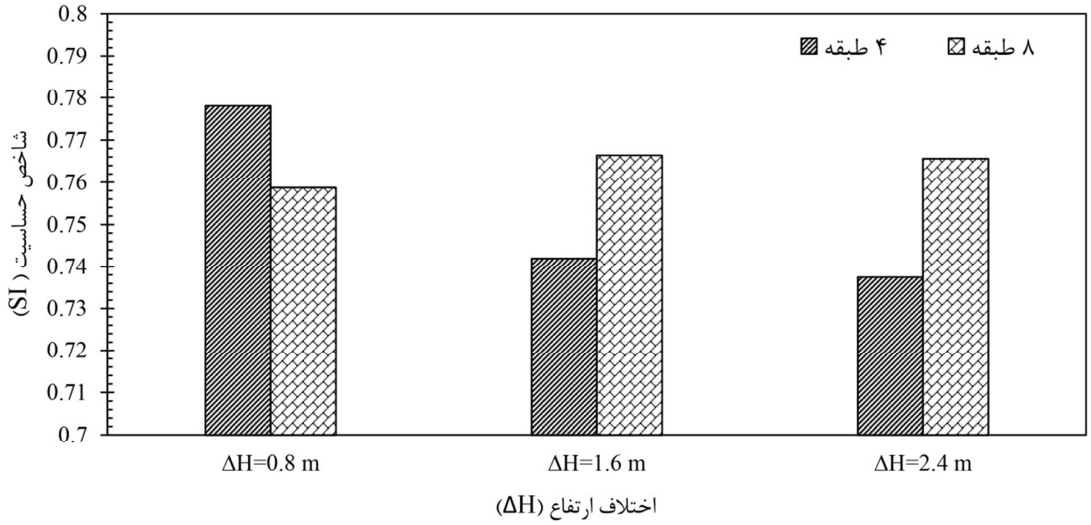
۷- بررسی شاخص حساسیت در اثر اختلاف ارتفاع در سازه‌های دوبلکسی

جهت ارزیابی دقیق‌تر تأثیر سازه‌های دوبلکسی بر شاخص حساسیت در خرابی پیش‌رونده، دو سازه دوبلکسی چهار و هشت طبقه با سه اختلاف تراز ارتفاعی (HΔ) ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴ متر طراحی شده‌اند (شکل ۸). نتایج حاصل از نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهد که در سازه دوبلکسی چهار طبقه، شاخص حساسیت در سازه با اختلاف ارتفاع ۰/۸ متر حدود ۴/۸ و ۵/۵ درصد نسبت به سازه‌های با اختلاف ارتفاع ۱/۶ و ۲/۴ متر بیشتر است، ولی در سازه دوبلکسی هشت طبقه، اختلاف ارتفاع تأثیر چندانی نداشته به‌طوری‌که این شاخص در سازه با اختلاف ارتفاع ۰/۸ متر حدود یک درصد نسبت به سازه‌های با اختلاف ارتفاع ۱/۶ و ۲/۴ متر کمتر است. تأثیر اختلاف ارتفاع در شاخص حساسیت در سازه‌های دوبلکسی چهار طبقه بیشتر و در سازه دوبلکسی هشت طبقه تأثیر

چندانی ندارد. در سازه دوبلکسی چهار طبقه هرچه اختلاف ارتفاع کمتر باشد، شاخص حساسیت بیشتر است.



شکل ۸- اختلاف ارتفاع در سازه چهار طبقه دوبلکسی



شکل ۹- شاخص حساسیت براساس اختلاف ارتفاع در سازه‌های دوبلکسی ناشی از حذف ستون کناری

