

## معرفی یک روش بهینه برای مدلسازی ماکروی تحلیل دینامیکی غیرخطی در خرابی پیش‌رونده (مطالعه موردی نرم افزار OpenSees)

حمیدرضا اشرفی<sup>۱\*</sup>، سیدعلی حسن‌زاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### چکیده

انجام بهینه تحلیل دینامیکی غیرخطی در خرابی پیش‌رونده یکی از مسائل بسیار مهمی است که تاکنون به آن پرداخته نشده است. در تحلیل خرابی پیش‌رونده استفاده از نرم‌افزارهای میکرومدل مانند ABAQUS و ANSYS با وجود دقت بالا در محاسبات، از سرعت کافی برخوردار نیستند و به همین دلیل در کارهای تحقیقاتی بیش‌تر از نرم‌افزارهای ماکروی مانند OpenSees استفاده می‌شود. در این تحقیق نویسندگان این مقاله تلاش کرده‌اند که روشی کارآمد و مناسب را برای حذف المان در نرم‌افزار کدباز OpenSees معرفی کنند. از آنجایی که تحلیل دینامیکی غیرخطی بهترین رفتار از سازه را نشان می‌دهد؛ در این مطالعه این روش برای تحلیل دینامیکی غیرخطی توسعه داده شده است. برای این منظور الگوریتم توسعه داده شده در این مقاله با سایر روش‌های موجود مقایسه شده است و دقت بالای آن نمایش داده شده است. در روش توسعه داده شده می‌توان دو یا چند ستون را به صورت همزمان و یا غیرهمزمان از مدل موردنظر حذف کرد و اثرات مربوط به زمان حذف‌های متوالی چند ستون را در آن مشاهده نمود. کاربرد روش گفته شده برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته (NIDA) استفاده شده است و کاربرد آن برای ظرفیت نهایی سازه نشان داده شده است. استفاده از روش ارائه شده در این مطالعه باعث بالا رفتن سرعت و دقت محاسبات در حذف چند ستون بصورت غیرهمزمان و همچنین ظرفیت نهایی سازه با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته می‌شود. در پایان نیز کاربرد این روش برای حذف سایر المان‌های سازه‌ای نظیر تیرها، مهاربندها و میانقاب‌آجری نیز بیان شده است.

کلمات کلیدی: خرابی پیش‌رونده، تحلیل دینامیکی غیرخطی، حذف المان، نرم افزار OpenSees، مسیر جایگزین بار.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال
۱۳۹۶/۱۰/۱۷	۱۳۹۷/۰۲/۰۹	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	10.22065/jsce.2018.113761.1425

\*نویسنده مسئول:

حمیدرضا اشرفی

h.r.ashrafi@razi.ac.ir

پست الکترونیکی:

# Introducing an optimal method for macro modeling of nonlinear dynamic analysis in progressive collapse (A case study : OpenSees program)

Hamid Reza Ashrafi<sup>1\*</sup>, Seyed Ali Hassanzadeh<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran  
2- M.Sc. of Civil Engineering, Dept. of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

## ABSTRACT

Optimum implementation of nonlinear dynamic analysis (NDA) in progressive collapse is one of the most important issues that has not been addressed recently. Using detailed FE software like ABAQUS and ANSYS in progressive collapse analysis despite their accuracy is not appropriate because of consuming a lot of time. For this reason, many of researchers utilize the macro software such as OpenSees. In this study, authors tried to introduce an optimum and appropriate method for element removal in open program, OpenSees. Since nonlinear dynamic analysis shows the exact behavior of structure, this algorithm is developed for NDA. For this purpose, the developed algorithm has been compared with the other methods and it has been found that it has a high accuracy. Developed algorithm can remove one or more columns at the same or different time intervals and the effects of sequence column removals to their time durations can be seen. The application of the developed algorithm for nonlinear incremental dynamic analysis (NIDA) has been implemented and its application for an ultimate capacity of the structure has been shown. Analysis results showed that using of developed algorithm will lead to the speed and accuracy improvement of calculations in the sequence of columns removal and ultimate capacity of the structure using NIDA. At the end of this research, the application of this method has been shown for other element removal such as beams and infill walls.

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 07 January 2018  
**Revise Date:** 29 April 2018  
**Accept Date:** 12 July 2018

## Keywords:

Progressive collapse  
Nonlinear dynamic analysis  
Remove element  
OpenSees program  
Alternate path method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.113761.1425

\*Corresponding author: Hamid Reza Ashrafi.  
Email address: h.r.ashrafi@razi.ac.ir

## ۱- مقدمه

خرابی پیش‌رونده به یک خرابی موضعی یا محلی در سازه اطلاق می‌شود؛ به طوری که این خرابی محلی موجب خرابی کل سازه و یا بخش قابل توجهی از سازه شود. برای ارزیابی پتانسیل فروریزش سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده یا باید سازه را به صورت مستقیم در برابر بار غیرعادی موردنظر مانند انفجار، زلزله، آتش‌سوزی و غیره مورد ارزیابی قرار دهند یا از روش آیین‌نامه‌ای برای این منظور استفاده نمود. ارزیابی یک سازه تنها برای یک نوع بار خاص نمی‌تواند مقرون به صرفه باشد؛ از جهتی هم ارزیابی یک سازه برای تمامی بارهای غیرعادی بسیار وقت‌گیر است. برای ارزیابی فروریزش یک سازه در برابر خرابی پیش‌رونده راهنماهای GSA [۱] و DoD [۲] پیشنهاد می‌کنند که از روش مسیرجایگزین بار (APM) برای این منظور استفاده شود. در روش مسیر جایگزین بار یک ستون از سازه بصورت ناگهانی حذف می‌شود و مقاومت سازه در برابر این حذف ناگهانی ستون سنجیده می‌شود. در این روش یک ستون در مدت زمان کمتر از یک دهم ارتعاش قائم دهانه‌های بالایی ستون محذوف، حذف می‌شود تا حذف ستون به صورت ناگهانی مدل شود. این روش مستقل از نوع حادثه است و به همین دلیل می‌تواند برای ارزیابی تمام سازه‌های ساختمانی در برابر تمام حوادث غیرعادی مناسب باشد. از جهت دیگر این روش معایبی هم دارد و این معایب شامل تقریبی بودن روش، برای بارهای غیرعادی می‌باشد.

بررسی بروز خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها در سه دهه اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. با رشد علم کامپیوتر و توسعه نرم‌افزارهای مهندسی سازه از یک طرف و بالا بودن هزینه‌های مربوط به انجام مطالعات آزمایشگاهی از طرف دیگر، امروزه بسیاری از تحقیقات مربوط به خرابی پیش‌رونده با استفاده از روش‌های عددی صورت می‌گیرد. نرم‌افزارهای مورد استفاده در تحلیل خرابی پیش‌رونده به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: الف) نرم‌افزارهای میکرو مدل: این نرم‌افزارها دارای دقت بسیار بالایی هستند و به صورتی کاملاً دقیق سازه را تحت بررسی قرار می‌دهند. از معایب این نرم‌افزارها می‌توان به پیچیدگی در مدلسازی آن‌ها اشاره کرد. مهم‌ترین عیب نرم‌افزارهای میکرومدل به سرعت پایین آن‌ها بازمی‌گردد؛ بطوریکه اگر حجم المان‌های سازه از مقدار مشخصی فراتر رود؛ مدت زمان لازم برای انجام تحلیل در یک کامپیوتر معمولی بسیار زیاد خواهد شد و عملاً کارایی خود را از دست خواهد داد. نرم‌افزارهای ABAQUS، ANSYS و LS-DYNA در این دسته از نرم‌افزارها جای می‌گیرند. ب) نرم‌افزارهای ماکرومدل: این نرم‌افزارها همانطور که از نامشان پیداست دقت نرم‌افزارهای میکرومدل را ندارند و سازه را در حالت کلی‌تر مدل می‌کنند. در این نرم‌افزارها مدل کردن المان‌های سازه‌ای آسان‌تر از نرم‌افزارهای میکرومدل است و زمان لازم برای انجام تحلیل غیرخطی نیز بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از نرم‌افزارهای میکرومدل است. نرم‌افزارهای SAP2000، ETABS، PERFORM3D و OpenSees در این دسته جای می‌گیرند. تاکنون تحقیقاتی پیرامون مدلسازی میکرو و ماکرو پیرامون خرابی پیش‌رونده انجام گرفته است که در این میان الشکر و همکاران [۳] با بررسی یک ساختمان ده طبقه فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده پرداختند. در این مطالعه، ایشان ساختمان موردنظر را در سطوح میکرو تا ماکرو مدلسازی کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که اختلاف دو حالت ناچیز بوده و قابل اغماض است. بائو و همکاران نیز به بررسی نقش اتصالات در قاب‌های بتن‌آرمه در برابر خرابی پیش‌رونده پرداختند و برای این منظور از یک مدل آزمایشگاهی و دو مدل عددی استفاده کردند. در مدل‌های عددی، یکی از مدل‌ها به صورت میکرو با نرم‌افزار LS-DYNA و دیگری به صورت ماکرو در نرم‌افزار OpenSees مدلسازی شدند؛ در پایان ایشان به این نتیجه رسیدند که نتایج تمامی مدل‌ها به هم بسیار نزدیک است و مدل‌های میکرو و ماکرو نزدیکی بالایی به هم دارند [۴-۵]. تحقیقاتی مانند آنچه بیان شد باعث شده است که امروزه بیش‌تر تحقیقات انجام شده پیرامون خرابی پیش‌رونده با استفاده از نرم‌افزارهای ماکروی صورت گیرند زیرا این نرم‌افزارها برای تحلیل خرابی پیش‌رونده از دقت بالایی برخوردار هستند.

