

مجله علمی ترویجی «پدافند غیرعامل»

سال یازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، (پیاپی ۴۳): صص ۶۷-۷۸

علمی - ترویجی

## تحلیل خرابی پیش‌رونده سیستم قاب خمشی فولادی مهار شده با دیوار برشی بتنی

سید شهاب امام‌زاده<sup>۱\*</sup>، ابوذر ارباب‌نوش‌آبادی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵

### چکیده

یکی از راهکارهای مطرح در پدافند غیرعامل، محافظت ساختمان‌های مهم در برابر خرابی پیش‌رونده است. خرابی پیش‌رونده پدیده‌ای است که در شرایط خاص به علت حذف برخی از اعضای سازه‌ای در یک ساختمان امکان وقوع دارد. در این تحقیق با استفاده روش مسیر بار جایگزین مندرج در ضوابط UFC 4-023-03 به ارزیابی خرابی پیش‌رونده یک ساختمان ۲۶ طبقه مسکونی ساخته‌شده در تهران در برابر چندین سناریوی حذف ستون و دیوار برشی واقع در طبقه همکف پرداخته شده است. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی توسط نرم‌افزار SAP2000 و بر اساس ضوابط UFC انجام شده است تا توانایی ساختمان برای پل زدن روی اعضای باربر باقی مانده مورد ارزیابی قرار گیرد. مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها در قاب خمشی ویژه طبق دستورالعمل ASCE41-17 و FEMA356 تعریف شدند. دیوارهای برشی تیز به دو روش پوسته چند لایه و روش ستون معادل میانی مدل‌سازی گردید. نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد با آرایش صحیح دیوارهای برشی سیستم دوگانه در محدوده ضوابط آیین‌نامه‌ای توانایی مناسبی جهت مقابله با خرابی پیش‌رونده به‌دست خواهد آمد.

**کلید واژه‌ها:** پدافند غیرعامل، دیوار برشی بتنی، خرابی پیش‌رونده، ساختمان‌های بلند، سیستم دوگانه

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی تهران (shemamzadeh@khu.ac.ir) - نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گرایش سازه - دانشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱- مقدمه

آن‌ها اعمال شود. از آنجا که معمولاً بارگذاری انفجاری در طراحی سازه این ساختمان‌ها در نظر گرفته نمی‌شود لذا پیش‌بینی می‌شود در صورت وقوع انفجار یک یا تعدادی از اعضای این ساختمان‌ها منهدم شوند.

تاکنون بیشتر تحقیقات در زمینه کنترل خرابی دیوارهای غیرسازه‌ای بوده است [۳-۴] و در مورد تاثیر خرابی دیوارهای برشی مطالعات اندکی انجام شده است. همچنین برخی از محققین ظرفیت قاب‌های خمشی فولادی را در برابر خرابی پیش‌رونده بررسی نموده‌اند [۵-۶]. با این حال تحقیقات اندکی بر روی خرابی پیش‌رونده سیستم‌های دوگانه انجام شده است [۷-۸]. در اکثر این تحقیقات، از روش مسیر جایگزین مندرج در دستورالعمل‌های GSA [۹] و UFC [۱۰] استفاده شده و تحلیل‌های ایستایی خطی و دینامیکی غیرخطی برای مقایسه انجام گرفته است [۱۱]. مشاهده گردیده که تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در مقایسه با نتایج تحلیل ایستایی خطی منجر به پاسخ‌های بزرگ‌تری می‌شود. نتایج به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای با متغیرهایی مانند بار اعمالی، محل حذف ستون و تعداد طبقات ساختمان تغییر می‌نماید. همان‌طور که انتظار می‌رفت قاب‌های خمشی فولادی که هم برای بار ثقلی و هم برای بار جانبی طرح شده بودند، آسیب‌پذیری کمی در برابر خرابی پیش‌رونده داشتند. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی و بررسی نحوه خرابی پیش‌رونده احتمالی سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی ویژه همراه دیوار برشی بتنی مسلح ویژه در ساختمان‌های بلند خواهد بود.

## ۲- بارگذاری ناشی از خرابی پیش‌رونده

در این تحقیق، ابتدا سازه بر اساس مبنا ششم مقررات ملی بارگذاری و بر اساس مبنا نهم و دهم مقررات ملی طراحی شد. سپس مقاومت سازه در مقابل خرابی پیش‌رونده از طریق سناریوهای حذف عناصر باربر قائم تحت نوع خاصی از بارگذاری که توسط UFC در نظر گرفته شده مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق توصیه UFC سناریوهای حداقل برداشت، شامل حذف اعضاء در گوشه، وسط هر طبقه و همچنین در پایین‌ترین طبقه، طبقه‌ای که مستقیماً زیر بام قرار گرفته، طبقه میانی و طبقه‌ای که مقاطع ستون‌ها تغییر یافته و یا ستون‌هایی که دارای ورق وصله هستند. جهت انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، ترکیب بارگذاری ثقلی  $G_{LD}$  در حالت جابجایی کنترل به شرح ذیل تعریف می‌شود [۱۰].

• در کف‌هایی که بالای ستون یا دیوار حذف شده هستند:

$$G_{LD} = \Omega_{LD} (1/2DL + 0.5LL) \quad (1)$$

$G_{LD}$ : بارهای ثقلی افزایش یافته

DL: بار مرده

طبق مقررات ملی ساختمان در مبحث پدافند غیرعامل، محافظت ساختمان‌های مهم از جمله ساختمان‌های بلند در برابر خرابی پیش‌رونده الزامی است. در خرابی پیش‌رونده یک یا چند عضو سازه‌ای ناگهان گسیخته شده و پس از آن ساختمان به‌صورت پیش‌رونده تخریب می‌گردد. در این حالت هر توزیع بار موجب شکست دیگر اعضای سازه‌ای یکی پس از دیگری می‌شود تا این که حالت جدیدی از تعامل به‌وجود آید به‌طوری که قسمتی و یا تمام سازه خراب شده باشد. خرابی پیش‌رونده هنگامی بحرانی است که آسیب کلی از حد مجاز فراتر رود. تعریف خرابی بحرانی در استانداردها بر اساس تخمین خطرپذیری قابل قبول تغییر می‌کند. استانداردهای طراحی معمولاً عبارت خرابی پیش‌رونده را نوعی خرابی بحرانی می‌دانند. در این تحقیق نیز درجایی که واژه خرابی پیش‌رونده آمده است به‌صورت ضمنی بحرانی بودن خرابی موردنظر بوده است.

در استانداردهایی که جهت مقابله با خرابی پیش‌رونده راهکار ارائه نموده‌اند، دو روش اساسی مطرح گردیده است که شامل روش طراحی مستقیم و روش طراحی غیرمستقیم می‌گردد. روش طراحی مستقیم، خود به دو روش مسیر بار جایگزین<sup>۱</sup> و مقاومت موضعی ویژه<sup>۲</sup> انجام می‌شود. روش مسیر بار جایگزین به دنبال ارائه مسیر فرعی برای انتقال بار پس از وقوع خرابی است. مسیر جایگزین به‌نحوی تعریف می‌گردد که جلوی آسیب موضعی گرفته شده و از گسیختگی کلی نیز جلوگیری شود. روش مقاومت موضعی ویژه به دنبال ارائه مقاومت کافی برای مقابله در برابر خرابی در محل‌های بحرانی است.

یکی از سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند، سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی ویژه و دیوار برشی بتنی ویژه با ضریب رفتار ۷/۵ است که تا ارتفاع ۲۰۰ متر کاربرد دارد. استاندارد زلزله ۲۸۰۰ استفاده از سیستم قاب خمشی ویژه و یا سیستم دوگانه را برای ساختمان‌های بیش از ۱۵ طبقه و یا بلندتر از ۵۰ متر الزامی دانسته است. در این ساختمان‌ها نمی‌توان برای مقابله با تمام نیروی جانبی زلزله منحصر به دیوارهای برشی اکتفا نمود. قاب‌های خمشی باید مستقلاً قادر به تحمل حداقل ۲۵ درصد نیروهای جانبی در تراز پایه و دیوارهای برشی باید مستقلاً قادر به تحمل حداقل ۵۰ درصد نیروهای جانبی در تراز پایه باشند [۱]. از طرف دیگر طبق مبحث بیست‌ویکم [۲]، برج‌های مسکونی، تجاری و اداری بیش از ۲۰ طبقه جزو ساختمان‌های با درجه اهمیت ویژه محسوب می‌شوند که ملاحظات پدافندی خاصی باید در طراحی

<sup>1</sup> Alternate Load Path

<sup>2</sup> Specific Local Resistance

LL: بار زنده

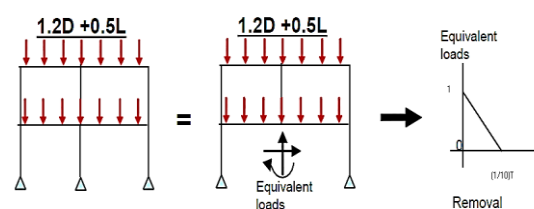
$\Omega_D$ : ضریب افزایش بار طبق تعریف مرجع [۱۰]