۸- الگوی مفصل پلاستیک در مدل‌های سازه‌ای

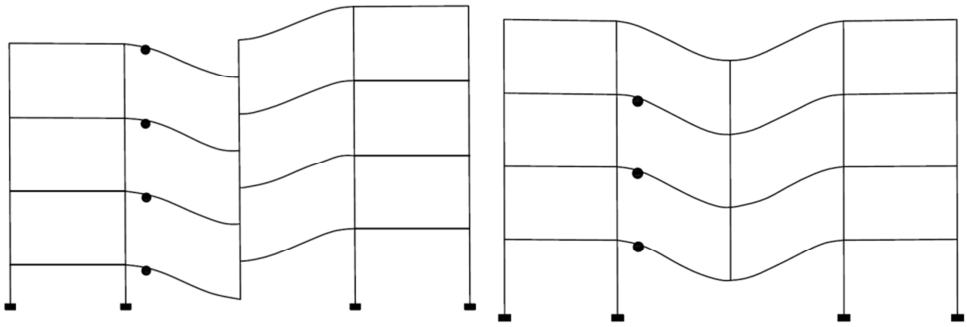
در تحلیل غیرخطی استاتیکی کل بار مرده و نیمی از بار زنده همواره حضور داشته و جرم سیستم را تشکیل می‌دهند تا در گام‌های این تحلیل عکس‌العمل جایگزین ستون حذف‌شده به‌تدریج با افزودن بار خنثی از سازه برداشته شود. در این نوع بارگذاری ابتدا رفتار کلی سازه به‌صورت خطی بوده و با افزایش بار مقابله‌کننده با عکس‌العمل قائم محوری ستون حذف‌شده در بعضی از اعضا، مفاصل خمیری تشکیل‌شده و رفتار کلی به مرحله غیرخطی وارد می‌گردد. نهایتاً یک یا چند عضو از سازه به حد نهایی تغییرشکل می‌رسند که این مرحله پایان تحلیل است.

تحت اثر بارهای لرزه‌ای سه مود اصلی شکست شامل شکست برشی، شکست خمشی، مفصل پلاستیک و شکست وصلهٔ اتصال ایجاد می‌گردد. اولین و بحرانی‌ترین مود شکست ستون، شکست برشی است. با رسیدن تنش‌های کششی ایجاد شده در بتن به مقاومت کششی بتن و ظهور ترک‌های مورب، بتن پوسته شروع به ریختن می‌کند. به دنبال آن پارگی و باز شدن آرماتورهای عرضی و در نتیجه کمانش آرماتورهای طولی اتفاق می‌افتد. روند فوق منجر به از هم پاشیدن بتن هسته و شکست ناگهانی و ترد ستون می‌شود (شکل ۱۰).

شکل ۱۰- شکست برشی ستون

در شکل‌های ۱۱ الی ۱۶ محل تشکیل اولین مفاصل پلاستیک در اعضای سازه‌ای مجاور با ستون حذف‌شده در سازه‌های چهار و هشت طبقه و دوبلکسی نمایش داده شده است. همان‌طورکه در شکل‌ها مشخص شده در مدل‌های چهار طبقه دوبلکسی بیشترین مکانیزم ایجاد مفصل پلاستیک در تیرهای قاب‌های کوتاه‌تر دارای ارتفاع کمتر رخ‌داده است و در مدل‌های چهار طبقه معمولی نوعی تقارن در تشکیل مفصل پلاستیک وجود دارد (به دلیل عدم وجود اختلاف تراز ارتفاعی). در قاب کناری اولین مفاصل پلاستیک در تیرهای قاب کوتاه‌تر پدیدار شده است و کمترین تعداد مفاصل پلاستیک در قاب کناری سازه معمولی رخ داده است.

در مدل‌های هشت طبقه بیشترین مفاصل پلاستیک تولیدی در قاب‌های کناری در سازه‌های معمولی و دوبلکسی رخ‌داده است و در قاب‌های میانی و مرکزی کمترین مفصل ایجاد شده و مفصل فقط در طبقات اول و دوم قاب مشاهده می‌شوند، ولی در قاب‌های کناری تمامی تیرهای متصل به ستون حذف‌شده در قالب کوتاه‌تر (دارای ارتفاع کمتر) رخ داده است.



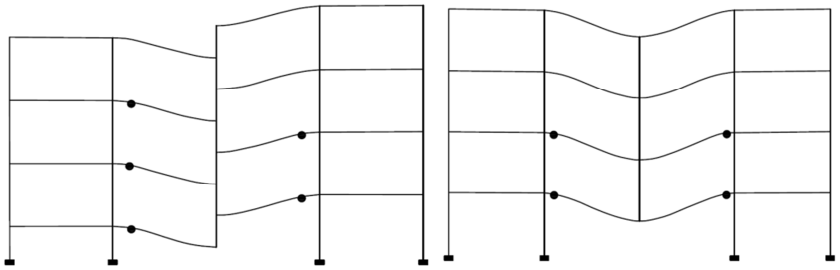
شکل ۱۱- الگوی مفصل پلاستیک در سازه چهار طبقه معمولی و دوبلکسی با حذف ستون کنار