مطابق راهنماهای GSA و DoD می‌توان از تحلیل‌های استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی برای بررسی خرابی پیش‌رونده در روش مسیر جایگزین بار استفاده نمود. اما در هر حال باید به خاطر داشت چون از یک سو اعضای موردنظر بصورت ناگهانی حذف می‌شوند و از سوی دیگر سازه وارد ناحیه غیرارتجاعی می‌شود؛ دقت تحلیل دینامیکی غیرخطی بهتر از سایر تحلیل‌ها می‌باشد [۶-۷]. مطابق راهنماهای GSA و DoD در روش مسیرجایگزین بار تنها از حذف یک ستون و در یک تحلیل برای بررسی خرابی

پیش‌رونده استفاده شده است و این در حالی است که در واقعیت خرابی پیش‌رونده با حذف بیش از یک ستون همراه است [۸]. علاوه بر موارد فوق، ممکن است که عامل اساسی خرابی اولیه فقط ستون نباشد و تیرها نیز همراه با ستون دچار فروریزش شود که در تحقیق هاشمی و همکاران به این مقوله پرداخته شده است [۹]. در برخی از تحقیقات گذشته نیز به بررسی حذف بیش از یک ستون در یک ساختمان پرداخته شده است که در این میان می‌توان به ساسانی اشاره داشت که به بررسی یک ساختمان بتن آرمه ۶ طبقه با میانقاب در برابر حذف ناگهانی دو ستون پرداخت [۱۰]. سونگ و سزن نیز به بررسی حذف چهار ستون در یک ساختمان فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده پرداختند و فهمیدند که اغلب سازه‌ها دارای مقاومت بیش‌تری هستند و احتمال فروریزش سازه در تنها حذف یک ستون پایین است [۱۱]. لالکوسکی و استاروسک به بررسی حذف چند ستون در در طبقه همکف پرداختند و با استفاده از مدل‌های ساده شده این تأثیر را بیان کردند [۱۲]. لی و همکاران نیز به بررسی حذف ستون‌ها در طبقات مختلف با استفاده از تحلیل پوش‌داون پرداختند و در نهایت توانستند عوامل ایجاد واکنش‌های قاب ویرندل و همچنین تأثیر لرزه‌ای را بر روی مقاومت ساختمان در سناریوهای حذف ستون پیدا کنند [۱۳]. عرشیان و مورگنتال به بررسی حذف غیرهمزمان دو ستون در یک ساختمان بتن آرمه با تیرهای تقویت شده پرداختند. در این تحقیق ایشان برای حذف غیرهمزمان دو ستون از روش حذف نیروهای مقاوم ستون یا واکنش‌های ستون برای این منظور استفاده کردند [۱۴].

در این تحقیق به ارائه یک روش کارآمد برای حذف المان‌های یک سازه در نرم‌افزار OpenSees برای حذف یک یا چند المان بصورت همزمان یا غیرهمزمان در تحلیل دینامیکی غیرخطی پرداخته شده است. در ادامه کاربرد این روش برای تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش‌دهنده توضیح داده شده است. با استفاده از این روش در تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش‌دهنده می‌توان برای هر کدام از سناریوها، ظرفیت واقعی سازه را بدست آورد. در پایان نیز نشان داده می‌شود که با روش توسعه داده شده می‌توان خرابی پیش‌رونده را بصورت مرحله به مرحله به نرم‌افزار معرفی کرد تا بتوان یک رفتار کاملاً واقعی از سازه را شاهد بود. استفاده از این روش توسعه یافته علاوه بر افزایش بسیار قابل ملاحظه در سرعت باعث افزایش دقت محاسبات نرم‌افزاری و همچنین واقعی شدن مدل نیز منجر می‌شود.

## ۲- صحت سنجی

نویسندگان این مقاله در مرجع [۱۵] صحت سنجی مربوط به حذف ناگهانی ستون در یک قاب خمشی فولادی را با تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام داده‌اند که در آن نتایجی نزدیک با نتایج سایر پژوهشگران داشته‌اند. از خوانندگان محترم تقاضا می‌شود به مرجع مذکور برای اطلاع از جزئیات بیش‌تر مراجعه نمایند.

## ۳- معرفی الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق

### ۳-۱- کلیات الگوریتم حاضر

در این مطالعه برای حذف المان، به جای حذف واکنش‌های نیرویی، از حذف خود المان برای این منظور استفاده شده است. برای این منظور از دستور حذف<sup>۱</sup> در نرم‌افزار OpenSees و الگوریتم‌های داده شده در این تحقیق استفاده شده است. باید توجه داشت که استفاده از این دستور به خودی خود در تحلیل دینامیکی غیرخطی قابل استفاده نیست و باید تمهیداتی خاصی را برای این منظور اعمال نمود. دستور حذف المان<sup>۲</sup> برای اولین بار توسط طلعت و مسلم به منظور بررسی خرابی پیش‌رونده‌های سازه‌های بتن آرمه تحت زلزله تهیه گردید [۱۶]. با وجود این دستور در نرم‌افزار OpenSees، بسیاری از محققین به جای حذف المان از حذف واکنش‌های ستون استفاده می‌کنند زیرا بعضی از این محققین الگوریتم مورد استفاده را برای روش مسیر جایگزین بار نتوانسته‌اند به خوبی بکار ببرند و برخی دیگر نیز به دلایل دیگر مانند عدم اطمینان به آن از آن استفاده نکرده‌اند زیرا این روش برای خرابی پیش‌رونده در برابر زلزله مناسب دانسته‌اند و برای روش

<sup>۱</sup> Remove command

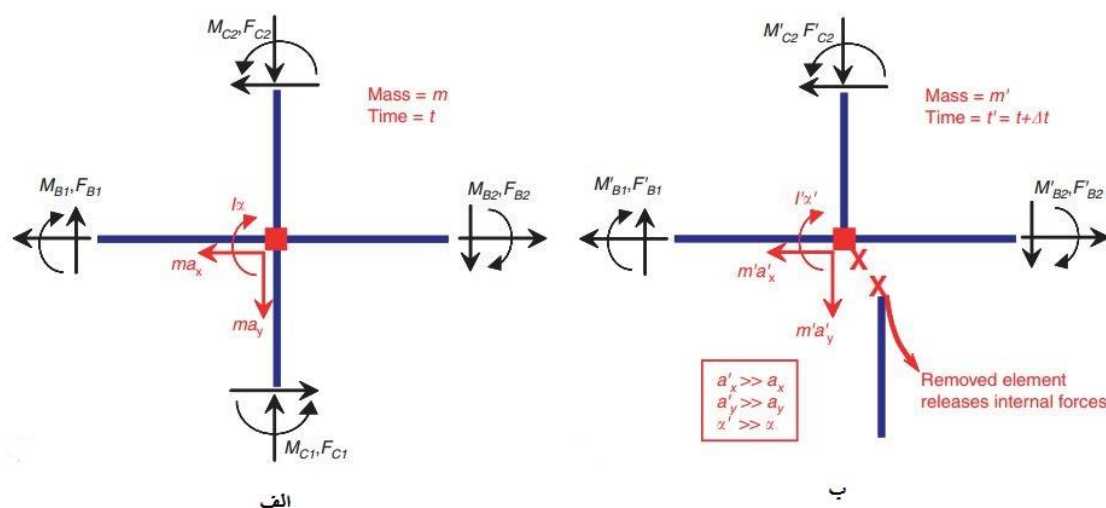
<sup>۲</sup> Remove element command

مسیر جایگزین بار فاقد کاربرد دانسته‌اند. در این بخش الگوریتم توسعه داده شده برای حذف المان یا المان‌های مورد نظر معرفی شده است و به تشریح مزایای آن پرداخته شده است. استفاده از این الگوریتم در روش مسیر جایگزین بار نسبت به روش‌های انجام شده در سایر مطالعات از دو مزیت مهم برخوردار است:

۱- بالا رفتن سرعت تحلیل (علی‌الخصوص برای حذف بیش از یک سناریوی حذف ستون یا تحلیل افزایش دینامیکی غیر خطی)

۲- افزایش دقت در حذف ستون‌ها به دلیل حذف مستقیم ستون به جای حذف واکنش‌های مورد نظر.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود؛ گره در لحظه  $t$  در حالت تعادل قرار دارد و در لحظه  $t' = t + \Delta t$  ستون از گره حذف می‌گردد. توجه شود که  $\Delta t$  بیانگر گام‌های زمانی تحلیل می‌باشد زیرا فرض بر آن است که ستون در یک گام زمانی از سازه حذف می‌شود. بعد از حذف ستون، شتاب‌های گره به مقادیر  $\alpha'_x$ ،  $\alpha'_y$  و  $\alpha'$  افزایش پیدا می‌کنند. لازم به یادآوری است که مقادیر شتاب ثانویه نسبت به مقادیر شتاب قبل از حذف ستون به صورت قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشند. در اثر شتاب به وجود آمده، نیروهای مقاوم در المان‌های وصل شده به گره تغییر می‌یابد.



شکل ۱: تعادل دینامیکی مربوط به گره وصل شده به المان محذوف (الف) سازه قبل از حذف المان (ب) سازه بعد از حذف المان [۱۶].

در اثر تغییر نیروی مقاوم در المان‌های اطراف گره، نیروی مقاوم سایر المان‌های سازه‌ای نیز تغییر پیدا می‌کند. مکانیزم کلی حذف المان مطابق رابطه (۱) است.

$$P_{ex} + \sum \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ I\alpha \end{Bmatrix} = P'_{ex} + \sum \begin{Bmatrix} F'_x \\ F'_y \\ M' \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} m'a_x \\ m'a_y \\ I'\alpha' \end{Bmatrix} \quad (1)$$

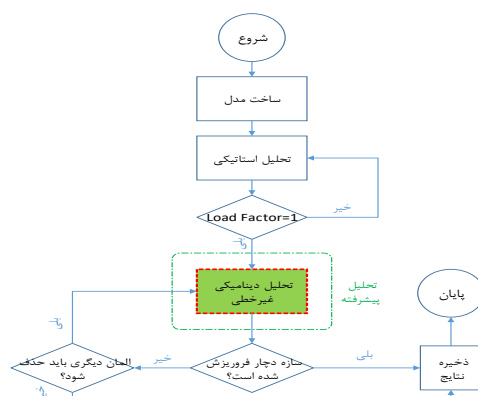
در رابطه (۱)،  $P_{ex}$  و  $P'_{ex}$  نیروی خارجی وارد بر گره قبل و بعد از حذف ستون می‌باشد. بردارهای  $\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{Bmatrix}$  و  $\begin{Bmatrix} F'_x \\ F'_y \\ M' \end{Bmatrix}$  مربوط به بردار

نیروی مقاوم المان‌های متصل به گره در قبل و بعد از حذف ستون می‌باشد. بردارهای  $\begin{Bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ I\alpha \end{Bmatrix}$  و  $\begin{Bmatrix} m'a_x \\ m'a_y \\ I'\alpha' \end{Bmatrix}$  نیز به ترتیب بیانگر نیروهای

اینرسی گره موردنظر در قبل و بعد از حذف ستون می‌باشد. در این الگوریتم اگر سازه پس از حذف المان دچار خرابی نشود؛ المان بعدی می‌تواند حذف شود و این کار تا المان  $n$ م دلخواه می‌تواند ادامه داشته باشد. باید توجه داشت که در واقعیت ممکن است علاوه بر حذف ستون یا ستون‌ها، برخی از تیرها نیز حذف شوند. در این الگوریتم بر خلاف تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است می‌توان سایر المان‌ها مانند تیرها، مهاربندها و همچنین میانقاب‌های آجری را نیز از سازه حذف نمود. نکته مهمی که باید بدان توجه داشت این است که قبل از حذف المان، باید بار و رکوردهای مربوط به المان موردنظر حذف شوند که این کار با استفاده از دستورات حذف بار<sup>۳</sup> و حذف رکورد<sup>۴</sup> به آسانی امکان پذیر است، برای جزئیات دقیق‌تر می‌توان به شکل ۵ مراجعه نمود و روند حذف یک المان را در تحلیل دینامیکی غیرخطی مشاهده نمود.