• در کف‌هایی که دور از ستون یا دیوار حذف شده هستند:

$$G = 1/2DL + 0.5LL \quad (2)$$

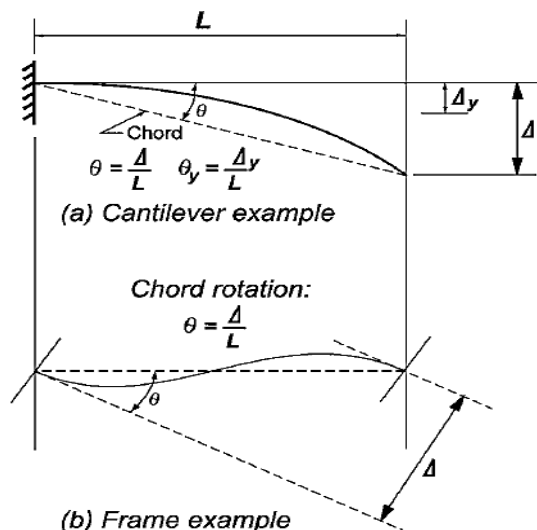
G: بارهای ثقلی

طبق شکل (۱)، قبل از حذف ستون یا دیوار برشی، نیروهای معادل جایگزین می‌گردند، سپس این نیروها (محوری P، برشی V و خمشی M) در مدت زمانی بین ۱/۱ تا ۱/۲ پریود طبیعی سازه به صفر می‌رسند. بقیه بارها همچنان بر سازه اعمال می‌گردند.



شکل (۱): تاریخچه بارگذاری در زمان حذف ستون یا دیوار برشی.

برای مفاصل خمشی  $M_2$ ،  $M_3$  و مفصل اندرکنشی P-M-M معیار پذیرش برحسب  $\theta/\theta_y$  و برای مفاصل برشی (V) و محوری (P) معیار پذیرش برحسب  $\Delta/\Delta_y$  در نظر گرفته می‌شود. طبق شکل (۳)، مقدار دوران متناظر با لنگر تسلیم است که از روابط مندرج در ASCE برای تیرها و ستون‌ها محاسبه می‌گردد.



شکل (۳): تعریف چرخش وتر [۱۲].

تیرها: ( $I_b$  طول تیر)

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye} I_b}{6EI_b} \quad (3)$$

ستون‌ها: ( $I_c$  طول ستون)

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye} I_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P}{p_{ye}}\right) \quad (4)$$

$P$  = نیروی محوری عضو در تغییر مکان هدف

$p_{ye}$  = نیروی محوری حد تسلیم مورد انتظار در عضو و برابر  $A_g F_{ye}$

$A_g$  = سطح مقطع ستون ( $\text{cm}^2$ )

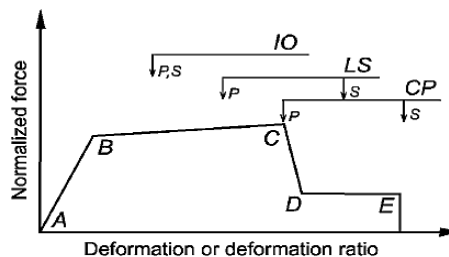
$Z$  = اساس مقطع پلاستیک ( $\text{cm}^3$ )

$F_{ye}$  = تنش حد تسلیم مورد انتظار برای مصالح ( $\text{kg/cm}^2$ )

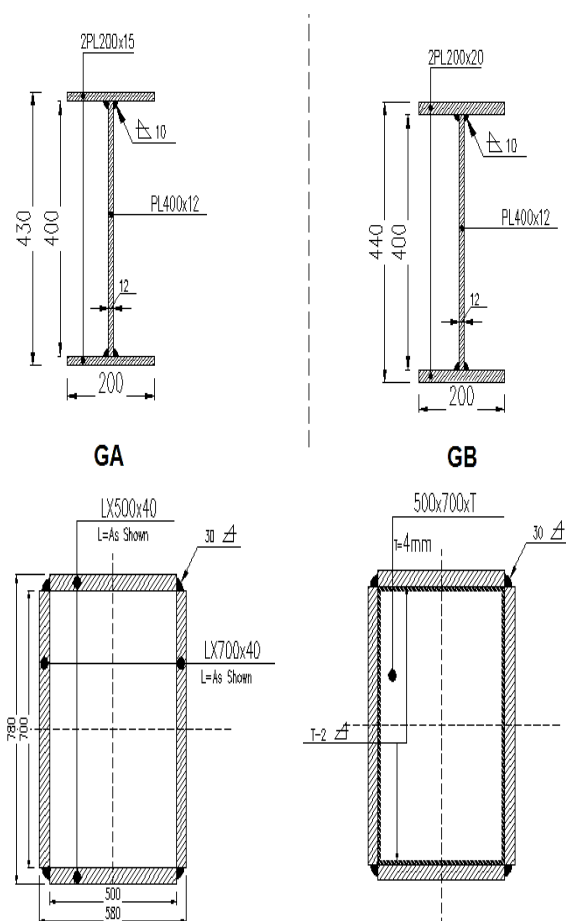
معیار DOD، پذیرش مفاصل را به جداول پذیرش مفاصل استاندارد ASCE 41-17 معطوف می‌نماید [۱۹]. در این جداول نوع و نحوه اتصال تیر به ستون در معیار پذیرش مفاصل اثرگذار است. سطح عملکرد قابل قبول در UFC ایمنی جانی (LS) در نظر گرفته شده است. همچنین این معیارها با دستورالعمل معیارهای پذیرش مفاصل FEMA356 [۲۰] برای سطح عملکرد (LS)

### ۳- معیار پذیرش مفاصل در سطوح عملکردی مختلف

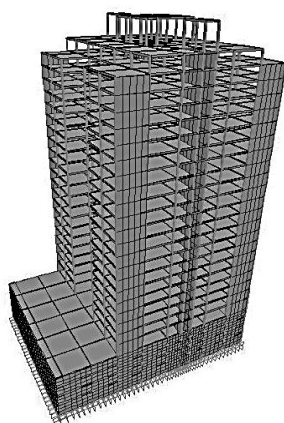
سطوح اصلی عملکردی در تحلیل لرزه‌ای عبارتند از سطح استفاده بی‌وقفه (Immediate Occupancy-IO)، سطح ایمنی جانی (Life Safety-LS) و سطح آستانه فروریزش (Collapse Prevention-CP). سطح استفاده بی‌وقفه (IO) سطحی است که پیش‌بینی می‌شود تغییر قابل توجهی در مقاومت و سختی اجزای سازه‌ای ایجاد نشود و استفاده بی‌وقفه از آن ممکن باشد. در سطح ایمنی جانی (LS) پیش‌بینی می‌شود خرابی در سازه ایجاد شود، اما منجر به خسارات جانی نشود. آستانه فروریزش (CP) سطح عملکردی است که پیش‌بینی می‌شود در سازه خرابی گسترده‌ای ایجاد شود اما منجر به فروریزی نشده و تلفات جانی به حداقل برسد. در شکل (۲) معیارهای پذیرش مفاصل در سطوح عملکردی مختلف بر حسب مقادیر تغییر شکل‌های مجاز اعضای اصلی P و اعضای ثانویه S نشان داده شده است.



شکل (۲): معیار پذیرش مفاصل در سطوح عملکردی مختلف [۱۲].



شکل (۴): نمونه‌ای از مقاطع تیرها و ستون‌های سازه.



شکل (۵): نمای سه‌بعدی از مدل ساختمان ۲۶ طبقه.

#### ۵- معرفی مفاصل پلاستیک در قاب خمشی ویژه

طبق دستورالعمل ASCE41-17 و FEMA356 در تیرها، مفصل خمشی (M3) و در ستون‌ها مفصل محوری-خمشی دوطرفه (P-M2-M3)، تعریف می‌گردد. در دیوارهای برشی نیز در روش مدل‌سازی دیوار به روش ستون معادل از مفصل محوری-خمشی دوطرفه (P-M2-M3) استفاده می‌گردد.

مطابقت دارند. جداول ارائه شده جهت پارامترهای تحلیل غیرخطی و معیارهای پذیرش در استانداردهای ASCE 41-17 و FEMA356 و که برای تیرها و ستون‌های اسکلت فولادی ارائه گردیده نشان از تطابق معیارهای این دو استاندارد در مورد اجزای اسکلت فولادی دارد. در این تحقیق از معیارهای FEMA356 در برنامه SAP 2000 استفاده می‌شود.