۹-نتیجه‌گیری

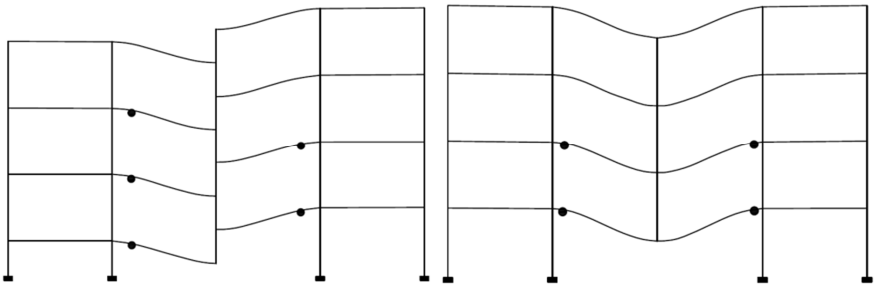
با بررسی و مقایسه جدول و شکل‌های ارائه‌شده، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- بیشترین مفاصل پلاستیک در تیرهای متصل به ستون‌های حذف‌شده در قاب‌های کوتاه‌تر کناری و کمترین مفاصل در قاب‌های مرکزی سازه‌ها رخداده است. با افزایش ارتفاع سازه مفاصل پلاستیک در سازه‌های دوبلکسی، در تیرهای متصل به ستون حذف‌شده در طبقات پایین (اول و دوم) ایجاد شده‌اند.

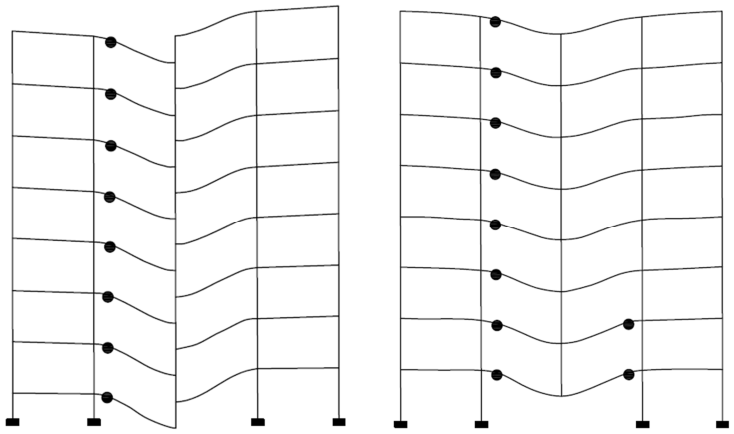
۲- در کلیه مدل‌های سازه‌ای دوبلکسی، تغییرمکان و ظرفیت باربری نسبت به مدل‌های سازه‌ای معمولی بیشتر است که این حاکی از سختی بیشتر سازه‌های دوبلکسی می‌باشد.



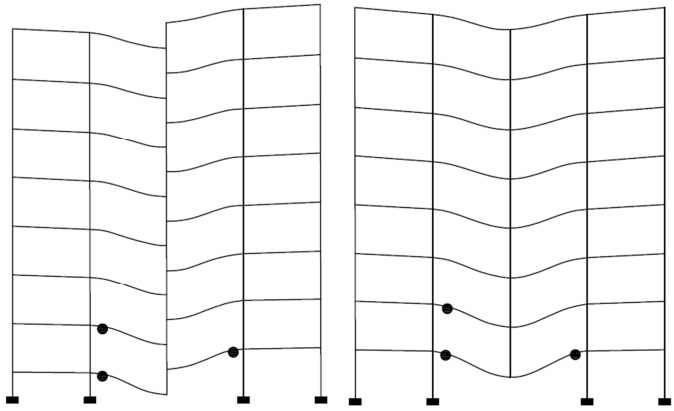
شکل ۱۲- الگوی مفصل پلاستیک در سازه چهار طبقه معمولی و دوبلکسی با حذف ستون وسط