## ۲-۳- روش‌های انجام الگوریتم

برای ایجاد خرابی پیش‌رونده با استفاده از حذف ناگهانی ستون در تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌توان از دو روش استفاده کرد. در روش اول برای اعمال بار ثقلی از تحلیل استاتیکی استفاده می‌شود. در تحلیل استاتیکی با استفاده از روش بار کنترل<sup>۵</sup> بار ثقلی در ۱۰ گام به سازه وارد می‌شود و با دستور `loadConst-time 0.0` بار ثقلی بر روی سازه ثابت نگه داشته می‌شود و دامنه زمان نیز صفر می‌شود. در ادامه و پس از تحلیل استاتیکی از تحلیل تاریخچه زمانی به روش انتگرال مستقیم که همان تحلیل دینامیکی غیرخطی است برای حذف المان‌های موردنظر استفاده می‌شود. در شکل ۲ جزئیات مربوط به این الگوریتم ارائه شده است. جزئیات مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی (که در شکل ۲ با پس‌زمینه سبز رنگ نشان داده شده است) در شکل ۵ نشان داده شده است.



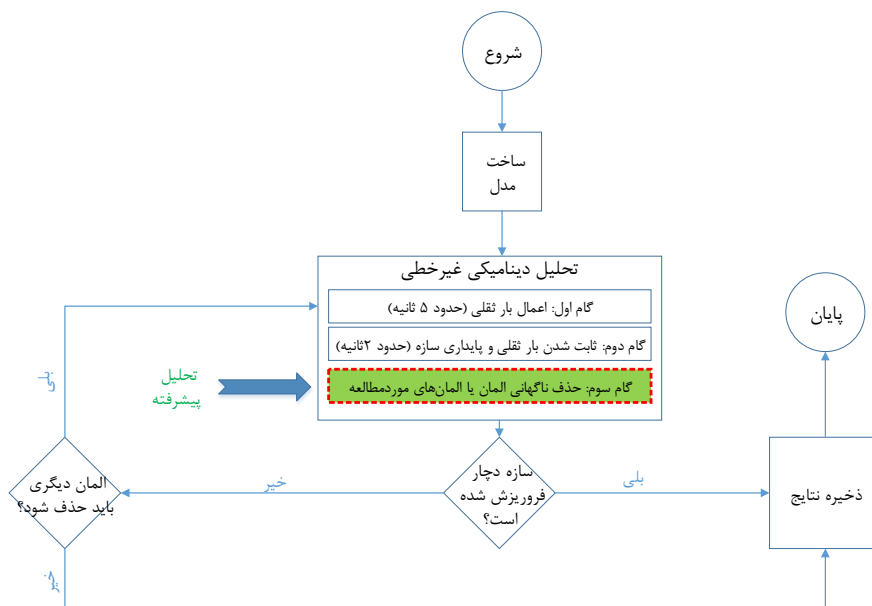
شکل ۲: الگوریتم مورداستفاده برای حذف یک یا چند المان با استفاده از دو تحلیل.

در روش دوم فقط از تحلیل تاریخچه زمانی به روش انتگرال مستقیم برای این منظور استفاده شده است. در این روش بارهای ثقلی باید در مدت زمان مناسبی مانند ۵ ثانیه به سازه وارد شوند تا این بارها به سازه ضربه وارد نکنند زیرا اگر بارهای ثقلی در زمان کمی مانند یک ثانیه به سازه وارد شوند؛ باعث ایجاد ضربه به سازه می‌شوند و نمی‌توان نتایج صحیحی را از نرم‌افزار استخراج کرد. بعد از گذشت زمان ۵ ثانیه، ۲ ثانیه نیز برای تعادل سازه و ثابت شدن بارها درنظر گرفته می‌شود و در نهایت ستون در ثانیه هفتم از سازه حذف می‌شود. در شکل ۳ جزئیات مربوط به این الگوریتم نشان داده شده است. جزئیات مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی (که در شکل ۳ با پس‌زمینه سبز رنگ نشان داده شده است) در شکل ۵ نشان داده شده است.

<sup>3</sup> Remove load command

<sup>4</sup> Remove recorder command

<sup>5</sup> Load control



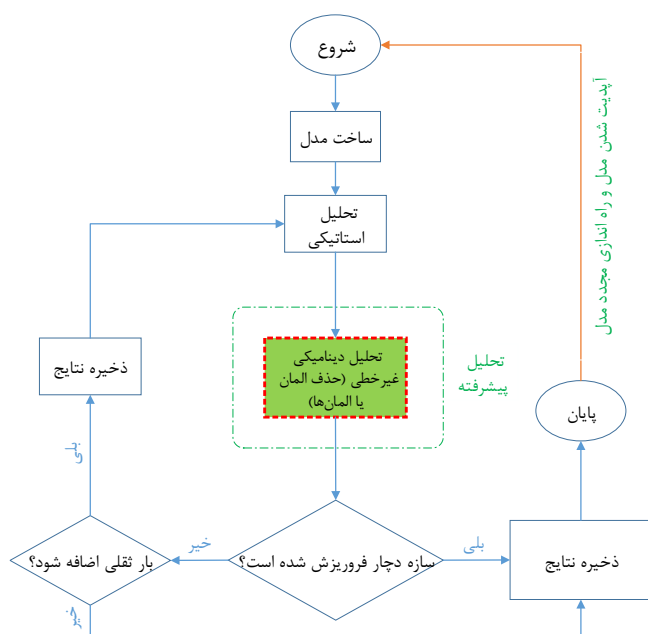
شکل ۳: الگوریتم مورد استفاده برای حذف یک یا چند ستون با استفاده از یک تحلیل.

باید یادآور شد که نتیجه دو روش کاملاً یکسان است اما استفاده از روش اول باعث افزایش سرعت در روند انجام تحلیل می‌شود؛ زیرا بار ثقلی سریع بر روی سازه ثابت می‌شود و بلافاصله بعد از آن تحلیل دینامیکی غیرخطی شروع می‌شود و المان یا المان‌های مورد نظر از سازه حذف می‌شوند. این در حالی است که در روش دوم، فقط ۵ ثانیه باید صرف وارد شدن بارهای ثقلی و دو ثانیه صرف ثابت شدن بارها و تعادل سازه شود. البته روش دوم مزیتی نیز نسبت به روش اول دارد و آن این است که محقق می‌تواند شاهد چگونگی اعمال بار ثقلی بر روی سازه و چگونگی پاسخ آن به حذف ستون باشد. در مجموع باید گفت که در حالتی که تعداد سناریوها کم باشد استفاده از هر دو روش تفاوت زیادی ندارد اما چنانچه تعداد سناریوها زیاد باشد یا از تحلیل افزایش دینامیکی غیرخطی استفاده شود؛ بهتر است برای کاهش زمان مورد نیاز از روش اول استفاده شود.

### ۳-۳- انجام تحلیل افزایش دینامیکی غیرخطی

یکی از موارد مهمی که در تحلیل سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده بسیار اهمیت دارد؛ بحث ظرفیت سازه است. تحلیل دینامیکی غیرخطی خود به تنهایی نمی‌تواند ظرفیت سازه را مشخص نماید و برای این منظور باید از تحلیل پوش داون یا تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته استفاده کرد. استفاده از روش تحلیل پوش داون می‌تواند ظرفیت سازه را بصورت کاملاً دقیق تا صدم اعشار تخمین بزند اما مهم‌ترین عیب این روش آن است که اثرات دینامیکی ناشی از حذف ستون را در نظر نمی‌گیرد. از طرف دیگر استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته می‌تواند ظرفیت سازه را با در نظر گرفتن اثرات دینامیکی آن لحاظ کند. تنها عیب این نوع تحلیل آن است دقت آن به دهم اعشار باز می‌گردد زیرا در کامپیوترهای معمولی چنانچه بخواهیم تا صدم اعشار تخمین بزنیم؛ زمان بسیار زیادی نیاز خواهد داشت [۱۷]. اگرچه دقت اعشاری تحلیل افزایش یافته غیرخطی کمتر از تحلیل پوش داون است اما این نوع تحلیل رفتار و ظرفیت سازه را بصورت کاملاً واقعی محاسبه می‌کند و نیازی به استفاده از برخی ضرائب آیین‌نامه‌ای برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی نیست. در این مطالعه برای انجام تحلیل افزایش دینامیکی غیرخطی ابتدا بار ثقلی به سازه وارد می‌شود و ستون مورد نظر حذف می‌شود؛ در صورتی که سازه تحت بار ثقلی و حذف ستون دچار خرابی نشود بار ثقلی به اندازه یک‌دهم به بار اولیه اضافه می‌شود و دوباره همان ستون حذف می‌شود. این فرآیند اضافه شدن بار و حذف شدن دوباره المان تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سازه دچار خرابی پیش‌رونده گردد. در شکل ۴ جزئیات مربوط به

الگوریتم مورد نیاز برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی نشان داده شده است. همچنین جزئیات مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی (که با پس زمینه سبز رنگ در شکل ۴ مشخص شده است) برای حذف المان‌ها در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴: الگوریتم مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی.