#### ۴- معرفی پروژه

ساختمانی ۲۶ طبقه با ۷۷ متر ارتفاع از روی تراز پایه و پلانی به طول ۴۸/۶ و عرض ۴۳ متر در تهران، مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم مقاوم در برابر بار ثقلی، قاب خمشی با سقف کامپوزیت و سیستم مقاوم در برابر بار جانبی، ترکیب قاب خمشی ویژه و دیوار برشی در هر دو جهت است. با توجه به استاندارد ۲۸۰۰، ساختمان مذکور در پلان و ارتفاع منظم است. بارگذاری قائم و جانبی ساختمان طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ زلزله اعمال شده است. آیین‌نامه مورد استفاده جهت طراحی اجزای سازه‌ای، آیین‌نامه AISI-ASD89 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان با رعایت ضوابط مربوط به طرح لرزه‌ای جهت شکل‌پذیری ویژه است. بتن دال‌ها و دیوارها دارای مقاومت مشخصه استاندارد ۲۸MPa و تنش تسلیم آرماتورها MPa ۴۰۰ است. پس از تحلیل و طراحی سازه، مقاطع تیرها و ستون‌ها با لحاظ ضوابط شکل‌پذیری و طرح لرزه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به دست آمد. کلیه ستون‌ها قوطی و کلیه تیرهای اصلی از نوع تیپورق I است. شکل (۴) نمونه‌ای از مقاطع تیر و ستون‌ها و شکل (۵) مدل سه‌بعدی ساختمان را نشان می‌دهد. اتصالات صلب قاب خمشی با شکل‌پذیری زیاد با استفاده از ورق‌های روسری و زیرسری با جزئیات مندرج در ضوابط طرح لرزه‌ای طراحی گردیده است. طبق طرح لرزه‌ای مبحث دهم، اتصالات تیر به ستون در قاب خمشی ویژه به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که شرایط ایجاد مفصل پلاستیک در داخل تیر و خارج از

ستون‌ها:

BOX400×400×(T25-T30-T35) mm

BOX450×450×(T40) mm

BOX450×500×(T40) mm

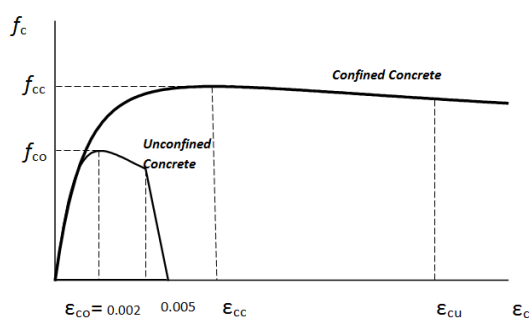
BOX500×500×(T40) mm

BOX500×600×(T40) mm

BOX500×700×(T40) mm

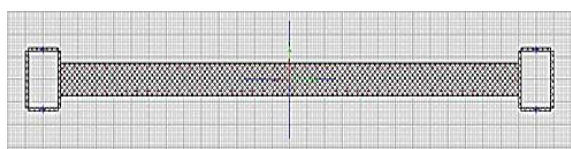
تیرها:

GA40, GB40, GC40, GD40, GE40,.....و



شکل (۹): منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده و غیرمحصور [۱۴]

در این پروژه ستون‌ها به صورت غیرمدفون در دیوار برشی اجرا می‌شوند و از برشگیر روی ستون‌ها جهت اتصال به دیوار برشی، استفاده می‌شود. لذا عملکرد ستون و دیوارهای برشی تفکیک پذیر بوده و دیوار برشی به روش ستون معادل مدل سازی می‌شود. نهایتاً مجموع ستون‌های فولادی اطراف دیوار و خود دیوار برشی بتن‌آرمه به عنوان یک قاب معادل در برنامه تعریف می‌گردد. بدین ترتیب به تعداد تنوع موجود در مقطع ستون‌ها و نوع آرماتورهای قائم و افقی تعریف شده برای دیوارهای برشی بتن‌آرمه در ترازهای مختلف، مقطع ستون معادل مطابق شکل نمونه (۱۰) تعریف می‌گردد.



شکل (۱۰): مقطع ستون معادل دیوار برشی و ستون‌های قوطی شکل.

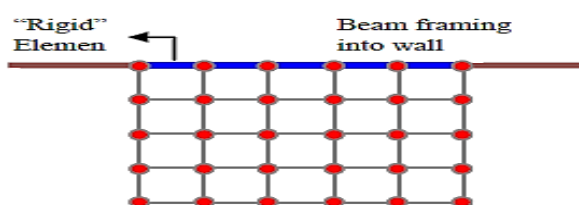
به دلیل آن که امکان تعریف حالت حذف برای قسمتی از این سه جزء ترکیب شده در روش ستون معادل نمی‌باشد و همچنین در حالت‌هایی که دیوار دارای بازشو باشد و یا این که دو دیوار در پلان سازه نسبت به هم متعامد باشند، تعریف مناسبی برای ستون معادل متصور نمی‌گردد در این تحقیق از هر دو روش در محل متناسب با شرایط موجود، استفاده گردیده است.

## ۷- سناریوهای حذف ناگهانی عناصر باربر قائم

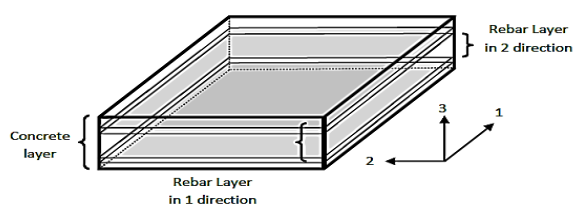
به طور قطع مقدار، نوع و فاصله ماده منفجره نسبت به ساختمان، از عوامل تأثیرگذار در نحوه خرابی سازه است ولیکن در دستورالعمل UFC فرض بر این است که اثر تخریبی انفجار به صورت حذف ناگهانی عناصر باربر قائم در نزدیکی محل انفجار انجام می‌گردد و میزان شارژ و فاصله مواد انفجاری تا سازه موردنظر و مواردی از این دست موضوعیت ندارد. با توجه به موقعیت ساختمان مورد مطالعه نسبت به معابر اصلی و با فرض آنکه ورود وسایل نقلیه ناشناس حاوی مواد منفجره با کنترل تردد ورودی ساختمان، امکان نخواهد داشت.

## ۶- مدل سازی دیوارهای برشی

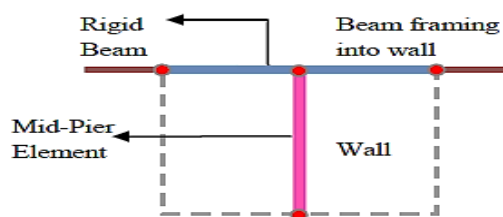
جهت مدل سازی دیوارهای برشی در برنامه SAP، از دو روش می‌توان استفاده نمود. روش اول معرفی دیوار برشی مطابق شکل (۶) به صورت المان پوسته چندلایه<sup>۱</sup> نشان داده شده شکل (۷)، و روش دوم، تعریف دیوار برشی مطابق شکل (۸) به عنوان یک ستون معادل میانی<sup>۲</sup> همراه با مفاصل پلاستیک و معیارهای پذیرش ASCE 41-17 است. فاجان [۸] نشان داد که هر دو روش به لحاظ تغییر مکان نقطه هدف در تراز موردنظر و سطوح عملکرد شبیه یکدیگر بوده و میزان برش پایه در مدل ستون معادل محافظه کارانه تر است.



شکل (۶): مدل اجزای محدود دیوار برشی با المان پوسته چند لایه [۸]



شکل (۷): المان پوسته چندلایه در مدل دیوار برشی [۸]



شکل (۸): مدل دیوار برشی به روش ستون معادل میانی [۸].