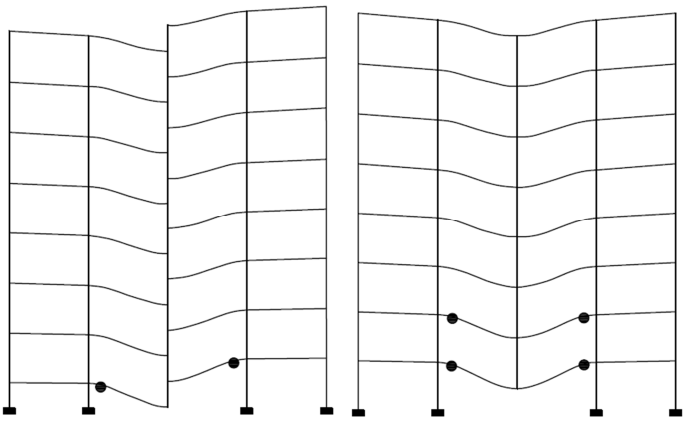
شکل ۱۳- الگوی مفصل پلاستیک در سازه چهار طبقه معمولی و دوبلکسی با حذف ستون مرکز



شکل ۱۴- الگوی مفصل پلاستیک در سازه هشت طبقه معمولی و دوبلکسی با حذف ستون کنار



شکل ۱۵- الگوی مفصل پلاستیک در سازه هشت طبقه معمولی و دوبلکسی با حذف ستون وسط



شکل ۱۶- الگوی مفصل پلاستیک در سازه هشت طبقه معمولی و دوبلکسی با حذف ستون مرکز

۳- سازه‌های دوبلکسی کوتاه نسبت به سازه‌های دوبلکسی بلند دارای سختی و ظرفیت باربری بیشتری می‌باشند.

۴- در کلیه سازه‌ها، قاب‌های کناری دارای بیشترین درصد خرابی و شاخص حساسیت و قاب‌های مرکزی و میانی تقریباً رفتاری مشابه هم داشته‌اند و این شاخص در آن‌ها تقریبا یکسان است.

۵- تأثیر اختلاف ارتفاع در شاخص حساسیت در سازه‌های دوبلکسی چهار طبقه بیشتر و در سازه دوبلکسی هشت طبقه تأثیر چندانی ندارد. در سازه دوبلکسی چهار طبقه هرچه اختلاف ارتفاع کمتر باشد، شاخص حساسیت بیشتر است.

۶- با افزایش ارتفاع سازه، رفتار سازه معمولی و دوبلکسی در بحث تخریب پیش‌رونده تقریباً مشابه هم می‌گردد.

مراجع

[۱] خیرالدین، ع.، انواری، ع. م. (۱۳۹۲). "بارگذاری سازه‌ها"، ویرایش و چاپ سوم، انتشارات دانشگاه سمنان.

[2] Iribarren B.S. (2011). “Progressive collapse simulation of reinforced concrete structures: Influence of design and material parameters and investigation of the strain rate effects”, *Universite Libre de Bruxelles*.

[۳] خیرالدین، ع.، کارگران، ع. (۱۳۹۸). "عملکرد لرزه‌ای غیرخطی ستون کوتاه در سازه‌های بتن‌آرمه با اختلاف تراز طبقه «یادداشت پژوهشی»"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی عمران فردوسی، دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۲۲، شماره ۱.

[۴] خیرالدین، ع.، میر نظامی، ع. ر. (۱۳۸۱). " بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فلزی با اختلاف تراز"، سومین همایش ملی نقد و بررسی آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، تهران.

[۵] خیرالدین، ع.، میر نظامی، ع. ر. (۱۳۸۳). "بررسی رفتار غیرخطی اتصالات قاب با اختلاف تراز طبقه در ساختمان‌های دوبلکسی"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۶] قدرتی امیری، غ. ر.، خیرالدین، ع.، کارگران، ع. (۱۳۹۰). "بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های دوبلکسی بتن‌آرمه در برابر زلزله"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۵، شماره ۴.

[7] Sucuo g ˇ lu, H., Çitipitio g ˇ lu, E., & Altin, S. (1994). “Resistance mechanisms in RC building frames subjected to column failure”, *Journal of structural engineering*, *120*(3), 765-782.

[8] Tsai, M. H., & Lin, B. H. (2008). “Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake-resistant RC building subjected to column failure”, *Engineering structures*, *30*(12), 3619-3628.

[9] Mohamed, O. A. (2009). “Assessment of progressive collapse potential in corner floor panels of reinforced concrete buildings”, *Engineering Structures*, *31*(3), 749-757.