### ۴-۳- تنظیم پارامترهای تحلیل دینامیکی غیرخطی

برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی باید از تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش انتگرال مستقیم استفاده شود. نرم افزار OpenSees دارای پارامترهای متنوعی در تحلیل دینامیکی غیرخطی است. تنظیم پارامترهای تحلیل دینامیکی غیرخطی یکی از موارد مهمی است که باید برای جلوگیری از واگرایی در تحلیل انجام شود. در تحلیل دینامیکی غیرخطی از الگوریتم کرایلف نیوتن<sup>۶</sup> استفاده شده است. یکی از پیشرفت‌های مهمی که برای خرابی پیش‌رونده در نرم‌افزار OpenSees صورت گرفته است، اضافه نمودن الگوریتم کرایلف نیوتن برای همگرایی در تحلیل دینامیکی غیرخطی ناشی از تغییر شدید ماتریس سختی ناشی از حذف ناگهانی ستون می‌باشد. در این الگوریتم با انجام حداقل تعداد مربعات می‌تواند نتایج را خیلی زودتر از سایر الگوریتم‌های دیگر همگرا نماید [۱۸]. در این مطالعه از میرایی رایلی با نسبت میرایی ۰/۰۵ در مود اول ارتعاش استفاده شده است. برای حل انتگرال‌ها در هر گام زمانی از روش نیومارک استفاده شده است. یکی از موارد مهم در تحلیل دینامیکی غیرخطی در خرابی پیش‌رونده گام زمانی است. گام‌های زمانی علاوه بر مدت زمان هر پاسخ از سازه، مدت زمان حذف ستون را نیز در نظر می‌گیرند. مدت زمان حذف ستون مطابق GSA2013 باید کمتر از یک‌دهم زمان تناوب مربوط به ارتعاشات دهانه‌های قائم در بالای ستون محذوف باشد. باید در تنظیم پارامترهای تحلیل دینامیکی غیرخطی دقت نمود که اگر از روش صریح برای تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شده است، شرایط پایداری نیز برقرار باشد. باید گفت که در روش صریح<sup>۷</sup> باید شرایط پایداری<sup>۸</sup> با توجه به نوع الگوریتم، انتگرال‌گیر و همچنین گام‌های زمانی ارضا گردد اما این در حالی است که در روش ضمنی<sup>۹</sup> نیازی به ارضاء کردن شرایط پایداری وجود ندارد. توضیح بیشتر این دو روش خارج از حوصله این مقاله است و از خوانندگان محترم تقاضا می‌شود از منابع مناسبی مانند

<sup>۶</sup> KrylovNewton Algorithm

<sup>۷</sup> Explicit method

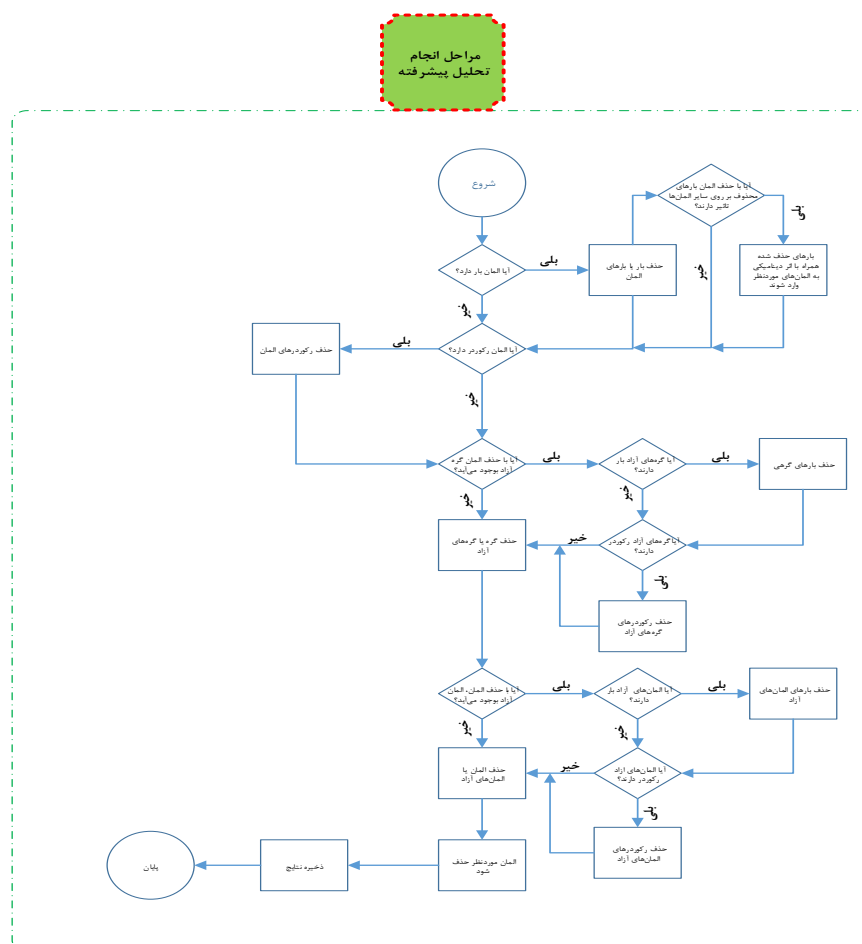
<sup>۸</sup> Stability conditions

<sup>۹</sup> Implicit method



مرجع [۱۹] استفاده شود. در این مطالعه گام‌های زمانی برابر ۰/۰۱ ثانیه منظور شده‌اند که این مقدار می‌تواند برای سازه‌های با تعداد طبقات متوسط مناسب باشد.

در شکل ۵ الگوریتم لازم برای تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش انتگرال مستقیم باید بصورت زیر باشد. لازم به یادآوری است که الگوریتم داده شده در شکل ۵ باید برای تحلیل دینامیکی غیرخطی الگوریتم شکل‌های ۲ تا ۴ بکار رود. همچنین باید توجه شود که در شکل ۵ باید تمام موارد بصورت موازی و در یک گام زمانی رخ دهند. به عنوان مثال اگر قرار باشد یک المان با بار حذف شود باید هم بار هم المان و هم رکوردهای آن در یک گام زمانی و در یک لحظه از زمان حذف شوند. چنانچه حذف بارها، رکوردها، گره‌های آزاد و المان در یک لحظه و بصورت همزمان رخ ندهد نرم‌افزار نمی‌تواند سازه را بصورت واقعی مدل نماید. علاوه بر فوق، چنانچه قبل از حذف المان بارهای وارد، رکوردهای المان و همچنین گره‌های آزاد مرتبط با آن حذف نشوند؛ حذف المان نمی‌تواند انجام شود.



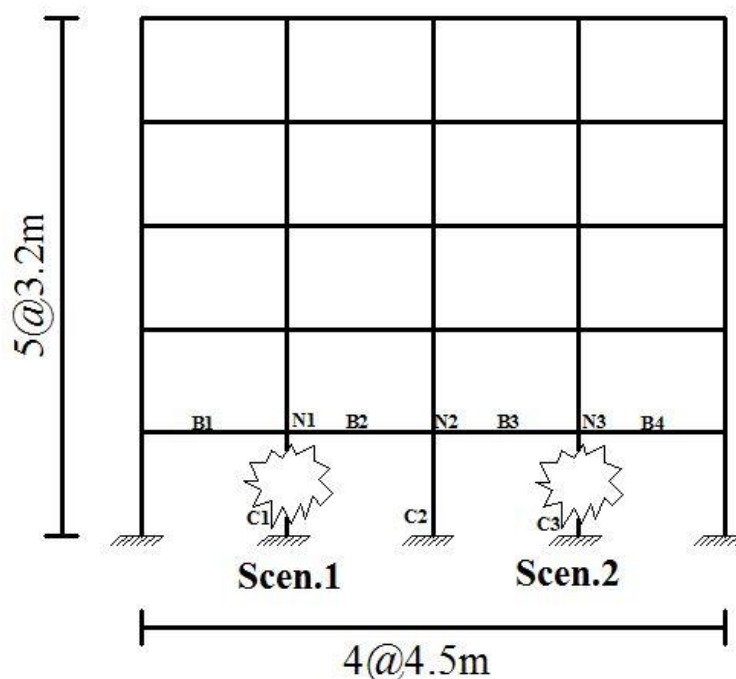
شکل ۵: الگوریتم مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی غیرخطی پیشرفته به روش انتگرال مستقیم برای حذف یک المان.

#### ۴- سازه مورد مطالعه

##### ۴-۱- کلیات قاب مورد مطالعه

در پژوهش حاضر برای نشان دادن کاربرد الگوریتم‌های توسعه داده شده، یک قاب بتن‌آرمه با تعداد ۵ طبقه از یک ساختمان بتن‌آرمه با سیستم قاب خمشی متوسط، انتخاب شده است. ارتفاع هر طبقه در قاب مذکور، ۳/۲ متر و طول دهانه‌ها برابر ۴/۵ متر منظور

شده است. قاب مورد مطالعه همراه با سناریوهای حذف ستون در شکل ۶ نشان داده شده است. بار مرده طبقات و بام به ترتیب برابر ۶/۵ و ۶ کیلونیوتن بر مترمربع فرض شده است و بار زنده نیز برای تمام طبقات ۲ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. سطح بار گیر تیرها نیز ۲/۲۵ متر منظور شده است. بار دیوارهای پیرامونی طبقات و بام نیز به ترتیب ۷ و ۲/۵ کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. ساختمان در ناحیه‌ای با لرزه‌خیزی خیلی زیاد و خاک نوع II مطابق آیین‌نامه‌های ساختمانی ایران طراحی شده است [۲۰-۲۱]. بنا شده است. مقادیر مربوط به ابعاد تیرها، ستون‌ها و تعداد میلگردها در جدول ۱ آمده است. لازم به یادآوری است که در این تحقیق برای ملموس بودن الگوریتم حاضر، از یک قاب دو بعدی استفاده شده است و این درحالی است که می‌توان همین الگوریتم را نیز برای مدل‌های سه بعدی نیز بکار برد. در واقع می‌توان گفت که الگوریتم ارائه شده کاملاً مجزا از تعداد درجات آزادی مدل‌های سازه‌ای است و برای این منظور از یک قاب ساده برای نشان دادن توانایی این الگوریتم استفاده شده است.



شکل ۶: قاب مورد بررسی در این مطالعه.

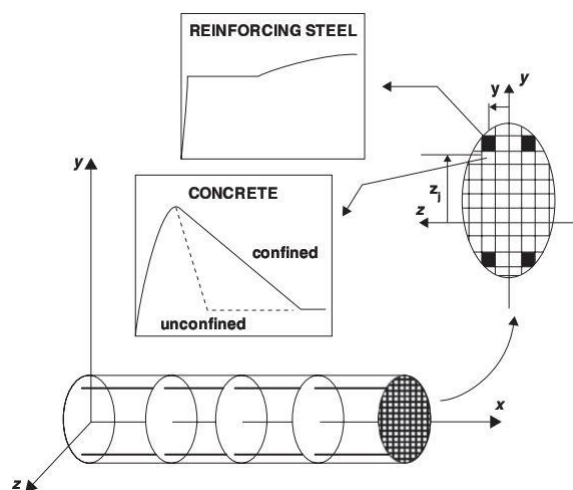
جدول ۱: ابعاد تیرها و ستون‌ها و مقادیر میلگردهای مربوط به آن‌ها.