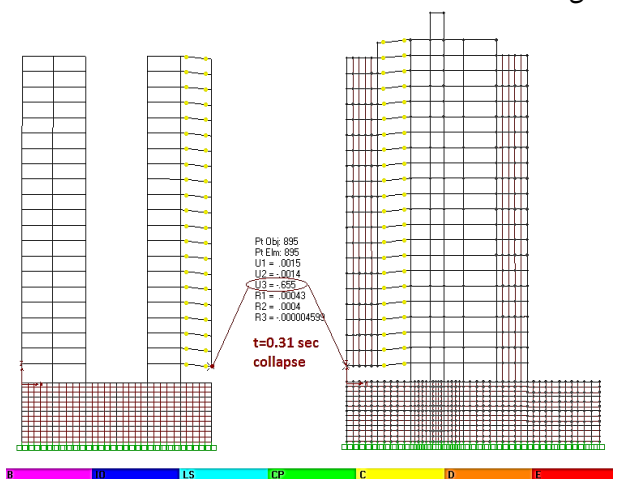
جهت مدل کردن دیوارها به روش اول در برنامه باید مشخصات غیرخطی میلگردها، بتن محصور شده و نشده تعریف گردد. مشخصات غیرخطی بتن‌های محصور شده و نشده مطابق شکل (۹) تعریف شده است. مقاومت فشاری بتن محصور شده و نشده، ۲۸MPa، کرنش گسیختگی بتن غیرمحصور ۰/۰۰۵، کرنش تسلیم میلگرد (AIII - S400) ۰/۰۰۲۳ و کرنش نهایی میلگرد ۰/۱۲، تنش تسلیم ۴۰۰ MPa و تنش گسیختگی ۵۰۰ MPa در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup> Multi layered Shell Element

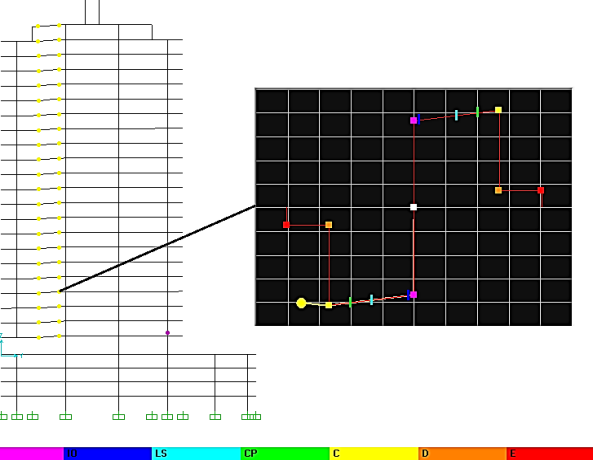
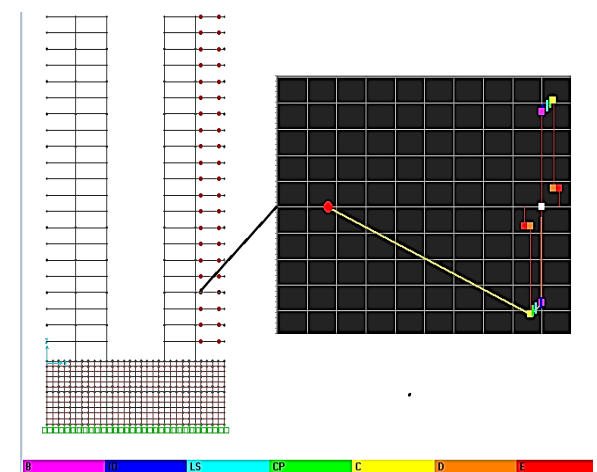
<sup>2</sup> Mid Pier Model

**سناریوی اول: حذف دو ستون J-7، I-7 و دیوار J-I**

در اولین سناریو، دیوار برشی با دو روش ستون معادل و پوسته چندلایه مدل می‌شود. مقایسه نتایج دو روش نشان می‌دهد سطوح عملکردی اعضا، شباهت‌های زیادی با یکدیگر دارند. در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) موقعیت مفاصل پلاستیک در لحظه فروپاشی سازه نشان داده شده است.



شکل (۱۴): تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل پوسته چند لایه  $t=0.31s$ .

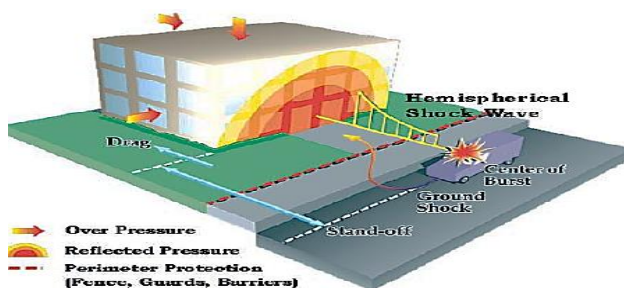


شکل (۱۵): تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل ستون معادل،  $t=0.235s$

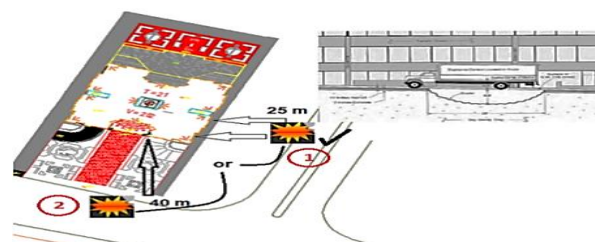
شکل (۱۱) پارامترها و مشخصات یک انفجار خارجی از طریق بمب‌گذاری در یک وسیله نقلیه و شکل (۱۲) موقعیت ساختمان مورد مطالعه نسبت به معابر اصلی در سایت پلان منطقه را نشان می‌دهد. همچنین فاصله کمتر محل پارک (گزینه شماره ۱) در خیابان جنوبی- شمالی، سناریوهای حذف ناگهانی عناصر برابر قائم در ساختمان به شرح شکل (۱۳) تعریف می‌شود. اگرچه در بخش دیگری از این تحقیق جهت سازه پیشنهادی، امکان وقوع سناریو جهت پارک وسیله نقلیه محتوی ماده منفجره در خیابان دیگر و در فاصله ۴۰ متر نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول (۱): رخدادهای حذف اعضای طبقه همکف.

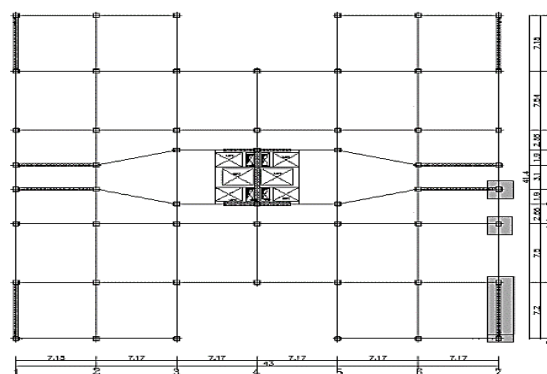
رخداد	تعداد اعضای حذف شده	نام اعضای حذف شده
۱	یک دیوار برشی + دو ستون مجاور	7/(I-J), J7, I7
۲	یک دیوار برشی + یک ستون مجاور	7/(J-I), J7
۳	یک ستون غیر مجاور	H7



شکل (۱۱): انفجار خارجی از طریق بمب‌گذاری در وسیله نقلیه.



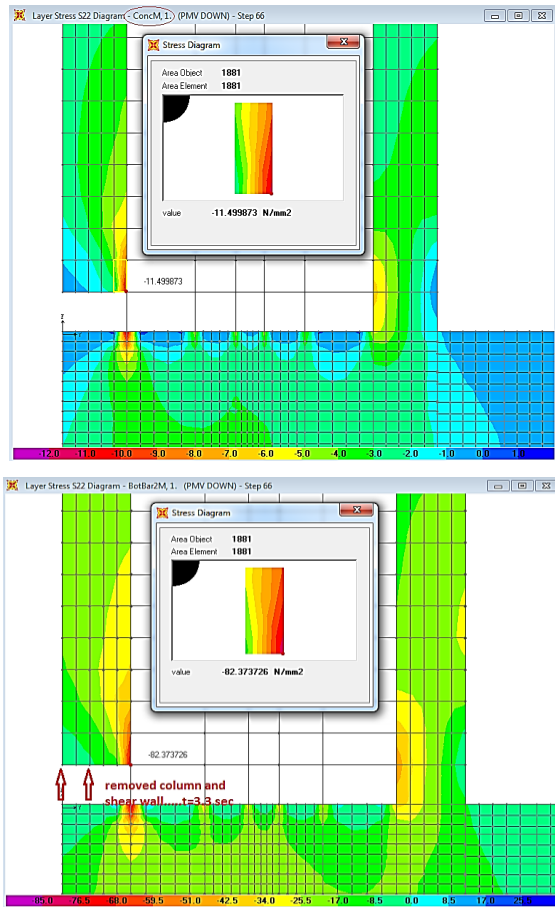
شکل (۱۲): موقعیت ساختمان و گزینه‌های وقوع انفجار.