[10] Kheyroddin, A., Mehrabi, F., & Gerami, M. (2012), "Assessment of dynamic effect of steel frame due to sudden middle column loss", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 1002 -1049.
[11] Kheyroddin, A., & Mehrabi, F. (2012). "Assessment of progressive collapse potential of steel frame due to sudden corner column loss", *Wulfenia*, 191 -206.
[12] Mashhadiali, N., Kheyroddin, A., & Zahiri-Hashemi, R. (2016). "Dynamic Increase Factor for Investigation of Progressive Collapse Potential in Tall Tube-Type Buildings", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *30*(6), 0887-3828.
[13] Mashhadiali, N., & Kheyroddin, A. (2014). "Progressive collapse assessment of new hexagrid structural system for tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *23*(12), 947-961.
[14] Choi, J.-h., Ito, T., & Ohi, K. (2012). "Sensitivity index on load carrying capacity of framed structures to member disappearance", 2075-2080.
[15] Starossek, U. (2007). "Typology of progressive collapse", *Engineering Structures*, *29*(9), 2302-2307.
[۱۶] مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸۸). "پیش‌نویس مبحث ۲۱(پدافند غیرعامل)"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
[17] Whittaker, A., & Hamburger, R. (2003). "Design of steel structures for blast-related and progressive collapse resistance", AISC-SINY symposium on resisting blast and progressive collapse, *American institute of steel construction*, New York.
[18] Guo, G., Gilsanz, A., (2003). "Simple nonlinear static analysis procedure for progressive collapse", AISC-SINY symposium on resisting blast and progressive collapse, *American institute of steel construction*, New York.
[19] Powell, G. (2005). "Progressive collapse: Case studies using nonlinear analysis", In *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*, 1-14.
[20] Bangash, M.Y.H., & Bangash, T. (2006). "Analysis explosion-resistant buildings . design,analysis,and case studies", *springer-verlag Berlin Heidelberg*, New York.
[21] Starossek, U., (2009). "progressive collapse of structures", Thomas Telford limited, London.
[22] Krauthammer, T. (2003). "AISC research on structural steel to resist blast and progressive collapse", AISC-SINY symposium on resisting blast and progressive collaps, *American institute of steel construction*, New York.
[23] FEMA 427, (2003). "primer for design of commercial building to mitigate terrorist attacks", *federal emergency management agency*.
[۲۴] آئین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله، (۱۳۸۴). استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
[۲۵] مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸۵). مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.
[۲۶] تقی نژاد، ر. (۱۳۸۹). "طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها براساس سطح عملکرد با استفاده از تحلیل پوش‌آور SAP2000-ETABS"، چاپ دوم، انتشارات کتاب دانشگاهی.
[27] Kim, T., Kim, J., & Park, J. (2009). "Investigation of progressive collapse-resisting capability of steel moment frames using push-down analysis", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *23*(5), 327-335.
[28] Marjanishvili, S., & Agnew, E. (2006). "Comparison of various progressive collapse analysis", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *20*, 365-374.
[29] GSA. (2003). "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects", *General Services Administration*.
[30] Marjanishvili, S., & Agnew, E. (2009). "Unified facilities criteria, design of building to resist progressive collapse", *Department of Defense(DoD)*.

A. Kheyroddin

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

e-mail: kheyroddin@semnan.ac.ir

A. Kargaran*

PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

e-mail: a.kargaran@semnaniau.ac.ir

M. Haji

MSc Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

e-mail: mohammadhaji70@yahoo.com

Study of RC Structures with Different Floor in Progressive Collapse

In structures with different floor, one of effective failure factor in past earthquakes was short column phenomenon which in this structures, floors create in two or more different heights. The main problem in this structures that caused significant changes in period, stiffness and distribution of earthquake force is discontinuity of floor diaphragm. In this paper linear and nonlinear behavior of Progressive collapse in 4 and 8 story structures with difference in story level with investigation of Sensitivity Index (SI), displacement, plastic hinge pattern in columns and beams and capacity spectrum and etc studied. The result show that the short structures with difference in story level have more stiffness and load capacity and low height difference make more sensitivity index.

Keywords: Progressive collapse, Frame with different floor, Reinforced concrete, Plastic hinge pattern, Sensitivity Index (SI).

*Corresponding author