طبقات	ابعاد تیر			ابعاد ستون		
	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	تعداد و اندازه میلگرد در بالا و پایین مقطع	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	تعداد و اندازه میلگردها
۱ و ۲	۵۰	۴۰	۸ ϕ ۲۰	۵۰	۵۰	۱۲ ϕ ۲۰
۳ و ۴	۴۵	۴۰	۸ ϕ ۱۸	۴۵	۴۵	۸ ϕ ۲۰
۵	۴۰	۳۵	۶ ϕ ۱۶	۴۰	۴۰	۸ ϕ ۱۶

## ۲-۴- مدلسازی قاب مورد مطالعه

مدلسازی قاب مورد نظر به صورت ماکروی در نرم افزار OpenSees صورت گرفته است و در آن از مصالح 'concrete01' برای مصالح بتنی استفاده شده است. در این نوع مصالح، تنش کششی بتن برابر صفر فرض شده است و مطابق مرجع [۲۲] این نوع مصالح بتنی به دلیل نداشتن مشکلات همگرایی در تحلیل بسیار مناسب است. از آن جاکه مقاومت و کرنش بتن محصور شده<sup>۱۰</sup> (بتن موجود در هسته) و بتن محصور نشده<sup>۱۱</sup> (بتن مورد استفاده در پوشش) در مدلسازی خرابی پیش رونده با هم تفاوت قابل ملاحظه ای دارند؛ برای هر کدام از این دو، مصالح بتنی جداگانه ای تعریف شده است که برای این منظور از مدل مرجع [۲۳] استفاده شده است. برای در نظر گرفتن اثر محصور شدگی در بتن هسته، مقادیر مربوط به کرنش نهایی بتن هسته به طور قابل ملاحظه ای از مقادیر کرنش مربوط به بتن پوشش بیش تر است که در این تحقیق کرنش نهایی برای بتن محصور شده و محصور نشده در هسته و پوشش به ترتیب  $0.025$  و  $0.005$  در نظر گرفته شده است. در ادامه از مصالح 'ReinforcingSteel' برای تعریف میلگردهای فولادی استفاده شده است. برای مصالح بتن، مقاومت فشاری برابر  $25$  مگاپاسکال و برای میلگردهای فولادی مقاومت تسلیم و نهایی به ترتیب برابر  $400$  و  $600$  مگاپاسکال فرض شده اند. مطابق راهنمای GSA2013، این مقادیر مقاومت اسمی باید به مقاومت های مورد انتظار در تحلیل های غیرخطی تبدیل گردند. برای تبدیل مقاومت های اسمی به مقاومت های مورد انتظار، مقاومت های مصالح بتن و فولاد در ضریب  $1/25$  ضرب شده اند یعنی مقاومت های بتن و فولاد از  $25$  و  $400$  مگاپاسکال به ترتیب به  $31/25$  و  $500$  مگاپاسکال تغییر یافته اند [۲۴].

از مقاطع فایبر برای تعریف مقاطع تیرها و ستون ها استفاده شده است. در این مقاطع اثر اندرکنشی نیروی محوری لنگر خمشی در نظر گرفته می شود که این خود برای خرابی پیش رونده بسیار حائز اهمیت است. هر مقطع باید در هر راستا به فایبرهای کوچکتری افزاز گردد؛ انتخاب صحیح ابعاد فایبرها برای استخراج نتایج صحیح و همچنین ایجاد همگرایی در تحلیل بسیار مهم است که در این تحقیق این ابعاد برابر  $5$  cm در نظر گرفته شده اند. از المان های نیرویی بر اساس پلاستیسیته گسترده برای تیرها و ستون ها استفاده شده است. از تبدیل هندسی همگرد<sup>۱۲</sup> برای اختصاص هندسه غیرخطی در المان ها استفاده شده است. این تبدیل هندسی قابلیت انتقال سختی و نیروی مقاوم غیرخطی را داراست و در خرابی پیش رونده می تواند در ایجاد کنش زنجیری<sup>۱۳</sup> تیرها نقش مهمی را ایفا نماید [۲۵]. در شکل ۷ کلیات مربوط به مدلسازی یک المان فایبر در نرم افزار OpenSees نشان داده شده است.



شکل ۷: شکل کلی مربوط به یک المان تیر ستون بتن آرمه [۲۶].

<sup>10</sup> Confined concrete

<sup>11</sup> Unconfined concrete

<sup>12</sup> Co rotational transformation

<sup>13</sup> Catenary action

از آنجایی که ماهیت خرابی پیش‌رونده هم دینامیکی و هم غیرخطی است؛ در این تحقیق از تحلیل دینامیکی غیرخطی از نوع تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای حذف ستون‌ها استفاده شده است. مطابق آیین‌نامه‌های GSA و DoD در هنگام استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در ارزیابی خرابی پیش‌رونده، باید از ترکیب بار رابطه (۲) برای کل سطوح سازه استفاده نمود.

$$G_{ND} = 1.2D.L. + 0.5L.L.$$

(۲)

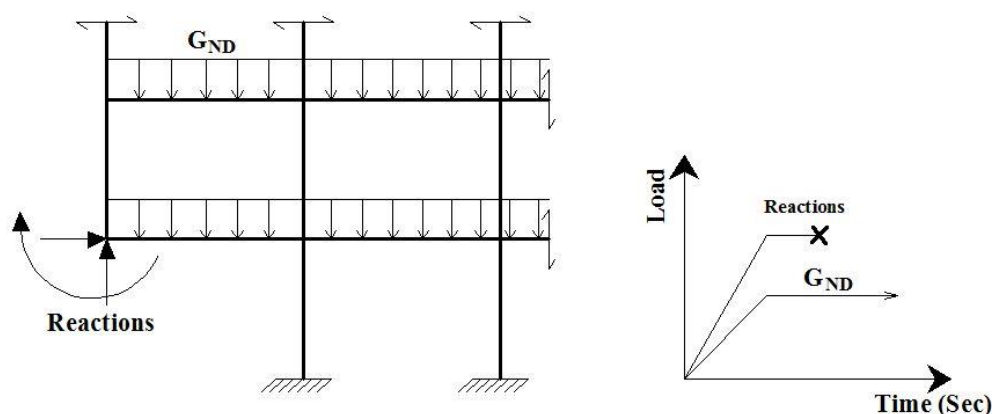
در رابطه (۲)، D.L. و L.L. به ترتیب بیانگر بارهای مرده و بارهای زنده وارد بر سازه می‌باشد.

## ۵- بررسی عملکرد الگوریتم و مقایسه آن با روش‌های ارائه داده شده

### ۵-۱- بررسی عملکرد الگوریتم در سناریوی حذف یک ستون

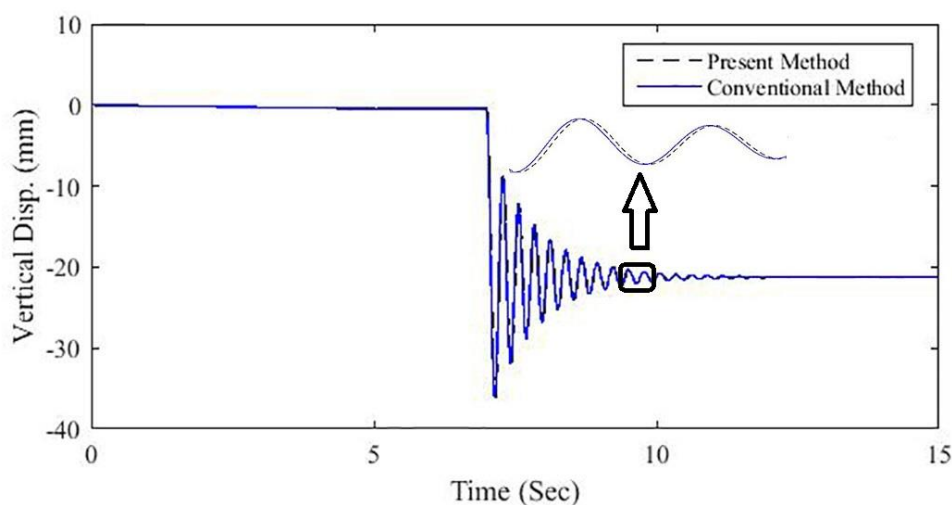
در مطالعاتی که تاکنون انجام شده است؛ برای حذف یک ستون در نرم‌افزارهای ماکروی مانند OpenSees مراحل زیر باید طی شود:

۱. سازه تحت تحلیل بار استاتیکی ثقلی تحت ترکیب بار رابطه (۲) قرار داده می‌شود.
  ۲. نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی موجود در ستونی که باید حذف شود، یادداشت می‌گردد. چنانچه مدل سه بعدی باشد باید لنگر خمشی و نیروی برشی در جهت متعامد و همچنین لنگر پیچشی نیز یادداشت گردد.
  ۳. سازه از حالت تحلیل خارج شده و ستون موردنظر را حذف می‌شود و به جای آن‌ها، نیروهای یادداشت شده در مرحله قبل را باید به عنوان عکس العمل قرار داد. دقت شود این عمل نتایج بسیار مشابهی با همان سازه در صورت وجود ستون دارد.
  ۴. برای مدل‌سازی حذف ستون، باید نیرویی برابر و در خلاف جهت نیروهای یادداشت شده در مرحله قبل در ستون یا ستون‌های مورد نظر وارد شود و برای این نیروها نیز باید یک تاریخچه زمانی در نظر گرفته شود.
  ۵. سازه تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی غیرخطی به روش انتگرال مستقیم) با قرار دادن بارهای استاتیکی به عنوان شرایط اولیه قرار داده می‌شود (توجه شود چون این یک تحلیل غیرخطی است؛ نمی‌توان از اصل بر هم نهی استفاده کرد؛ بنابراین باید بارها را پشت سرهم قرار داد). در ادامه باید نیروهای قرار داده شده در مرحله ۴ را با یک تاریخچه زمانی و به صورت ناگهانی به سازه اعمال نمود تا پدیده مربوط به حذف ناگهانی ستون در سازه مدل‌سازی شود.
- روش فوق به روش حذف تلاش‌های ستون معروف شده است و تاکنون محققین زیادی از جمله کیم و همکاران [۲۷]، رهایی و همکاران [۲۸]، برونسی و ناسیمین [۲۹]، کاظمی مقدم و ساسانی [۳۰]، لی و ساسانی [۳۱]، کردباغ و محمدی [۳۲]، قهرمان‌نژاد و پارک [۳۴]، ژنگ و لی [۳۳]، ونگ و همکاران [۳۴] و هوایی [۳۵] از این روش در نرم‌افزار OpenSees برای حذف یک ستون استفاده کرده‌اند. شماتیک کلی مربوط به حذف ناگهانی یک ستون در یک قاب دویعدی در شکل ۸ آمده است.