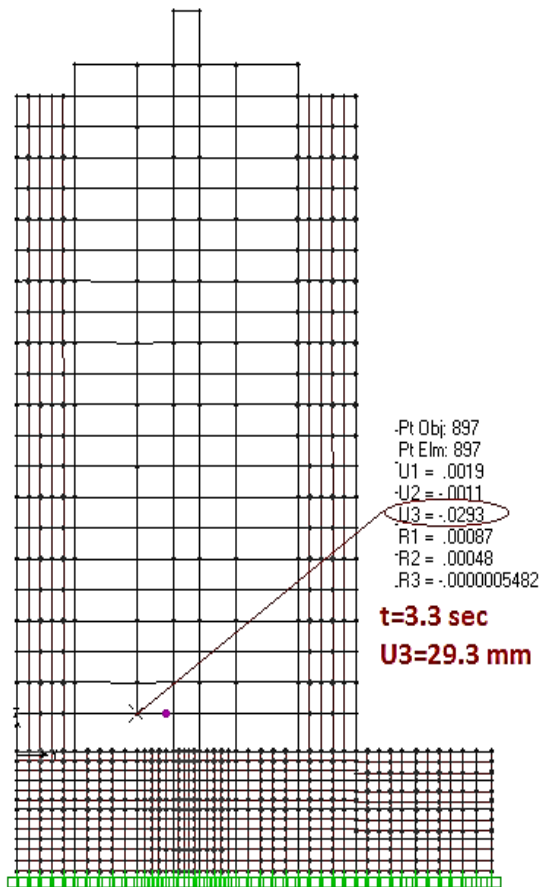
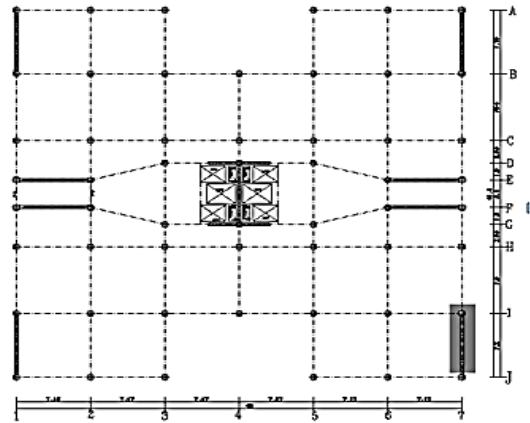
شکل (۱۳): رخدادهای حذف ناگهانی اعضای برابر قائم در پلان اولیه

### سناریوی دوم: حذف ستون J-7 و دیوار 7/(J-I)

در سناریوی حذف ستون J-7 و دیوار برشی 7/(J-I) امکان مدل‌سازی دیوار به روش ستون معادل نیست. در این سناریو، حداکثر تنش در لایه‌های آرماتور در حدود  $82/37 \text{ MPa}$  و در لایه خمشی بتن در حدود  $11/13 \text{ MPa}$  به دست آمد (شکل ۱۶). این مقدار با تنش‌های گسیختگی هر دو مصالح میلگرد و بتن به اندازه کافی فاصله دارد.



شکل (۱۷): وضعیت تنش بتن (بالا)؛ وضعیت تنش آرماتور (پایین)



شکل (۱۶): جابجایی قائم محل حذف ستون در مدل پوسته چندلایه.

علت این‌که سازه در مقابل این حالت حذف مقاومت نموده را می‌توان به شرح ذیل تفسیر نمود:

۱- چون سازه در برابر بار جانبی زلزله طراحی گردیده و مکانیسم غالب طراحی اجزا در طرح لرزه‌ای، ستون قوی و تیر ضعیف است، بنابراین مقاطع طراحی شده جهت ستون این‌گونه سازه‌ها دارای مشخصات مکانیکی مناسب جهت تحمل اضافه‌بار ناشی از انتقال مسیر بار حذف شده می‌باشند. برای نمونه در مورد حذف ستون J-7 و دیوار برشی 7/(J-I) به‌طور هم‌زمان در طبقه همکف، مساحت کل مقطع ستون کنار دیوار برشی حذف شده  $Ag=960 \text{ cm}^2$  بوده و همچنین نتایج تحلیل به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین نیروی محوری تجربه شده توسط ستون کناری دیوار برشی حذف شده (ستون J-7) در طول تاریخچه بارگذاری حذف  $191500 \text{ kg}$  است که از مقدار نیروی محوری حد تسلیم مورد انتظار در عضو  $P_{ye}$  فاصله زیادی دارد.

$$P_{ye} = F_{ye} A_g = 1.15 (2400)(960) = 2649600 \text{ kg}$$

۲- دیوار برشی متصل به ستون موجود کناری و ستون‌های بالاتر آن تا حدود زیادی از تغییر شکل قائم گره محل حذف المان

## ۷- تحلیل خرابی پیش‌رونده سازه اصلاح شده

برای مقابله با تخریب پیش‌رونده در سازه اصلاحاتی پیشنهاد شد. به نظر می‌رسد انتقال دیوار برشی‌ها به قسمت‌های محیطی سازه، مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده را جهت سناریوهای حذف دو ستون I-7، J-7 و دیوار برشی 7/(J-I) به‌طور هم‌زمان در طبقه همکف که جزو تجارب ناموفق سازه اولیه بوده است را بهبود بخشد. کلیه مراحل مربوط به تعریف مفاصل پلاستیک تیرها و ستون‌ها همانند آنچه در بخش‌های قبل توضیح داده شد، انجام گردیده است. ضمناً به دلیل تغییر موقعیت دیوارهای برشی مجدداً سازه طراحی لرزه‌ای شد و مقاطع جدیدی برای تیرها و ستون‌ها بدست آمد.

### سناریوهای حذف ناگهانی عناصر باربر قائم

اگرچه سناریوی محتمل جهت وقوع انفجار، در این تحقیق، گزینه ۱ از شکل (۱۲) است ولیکن جهت سازه با جانمایی جدید دیوارهای برشی، گزینه شماره ۲ از شکل (۱۲) نیز مورد بررسی قرار گرفته تا ارزیابی کلی سازه در برابر هرگونه حذف عناصر قائم تحت سناریوهای محتمل جهت انفجار، انجام گردد؛ بنابراین سناریوهای حذف عناصر باربر قائم جهت سازه پیشنهادی به شرح شکل‌های (۱۹ و ۲۰) است. در این قسمت از ارائه نتایج تحلیل مجدد در خصوص مواردی از حذف عناصر قائم که سازه اولیه توان مقابله خرابی پیش‌رونده در مواجهه با آن را داشته پرهیز گردیده ولی در مواردی همچون حذف ستون F-7، به دلیل حذف دیوار پشت ستون تحلیل مجدد انجام گرفته و نتایج ارائه گردیده است. بنابراین سناریوهای حذف عناصر باربر قائم جهت رخداد شماره ۱ (رخداد محتمل در این تحقیق) از شکل (۱۲) به شرح ذیل بررسی گردیده است:

سناریوی ۱: حذف دو ستون I-7، J-7 و دیوار برشی 7/(J-I) به‌طور هم‌زمان در طبقه همکف

سناریوی ۲: حذف ستون F-7 از طبقه همکف و جهت تحقیق در خصوص ارزیابی کلی مقاومت سازه جهت مقابله با خرابی پیش‌رونده در برابر رخداد شماره ۲، سناریوهای حذف عناصر باربر قائم به شرح ذیل نیز بررسی گردیده است:

سناریوی ۳: حذف دو ستون J-6 و J-7 و دیوار برشی J-6 در طبقه همکف

سناریوی ۴: حذف ستون J-5 در طبقه همکف

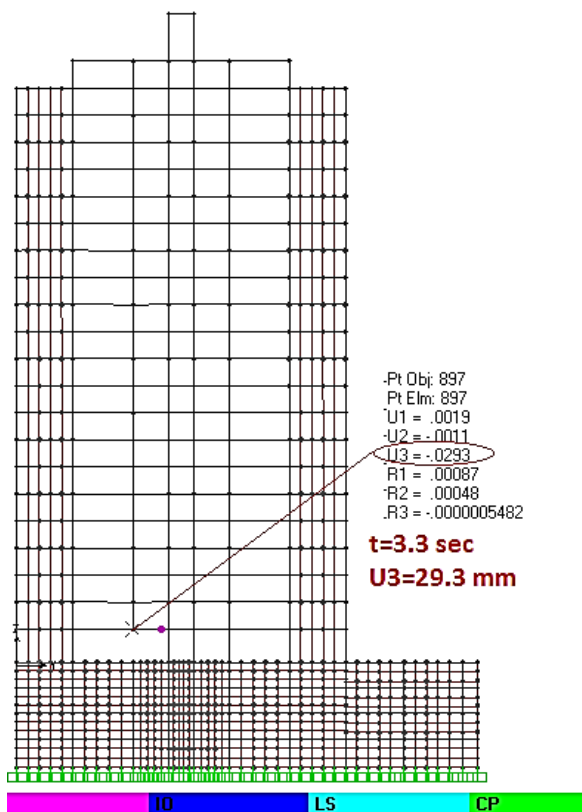
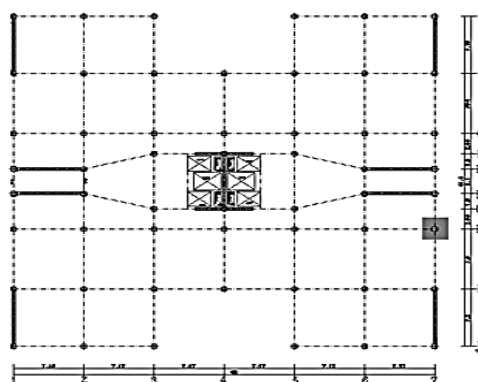
سناریوی ۵: حذف ستون I-5 در طبقه همکف

سناریوی ۶: حذف ستون I-4 در طبقه همکف

قائم جلوگیری نموده همچنین وظیفه انتقال نیروی ناشی از حذف عناصر باربر قائم، به ستون یا ستون‌های کناری را به‌خوبی انجام داده و باعث می‌گردند که میزان دوران المان‌های تیرهای متصل به گره مذکور با دوران‌های تعریف‌شده در تعریف سطوح عملکرد مفاصل پلاستیک فاصله داشته باشد.