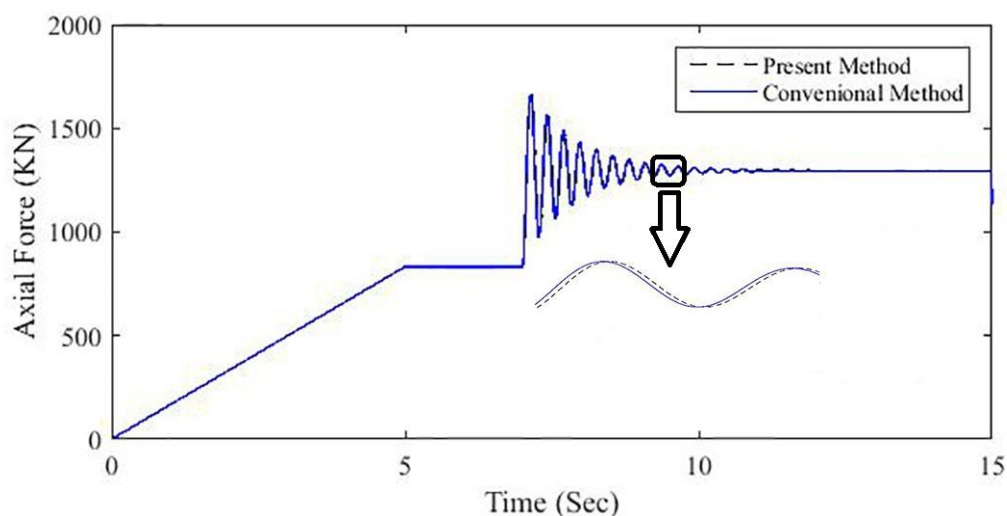


شکل ۸: روش حذف یک ستون در نرم افزار OpenSees در مطالعات قبلی.

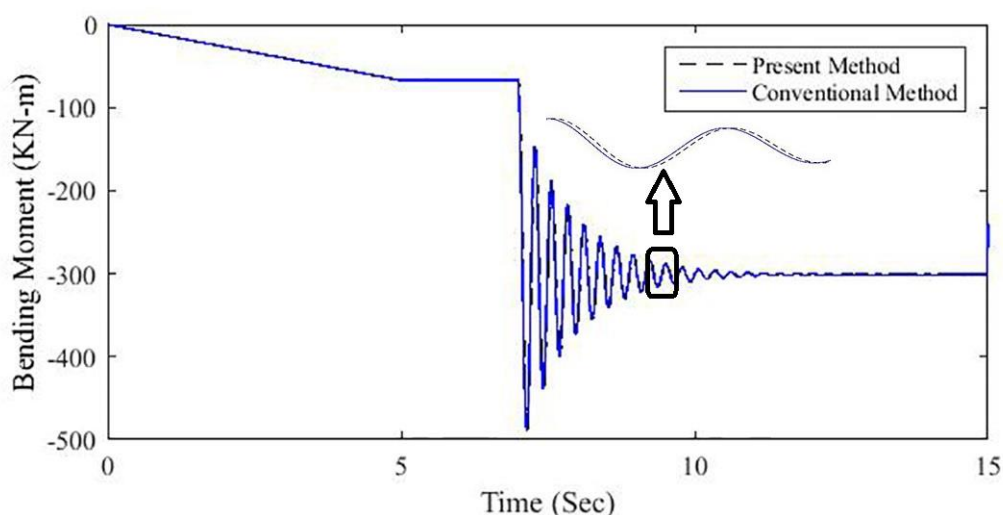
در شکل ۸ حذف تلاش‌های ستون با یک تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت گرفته است. در این مطالعه الگوریتم توسعه داده شده، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این الگوریتم با استفاده از یک حلقه for و یک دستور شرطی if ساخته شده است. در داخل دستور شرطی if باید ستون موردنظر را در زمان دلخواه از سازه حذف نمود. برای حذف یک ستون، ستون C<sub>1</sub> در قاب شکل ۶ به صورت ناگهانی حذف شده است. نتایج مربوط به تغییر مکان گره بالای ستون محذوف (N<sub>1</sub>)، نیروی محوری ستون کناری ستون محذوف (C<sub>2</sub>) و لنگر خمشی تیر بالای ستون محذوف (B<sub>2</sub>) به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.



شکل ۹: نمودار مربوط به تاریخچه زمانی تغییر مکان قائم بالای ستون محذوف (N<sub>1</sub>) در روش توسعه یافته و در روش مرسوم.



شکل ۱۰: نمودار مربوط به تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون کناری ستون محذوف (C<sub>2</sub>) در روش توسعه یافته و در روش مرسوم.

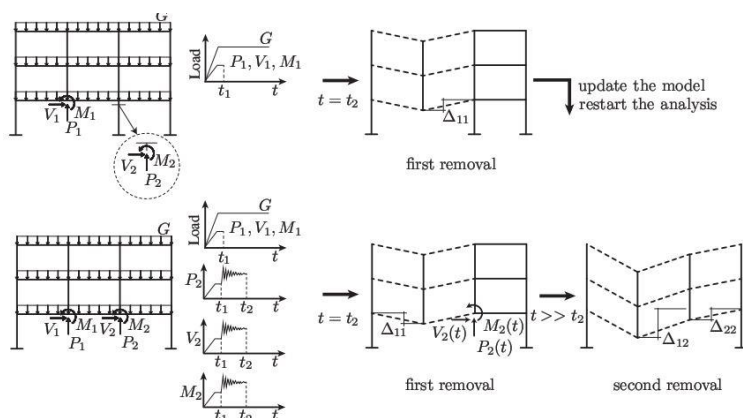


شکل ۱۱: نمودار مربوط به تاریخچه زمانی تیربالای ستون محذوف (B<sub>2</sub>) در روش توسعه یافته و در روش مرسوم.

همانطور که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود، روش ارائه شده در این تحقیق با دقت بسیار بالایی با روش مرسوم ارائه شده در تحقیقات قبلی منطبق است. بنابراین استفاده از روش توسعه یافته در این تحقیق می‌تواند برای حذف یک ستون بسیار کارا باشد.

## ۲-۵- بررسی عملکرد الگوریتم در سناریوی حذف دو ستون

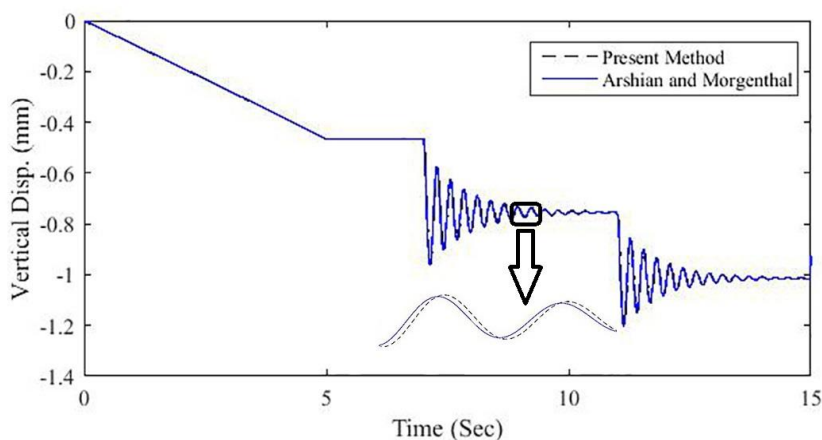
حذف دو ستون می‌تواند به صورت همزمان و غیرهمزمان انجام گیرد. در حذف دو ستون به صورت همزمان دقیقاً همان گام‌های لازم برای حذف یک ستون که در قسمت ۲-۳ توضیح داده شد؛ باید طی شود با این تفاوت که به جای یک ستون، باید عملیات را برای دو ستون انجام داد. این درحالی است که در حذف دو ستون به صورت غیرهمزمان مسئله پیچیده می‌شود و باید از راهکارهایی خاص برای این منظور استفاده نمود. عرشیان و مورگنتال از روش نشان داده شده در شکل ۱۲ برای حذف غیرهمزمان دو ستون استفاده کردند [۱۴].



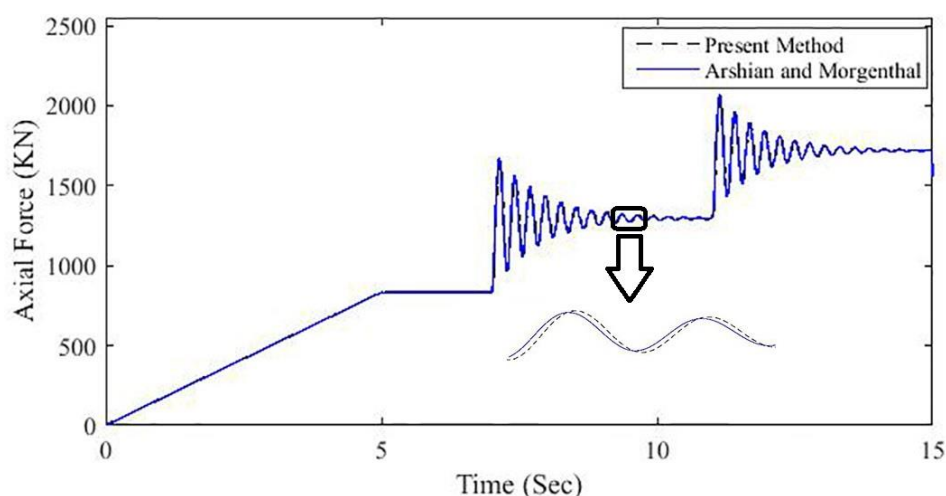
شکل ۱۲: روش مورد استفاده برای حذف دو ستون بصورت غیرهمزمان توسط عرشیان و مورگنتال در نرم افزار OpenSees [۱۴].

روش نشان داده شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که برای حذف غیرهمزمان دو ستون به زمان و دقت زیادی نیاز است. دلیل پیچیده بودن این الگوریتم‌ها نیز به این دلیل است که اگر ستون  $C_1$  در زمان  $t_1$  و ستون  $C_2$  در زمان  $t_2$  حذف شود؛ در اینصورت باید ابتدا نتایج مربوط به اضافه نیروی محوری ناشی از حذف ستون  $C_1$  ذخیره شود و سپس این اضافه نیرو به صورت تابعی از زمان در هنگام تحلیل ستون  $C_2$  به آن اضافه شود. همانطور مشاهده می‌شود اگر از روش‌های مربوط به حذف تلاش‌های ستون استفاده شود؛ حذف دو ستون بصورت غیرهمزمان بسیار پیچیده‌تر از حذف دو ستون بصورت همزمان می‌شود. این درحالی‌است که نتایج مربوط به حذف غیرهمزمان دو ستون نسبت به حذف همزمان آن‌ها می‌تواند حالت بحرانی‌تری داشته باشد و در واقعیت نیز بیش‌تر شاهد آن هستیم. مثلاً انفجارهای زنجیره‌ای می‌تواند نمونه‌ای از حذف غیرهمزمان دو یا چند ستون تلقی شود.