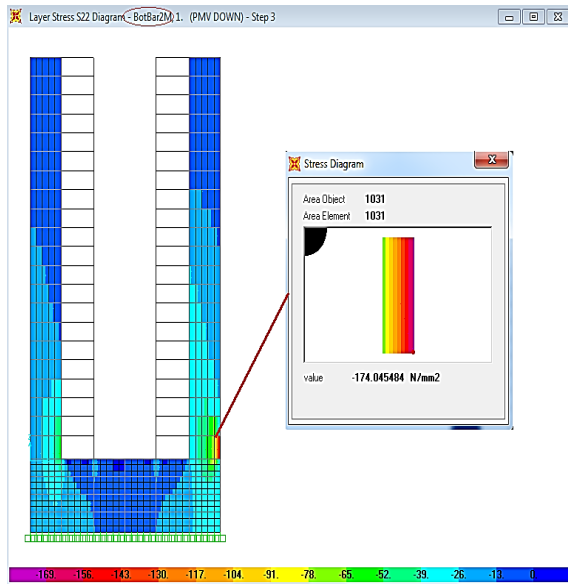
### سناریوی سوم: حذف ستون H-7 در طبقه همکف

حالت دیگر، حذف ناگهانی عناصر قائم، حذف ستون H-7 طبقه همکف است. شکل (۱۸) جابجایی قائم محل حذف ستون را در مدل پوسته چند لایه نشان می‌دهد.



شکل (۱۸): جابجایی قائم محل حذف ستون در مدل پوسته چندلایه.

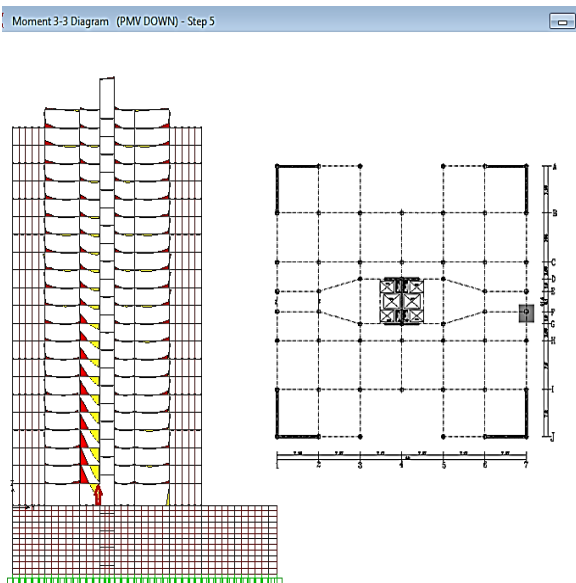




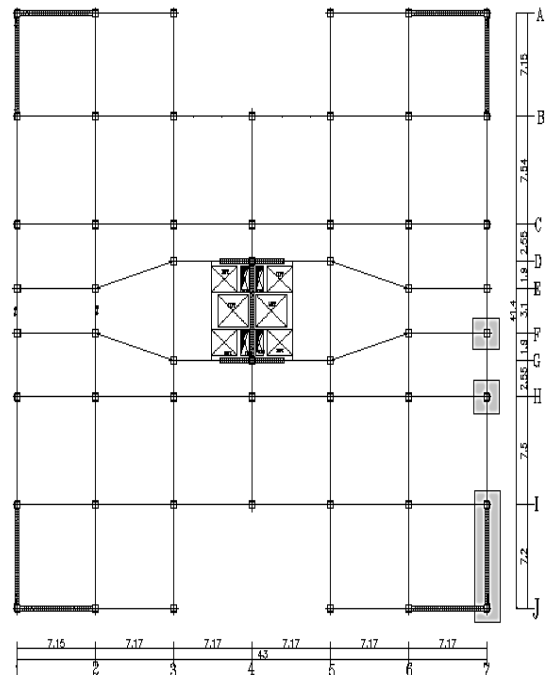
شکل (۲۱): حذف دو ستون J-7، I-7 و دیوار برشی II-7.

**سناریوی دوم: بررسی حذف ستون F-7 از طبقه همکف**

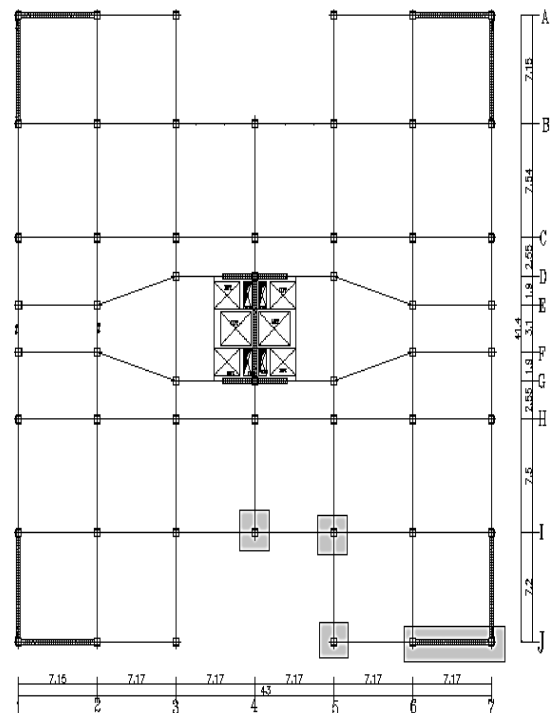
با وجود تغییر محل دیوار برشی بتنی پشت ستون F-7، به دلیل دهانه نسبتاً کمتر تیرهای رابط بین این ستون و ستون مجاور، مسیر انتقال نیرو به ستون کناری به خوبی فراهم شده و سازه توانسته در مقابل حذف ناگهانی این عضو مقاومت خوبی داشته باشد. شکل (۲۲) دیاگرام ممان خمشی در اجزای سازه حول محور  $y$  و شکل (۲۳) منحنی تغییرات مقدار ممان خمشی در تیر واصل بین ستون حذف شده و ستون کناری آن را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۲۴) منحنی تغییرات نیروی محوری در ستون کناری ستون F-7 را نشان می‌دهد.



شکل (۲۲): دیاگرام لنگر خمشی  $M_y$  قاب.



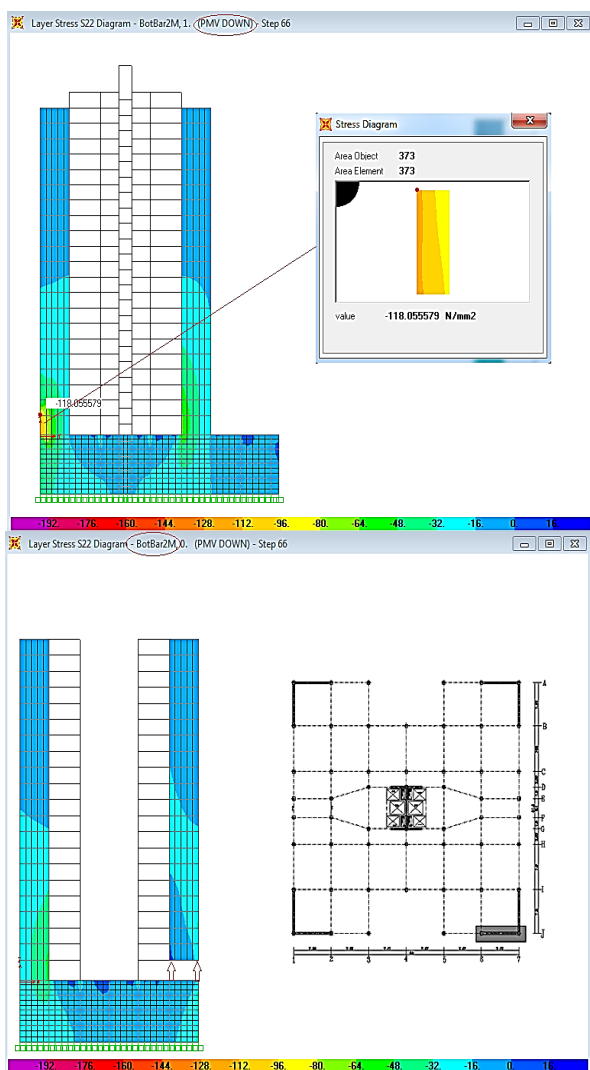
شکل (۱۹): حذف اعضای باربر قائم با وقوع رخداد ۱



شکل (۲۰): حذف اعضای باربر قائم با وقوع رخداد ۲.

**سناریوی اول: حذف دو ستون J-7، I-7 و دیوار (J-I)**

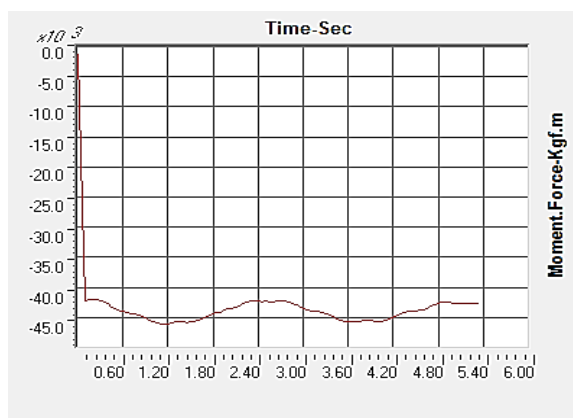
همان‌طور که در شکل (۲۱) مشاهده می‌گردد، سازه در خصوص این سناریوی حذف مقاوم بوده و تنش‌های لایه‌های مختلف دیوار متعامد با دیوار حذف شده نیز در بحرانی‌ترین المان سطح دیوار (المان ۱۰۳۱) متوسط تنش حدود ۱۱۰ مگاپاسگال را تجربه می‌کند که با تنش‌های حد تسلیم، فاصله زیادی دارد.



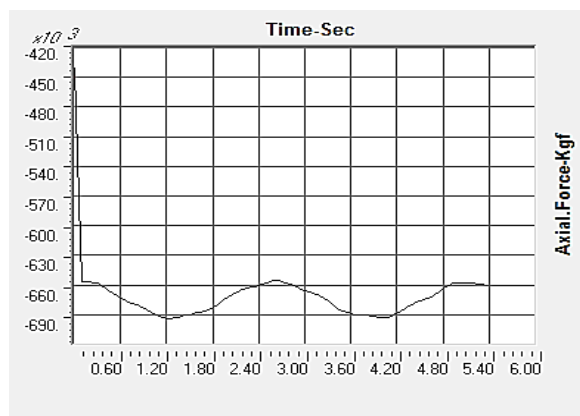
شکل (۲۵): تنش میلگردها با حذف دیوار برشی و ستون‌های مجاور.

#### سناریوی چهارم: حذف ستون J-5

همان‌طور که در اشکال (۲۶ و ۲۷) مشاهده می‌گردد پس از تشکیل مفاصل پلاستیک در تنها، یک سمت از همه تیرهای متعامد کل طبقات، در این قسمت از سازه مکانیسم شکست ایجاد شده و دچار ناپایداری می‌گردد و از این پس سازه توانایی انتقال نیروی ناشی از حذف ستون به ستون‌های اطراف را نخواهد داشت. شکل‌ها نشان می‌دهند که پس از ایجاد ناپایداری در این قسمت از سازه، دوران در تیر به شدت زیاد و تیرها ظرفیت باربری خود را از دست خواهند داد و دیگر قادر به ادامه رفتار غیرخطی و شکل‌پذیری تعریف شده نخواهند بود. جهت حصول اطمینان از آنکه رفتار هیچ‌یک از ستون‌ها و دیوارهای برشی سازه وارد محدوده غیرخطی نمی‌گردد، در این مورد نیز تحلیل غیرخطی به هر دو روش پوسته چندلایه شکل (۲۶) و ستون معادل شکل (۲۷) انجام شده است. نتایج نشان از شباهت هر دو نوع تحلیل در خصوص سطوح عملکرد و جابجایی قائم گره متصل به ستون حذف شده را دارد.

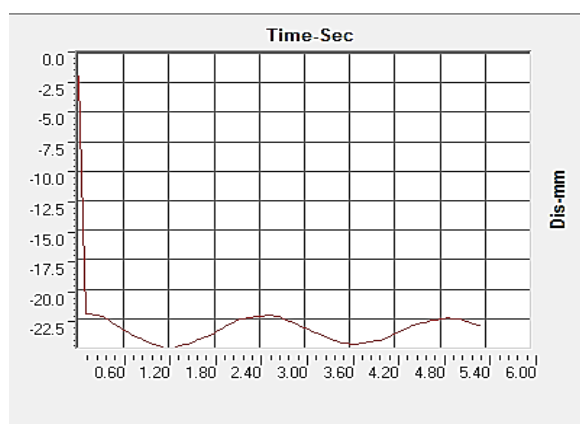


الف) تاریخچه لنگر خمشی  $M_y$  در تیر واصل بین دو ستون حذف شده و ستون کناری آن



ب) تاریخچه نیروی محوری ستون کناری حذف شده F-7

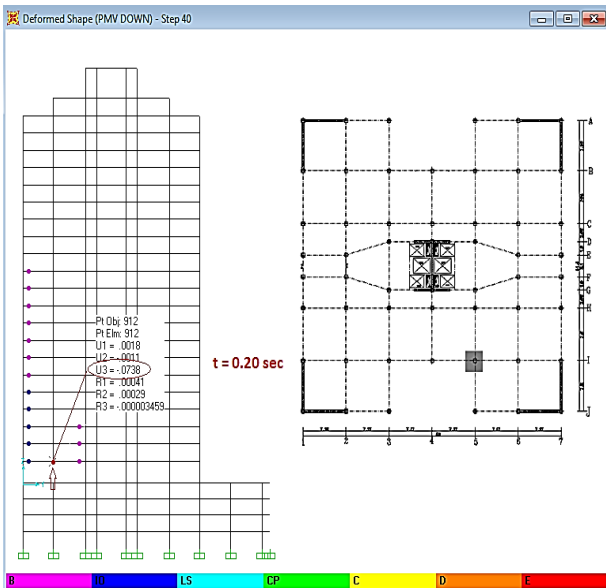
شکل (۲۳): تاریخچه لنگر و نیرو.



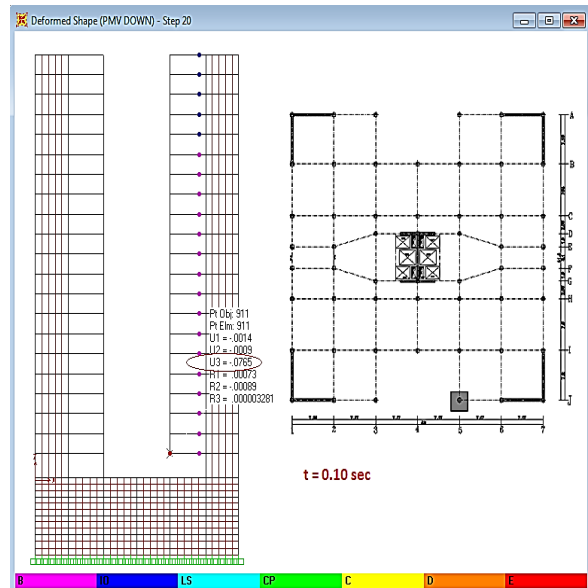
شکل (۲۴): تاریخچه جابجایی گره مربوط به ستون حذف شده F-7

#### سناریوی سوم: حذف دو ستون J-6 و J-7 و دیوار J/(6-7)

به دلیل وجود دیوار متعامد (J-I)/7، سازه در برابر حذف ناگهانی این عناصر مقاومت می‌کند. شکل (۲۵) گسترش تنش در لایه‌های میلگرد دیوار برشی رانشان می‌دهد.



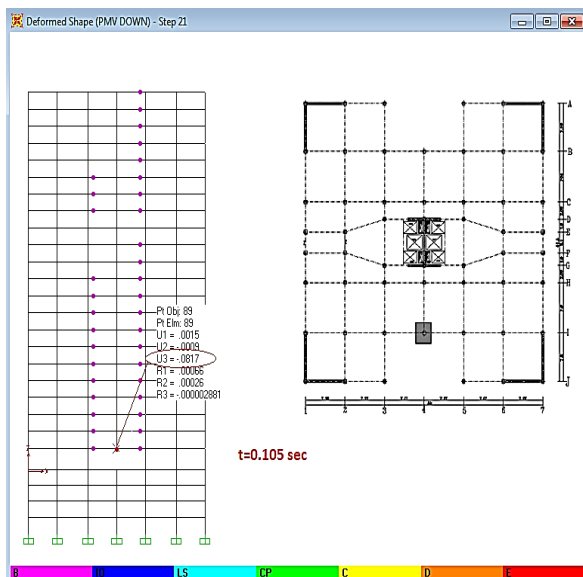
شکل (۲۸): حذف ستون I-5



شکل (۲۶): حذف ستون J-5 در مدل دیوار با پوسته چندلایه .