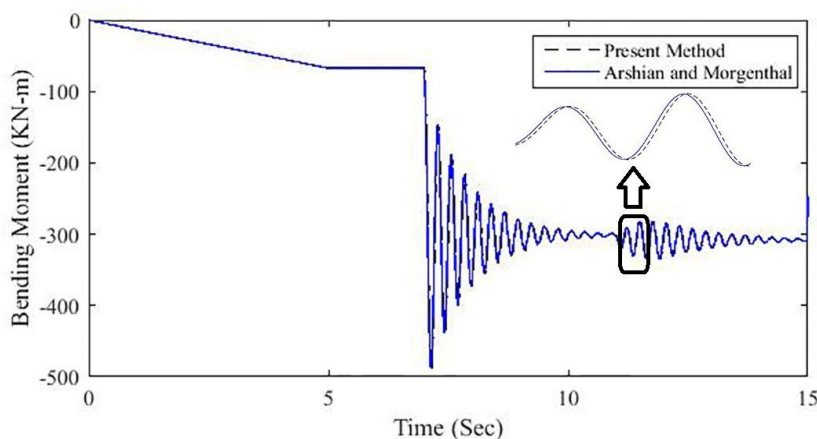
در روش توسعه داده شده، همانند روش حذف یک ستون می‌توان از یک حلقه *for* و دو دستور شرطی *if* برای حذف دو ستون استفاده کرد که در آن ستون  $C_1$  (سناریوی اول حذف ستون) با دستور شرطی اول و در زمان  $t_1$  و ستون  $C_3$  (سناریوی دوم حذف ستون) در قاب شکل ۶ با دستور شرطی دوم در زمان  $t_2$  حذف می‌شود. همانطور که بیان شد برای حذف غیرهمزمان دو ستون در روش توسعه داده شده، فقط یک دستور شرطی به آن اضافه شده است اما همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ روش‌های ارائه شده بسیار پیچیده هستند. برای نشان دادن کاربرد این روش ستون‌های  $C_1$  و  $C_3$  بصورت غیرهمزمان به هر دو روش توسعه داده شده و عرشیان و مورگنتال [۱۴] حذف شده‌اند. در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمودارهای مربوط به تغییر مکان قائم (N2)، نیروی محوری ستون کناری دو ستون محذوف ( $C_2$ ) و لنگر خمشی تیر بالای یکی از ستون‌های محذوف ( $B_2$ ) آورده شده است.



شکل ۱۳: نمودار مربوط به تاریخچه زمانی تغییر مکان قائم ( $N_2$ ) در روش توسعه یافته و روش عرشیان و مورگنتال.



شکل ۱۴: نمودار مربوط به تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون کناری ستون محذوف (C<sub>2</sub>) در روش توسعه یافته و روش عرشیان و مورگنتال.



شکل ۱۵: نمودار مربوط به تاریخچه زمانی تیر بالای یکی از ستون‌های محذوف (B<sub>2</sub>) در روش توسعه یافته و روش عرشیان و مورگنتال.

همانطور که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ معلوم است، نتایج هر سه روش بر هم منطبق است. در شکل ۱۳ نمودار مربوط به تغییر مکان گره بالای ستون C<sub>2</sub> (گره N<sub>2</sub>) که بین دو ستون محذوف C<sub>1</sub> و C<sub>3</sub> قرار دارد مشاهده می‌شود. تغییر مکان بسیار کم در این گره به این دلیل است که ستون بالای گره، حذف نشده است. در شکل ۱۴ نیز نمودار مربوط به نیروی محوری ستون C<sub>2</sub> که بین دو ستون محذوف C<sub>1</sub> و C<sub>3</sub> قرار دارد؛ نشان داده شده است. در شکل ۱۵ نمودار مربوط به لنگر خمشی تیر B<sub>2</sub> (تیر بالای ستون C<sub>1</sub>) نشان داده شده است. در تمامی شکل‌ها روش حاضر با روش عرشیان و مورگنتال اختلاف بسیار کمی وجود دارد. اختلاف بسیار کم موجود در نمودارهای داده شده به این دلیل است که استفاده از روش حذف ستون به دلیل دقت بیشتر از کیفیت بیشتری نسبت به حذف واکنش‌های ستون برخوردار است. بنابراین استفاده از الگوریتم توسعه داده شده می‌تواند برای حذف غیرهمزمان دو ستون بسیار مفید و اثر بخش باشد. یکی از موارد مهمی که باید به آن اشاره داشت این است که در الگوریتم حاضر، می‌توان n ستون را فقط با n دستور شرطی if بصورت غیرهمزمان از سازه حذف کرد و این در حالی است که حذف سه ستون بصورت غیرهمزمان به کمک روش‌های معمول تقریباً غیرممکن است. الگوریتم حذف بیش از دو ستون به دلیل صعوبت بیش از حد در تحقیقات انجام نشده است اما این در حالی است که در روش توسعه یافته می‌توان تعداد n ستون را بصورت غیرهمزمان تنها با نوشتن n دستور شرطی به راحتی از سازه حذف نمود.

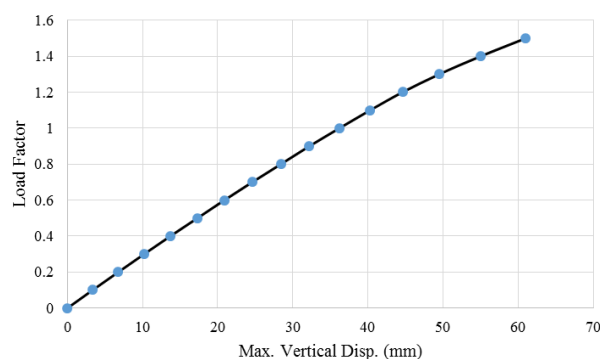


## ۶- انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده (NIDA)

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده در برابر خرابی پیش‌رونده از تحلیل دینامیکی افزایشنده غیرخطی در برابر زلزله الهام گرفته شده است که در آن وامواتیکوس و کرنل چگونگی انجام آن در نرم‌افزار OpenSees روشی را ارائه داده‌اند [۳۶]. در تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده در خرابی پیش‌رونده به جای آن که شدت زلزله افزایش یابد، ضریب بار ثقلی افزایش می‌یابد و این افزایش ضریب بار تا لحظه فروریزش نهایی سازه ادامه می‌یابد. همانطور که در بخش ۳-۳ بیان شد؛ این الگوریتم می‌تواند برای تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده مناسب باشد. برای این منظور بار ثقلی بعد از هر آنالیز به سازه به صورت افزایشی اضافه می‌شود و این اضافه شدن بارها تا خرابی کامل سازه ادامه دارد. [۳۷-۳۸]. حداکثر ضریب بار تحمل شده نسبت به رابطه (۲) به عنوان ضریب بار برای سازه انتخاب می‌شود. به عنوان مثال در قاب نشان داده شده در شکل ۱۶، ضریب بار حداکثر برای حذف سناریوی اول (ستون CI) در قاب شکل ۷ برابر ۱/۵ شده است. بنابراین اگر بارهای ثقلی با ضریب ۰/۱ اضافه شوند؛ ۱۵ مرحله لازم است که تحلیل صورت بگیرد.

در روش‌های مرسوم، اگر بار در ۱۵ مرحله (با فرض ضریب افزایش بار ۰/۱) به سازه وارد شود؛ باید ۱۵ تحلیل استاتیکی انجام داد و تلاش‌های مربوط به ستون محذوف را در هر مرحله یادداشت نمود و به جای ستون قرار داد که بعد از آن تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت بگیرد. همچنین باید توجه داشت که هر کدام از این آنالیزها باید بصورت جداگانه صورت پذیرند و هر تحلیل دینامیکی غیرخطی از تحلیل دیگری جداست.

در روش توسعه داده شده توسط نویسندگان این مقاله؛ با استفاده از دو حلقه for و یک دستور شرطی if می‌توان سازه را به تعداد n حالت تحلیل نمود. در این روش اولین حلقه for بار را بصورت افزایشی به سازه وارد می‌کند و دومین حلقه for نیز تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی را برای حذف ستون انجام می‌دهند. در این الگوریتم باید توجه داشت که رکوردها نیز باید بصورت متغیر تعریف شوند تا نتایج مربوط به هر یک از آن‌ها جداگانه ذخیره شود. علاوه بر این باید توجه شد که در ابتدای اولین حلقه for از دستور wipe استفاده شود تا سازه دوباره به حالت اولیه خود بازگردد و تمام ذخیره‌های تحلیل قبلی پاک شوند (مطابق شکل ۴). در شکل ۱۶ شکل مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده برای ضریب بار و حداکثر تغییرمکان قائم مربوط به هر ضریب آورده شده است.

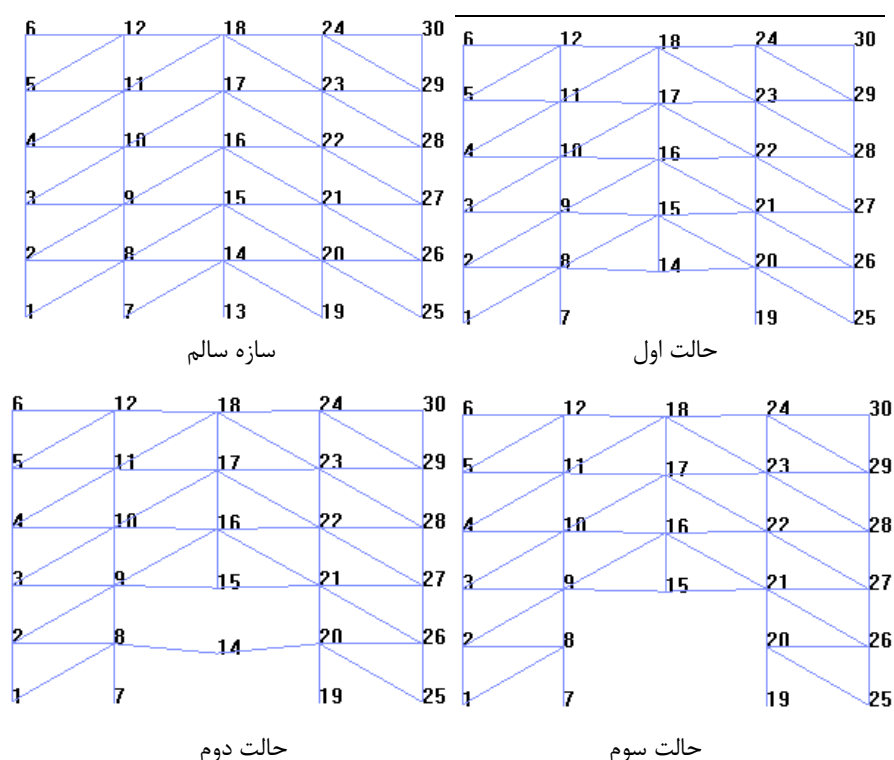


شکل ۱۶: نمودار مربوط به حداکثر تغییرمکان قائم به ضریب بار در تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده.