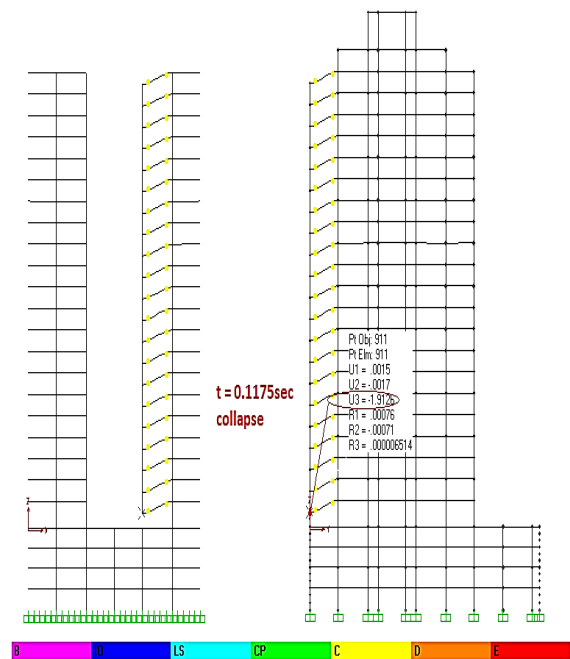
### سناریوی ششم: حذف ستون I-4، در طبقه همکف

در این مورد نیز مانند موارد حذف ستون‌های I-۴ و I-۵ که در قسمت‌های قبل بررسی گردید به دلیل ایجاد مکانیسم شکست در سازه به دلیل تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرهای متصل به گره مربوط به حذف ستون و در تمام طبقات سازه، این قسمت از سازه دچار ناپایداری شده و خرابی رخ می‌دهد. شکل (۲۹) پاسخ سازه در قبال حذف ستون باربر I-4 را نشان می‌دهند.



شکل (۲۹): حذف ستون I-4

در این زمان هنوز مفصل پلاستیک در تیرهای متصل به گره مربوط به حذف ستون در تمام طبقات تشکیل نگردیده و سازه پایدار است.



شکل (۲۷): حذف ستون J-5 در مدل دیوار با ستون معادل.

### سناریوی پنجم: حذف ستون I-5 در طبقه همکف

همان‌طور که در شکل (۲۸) مشاهده می‌گردد، پس از ایجاد مکانیسم شکست به این نحو که مفصل پلاستیک در هر چهار تیر متصل به گره حذف و در همه طبقات تشکیل گردد، سازه در این قسمت ناپایدار شده و دچار خرابی می‌گردد. در فاصله زمانی مابین  $t = 0/205 s$  و  $t = 0/2 s$  ناپایداری کلی ایجاد شده و سازه در این قسمت خراب می‌گردد.

## ۸- نتیجه گیری

(الف) در سناریوی حذف یک دیوار برشی و دو ستون اطراف آن، تغییر محل دیوارهای برشی باعث افزایش مقاومت سازه و عدم فروریزش آن در برابر خرابی پیش‌رونده گردید. برای مثال در سناریوی حذف همزمان دو ستون I-7، J-7 و دیوار برشی 7/(J-I) جابجایی گرهی نقاط بالای محل حذف تا ۲۰ درصد کاهش یافت.

(ب) در سناریوی حذف ستون‌های گوشه و میانی که در کنار دیوار برشی بتنی قرار نگرفته‌اند، مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده به طول دهانه تیرهای متصل به ستون حذف شده و مقاطع اختصاص یافته به آن‌ها بستگی دارد. برای نمونه مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده در خصوص حذف ستون‌های H-7 و F-7 مناسب و در خصوص حذف بقیه موارد حذف که البته در رخداد دوم بررسی گردید با افزایش جابجایی گره ها تا ۲۵ درصد نامناسب است. بنابراین در خصوص حذف ستون‌های میانی و گوشه که در کنار دیوار برشی بتنی واقع نگردیده‌اند، بایستی تحلیل تاریخچه زمانی پدیده حذف و بررسی نتایج، به دقت بررسی گردد

(ج) سازه دوگانه قاب خمشی فولادی ویژه و دیوار برشی بتنی ویژه مورد مطالعه، در برابر حذف یک ستون کنار دیوار برشی تا ۵۰ درصد و حتی حذف یک ستون و تمام سطح دیوار برشی کنار ستون در طبقه همکف تا ۳۰ درصد نسبت به سناریوی حذف یک دیوار و دو ستون مجاور کاهش جابجایی گرهی داشته و جهت مقابله با خرابی پیش‌رونده مقاوم بود. در واقع به دلیل آن که مسیر انتقال بار ستون حذف شده به ستون یا ستون‌های کناری، دیوار باقیمانده در طبقات فوقانی بوده و نه تیرهایی که امکان انتقال بار را ندارند، سازه در قبال این نوع موارد حذف مقاوم هست.

(د) چون سازه مورد مطالعه در برابر بار جانبی زلزله طراحی گردیده بود و مکانیسم غالب در طرح لرزه‌ای، ستون قوی و تیر ضعیف است، بنابراین مقاطع طراحی شده ستون این گونه سازه‌ها مناسب تحمل اضافه بار ناشی از انتقال بار ستون حذف شده هستند و تغییر شکل‌های آن‌ها با تغییر شکل‌های تعریف شده در سطوح عملکرد ایمنی جانی، فاصله اطمینان بخشی دارد. در واقع می‌توان گفت که در این سازه‌ها و در خرابی پیش‌رونده، ستون‌ها و دیوارهای برشی وارد محدوده رفتار غیرخطی نخواهند شد.

## ۹- مراجع

- [1] Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings," Standard No. 2800, 4<sup>th</sup> Edition, 2015. (In Persian)
- [2] Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), "Passive Defense," 21<sup>th</sup> Section, 2017. (In Persian)
- [3] S. Sh. Emamzadeh and A. Heravi, "Retrofitting of Masonry Walls with Reinforced Shotcrete under Blast Load," *Passive Defense Quarterly*, vol. 10, no. 2, pp. 61-72, Summer 2019. (In Persian)
- [4] A. Esmaeli and S. Sh. Emamzadeh, "The Study of CFRP Sheet Arrangement in Reinforcing Unarmed Masonry Walls Against Blast Load," *Passive Defense Quarterly*, vol. 5, no. 4, pp. 1-7, Summer 2015. (In Persian).
- [5] J. Kim and T. Kim, "Assessment of Progressive Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames," *Journal of Constructional Steel Research*, no. 65, pp. 169-179, 2009.
- [6] T. Kim, J. Kim, and J. Park, "Investigation of Progressive Collapse-Resisting Capability of Steel Moment Frames Using Push-Down Analysis," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, vol. 23, no. 5, pp. 327-335, 2009.
- [7] Sh. Jalili gheslgh, M. Sheydaee, and R. Bahraminejad, "Progressive Collapse analysis in Steel Frames Equipped with Steel Shear Walls," *Third National Conference on Structural and Steel*, 2012.
- [8] Y. Fahjan, J. Kubin, and M. Tan, "Nonlinear Analysis Methods for Reinforced Concrete Buildings with Shear Walls," *14th European Conference on Earthquake Engineering*, 2010.
- [9] GSA, "Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance," *US General Service Administration*, 2016.
- [10] Unified Facilities Criteria (UFC), "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse," *Department of Defense*, Change 3, 2016.
- [11] A. McKay-Matt and G. Marchand, "Non-Linear Dynamic Alternate Path Analysis for Progressive Collapse: Detailed Procedures Using UFC 4-023-03," 2009.
- [12] ASCE 41-17, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings," *American Society of Civil Engineer*, 2017.
- [13] FEMA 356, "Prestandard And Commentary for The Sismic Rehabilitation of Buildings," *Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- [14] R. Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 114(8), pp. 1804-1825, 1988.

---

## Progressive Collapse Analysis of Dual System “Special Moment Steel Frame with Special Concrete Shear Wall”

S. Sh. Emamzadeh<sup>\*</sup>, A. Arbab NoushAbadi

### Abstract

One of the approaches to passive defense is to protect important buildings against progressive collapse. Progressive collapse is a phenomenon that happens in a building due to the removal of some structural members. In this research, the progressive collapse of a 26 story residential building in Tehran was studied by the alternative load path (ALP) method according to UFC 4-023-03. Several independent column and shear wall removal scenarios were adopted from the first floor. Nonlinear dynamic analysis was performed with SAP2000 software according to UFC to evaluate the bridging ability of the building on the remained members. Plastic joints in beams and columns were defined in special moment frames according to the instructions ASCE41-17 and FEMA356. Also, the shear walls were modeled by the multi-layer shells method and the mid column equivalent method. The results showed that correct relocation of the shear walls in a dual system within building guidelines leads to appropriate resistance to progressive collapse.

**Key Words:** *Passive Defense, Concrete Shear Wall, Progressive Collapse, Tall Buildings, Dual System*

---

<sup>\*</sup> Department of Electrical Engineering, Aeronautical University, (shemamzadeh@khu.ac.ir)- Writer-in-Charge