## ۷- قابلیت حذف تیرها، مهاربندها و میانقاب‌های آجری با استفاده از الگوریتم حاضر در تحلیل

## دینامیکی غیر خطی

یکی از مهم‌ترین مزایای این الگوریتم نسبت به روش‌هایی که تاکنون در مدلسازی ماکروی خرابی پیش‌رونده بیان شده است به حذف سایر المان‌ها مانند تیرها، مهاربندها و یا میانقاب‌های آجری باز می‌گردد. لازم به یادآوری است که حذف میانقاب‌های آجری به صورت حذف دستک‌های فشاری معادل امکان‌پذیر است زیرا در مدلسازی ماکروی میانقاب‌های آجری از این روش برای مدلسازی میانقاب‌های آجری استفاده می‌شود. همانطور می‌دانیم ستون مهم‌ترین عضو سازه‌ای است و تلاش تمام مهندسیین بر آن است که ستون‌ها به عنوان آخرین عضو سازه‌ای دچار خرابی شوند و به همین دلیل است که همواره در طراحی‌ها اجازه می‌دهند که مفاصل پلاستیک در تیرها قبل از ستون‌ها به وقوع بپیوندد. در این راستا راهنماهای GSA2013 و DoD2013 نیز از حذف یک ستون به عنوان خرابی اولیه در سازه استفاده کرده‌اند. این در حالی است که در واقعیت علاوه بر ستون سایر المان‌ها مانند تیرها، مهاربندها و میانقاب‌های آجری نیز دچار خرابی می‌شوند. در روش توسعه یافته، امکان حذف تیرها، مهاربندها و میانقاب‌های آجری وجود دارد. نکته مهمی که باید به آن توجه شود این است که در هنگام حذف المان یا المان‌های دلخواه باید بار روی آن‌ها و همچنین رکوردرهای مربوط به آن المان نیز حذف شود. به عبارت دیگر در حذف اینگونه المان‌ها باید از سه دستور remove element، remove load و remove recorder بصورت توأم استفاده کرد. در شکل ۱۷ قاب شکل ۶ همراه با میانقاب‌های آجری به روش دستک قطری معادل نشان داده شده است. در این قاب توانایی این الگوریتم برای حذف مرحله‌ای المان‌های سازه‌ای (تیر و ستون) و المان‌های غیرسازه‌ای (میانقاب‌های آجری) نشان داده شده است. با استفاده از الگوریتم حاضر می‌توان با شبیه‌سازی نمودن واقعی خرابی اولیه به بررسی تأثیر خرابی اولیه پرداخت.



شکل ۱۷: مراحل گام به گام مربوط به حذف المان‌های قاب با میانقاب آجری

همانطور مشاهده می‌شود؛ استفاده از الگوریتم توسعه یافته می‌تواند برای مدلسازی خرابی گام به گام سازه‌های ماکروی در OpenSees مناسب باشد. در شکل ۱۷، حذف المان‌ها در سه مرحله نشان داده شده است. در حالت اول فقط ستون و دو میانقاب طبقه اول

از سازه حذف شده‌اند؛ با حذف این سه المان گره ۱۳ آزاد می‌شود و این گره باید در تحلیل همراه با سه المان دیگر حذف شود. توجه شود که بارها، جرم‌ها و رکوردرهای هر سه المان و گره باید همراه با حذف المان‌ها و گره از سازه حذف شوند. در حالت دوم نیز ستون و میانقاب‌های طبقه دوم حذف شده‌اند. با حذف این سه المان، المان یا گره آزادی به وجود نیامده است. در این حالت نیز باید بارها، جرم‌ها و رکوردرهای المان‌ها حذف شوند. در حالت سوم دو تیر طبقه اول باید حذف شوند. باید توجه داشت چون تیرها بار ثقلی را تحمل می‌کنند باید بار ثقلی آن‌ها همزمان با حذف تیر از سازه حذف شود. چنانچه تیر دارای جرم گسترده و رکوردر باشد باید جرم و رکوردرها نیز حذف شوند. با حذف دو تیر گره ۱۴ به یک گره آزاد تبدیل می‌شود؛ در این حالت نیز باید این گره همراه با جرم، بارها و رکوردرهای احتمالی از سازه حذف شود (روند حذف المان‌های فوق دقیقاً منطبق بر شکل ۵ می‌باشد). دقت شود که در خرابی پیش‌رونده میانقاب‌های آجری به صورت دستک فشاری در جهت فشاری مدلسازی شوند. از آنجایی که هدف این تحقیق پرداختن به این مقوله نیست از خوانندگان علاقمند تقاضا می‌شود برای کسب اطلاعات بیشتر به مرجع [۱۰] رجوع نمایند.

بنابراین با استفاده از این الگوریتم می‌توان خرابی پیش‌رونده را بصورت مرحله به مرحله و بصورت کاملاً واقعی جلو برد. از مزایای مهم این روش آن است که با معرفی کردن حدود دوران پلاستیک برای تیرها و ستون‌ها می‌توان هر کدام از المان‌های سازه‌ای را در لحظه‌ای که از سطح فروریزش عبور می‌کنند از سازه حذف نمود.

## ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق برای انجام خرابی پیش‌رونده به روش مسیرجایگزین بار در نرم افزار OpenSees یک الگوریتم مناسب بر پایه استفاده از دستور حذف المان معرفی شده است. مزایای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

۱- در تحقیقات گذشته به جای حذف ستون از حذف واکنش‌های ستون استفاده می‌شد. در الگوریتم حاضر، ستون بصورت مستقیم از سازه حذف می‌شود که این موجب بالا رفتن سرعت و دقت در انجام تحلیل خرابی پیش‌رونده می‌شود.

۲- در تحقیقات گذشته از حذف دو یا چند ستون بصورت غیرهمزمان در بیش‌تر موارد به دلیل صعوبت در مراحل انجام آن، صرف‌نظر شده است اما الگوریتم حاضر می‌تواند دو و یا تعداد  $n$  ستون دلخواه را فقط با اضافه کردن چند دستور شرطی را به صورت غیرهمزمان از سازه حذف کند.

۳- در الگوریتم توسعه داده شده می‌توان هر سازه را تحت تنها یک تحلیل برای ارزیابی ظرفیت نهایی در تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته مورد بازبینی قرار داد اما این درحالی است که در تحقیقات گذشته برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته می‌بایست به تعداد گام‌های تحلیل، سازه را ابتدا آنالیز کرده و واکنش‌های ستون را به جای آن قرار داد و سپس تحلیل انجام می‌شد. در روش حاضر به راحتی می‌توان سازه را تحت ارزیابی خرابی پیش‌رونده قرار داد و پس از اتمام هر تحلیل نتایج برای آن تحلیل بصورت خودکار ذخیره می‌شوند و تحلیل بعدی از نو آغاز می‌شود و این کار تا فروریزش نهایی سازه ادامه دارد.

۴- در الگوریتم ارائه شده در این مقاله، علاوه بر حذف ستون؛ می‌توان تیرها، مهاربندها و میانقاب‌ها را نیز حذف کرد. در واقع این الگوریتم می‌تواند خرابی سازه را بصورت گام به گام و به صورت کامل شبیه سازی نماید. در واقع می‌توان با معرفی سطح عملکرد هر کدام از اعضای سازه به این الگوریتم، هر کدام از المان‌های که از سطح عملکرد ایمنی خود خارج شده‌اند از سازه حذف شوند.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از جناب آقای مسعود قهرمان نژاد، دانشجوی دکترای مهندسی سازه دانشگاه تگزاس آرلینگتون، به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان، کمال قدردانی و تشکر را دارند.

## مراجع

- [1] GSA (General Services Administration). (2013). *Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance*. Washington, DC, General Services Administration (GSA).
- [2] DoD (Department of Defense). (2013). *Design of buildings to resist progressive collapse.*, Washington, DC (2013). UFC 4-023-03.
- [3] Alashker Y, Li H, El-Tawil S. (2011). Approximations in progressive collapse modeling. *Journal of Structural Engineering*, 137(9), 914-24.
- [4] Bao Y, Kunnath SK, El-Tawil S, Lew HS. (2008). Macromodel-based simulation of progressive collapse: RC frame structures. *Journal of Structural Engineering*, 134(7), 1079-91.
- [5] Bao Y, Main JA, Noh SY. (2017). Evaluation of Structural Robustness against Column Loss: Methodology and Application to RC Frame Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 143(8):04017066.
- [6] Marjanishvili S, Agnew E. (2006). Comparison of various procedures for progressive collapse analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 20(4), 365-74.
- [7] Pachenari A, Keramati A, Pachenari Z. (2013). Investigation of progressive collapse in intermediate RC frame structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(2), 116-25.
- [8] Qian K, Li B, Zhang Z. (2016). Influence of multicolumn removal on the behavior of RC floors. *Journal of Structural Engineering*. 142(5), 04016006.
- [9] Hashemi Rezvani F, Behnam B, Ronagh HR, Alam MS. (2017). Failure progression resistance of a generic steel moment-resisting frame under beam-removal scenarios. *International Journal of Structural Integrity*, 8(3), 308-325.
- [10] Sasani M. (2008). Response of a reinforced concrete infilled-frame structure to removal of two adjacent columns. *Engineering Structures*, 30(9), 2478-91.
- [11] Song BI, Sezen H. (2013) Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering Structures*, 56, 664-72.
- [12] Lalkovski N, Starossek U. (2016). Vertical building collapse triggered by loss of all columns in the ground story– Last line of defense. *International Journal of Steel Structures*, 16(2), 395-410.
- [13] Li Y, Lu X, Guan H, Ren P. (2016). Numerical investigation of progressive collapse resistance of reinforced concrete frames subject to column removals from different stories. *Advances in Structural Engineering*, 19(2), 314-26.
- [14] Arshian AH, Morgenthal G. (2017). Three-dimensional progressive collapse analysis of reinforced concrete frame structures subjected to sequential column removal. *Engineering Structures*, 132, 87-97.
- [15] Ashrafi, H., Hassanzadeh, S. (2017). Investigation of progressive collapse in reinforced concrete frames, considering end rigid zones and various scenarios for column removal duration. *Journal of Structural and Construction Engineering*, doi: 10.22065/jsce.2017.86030.1172
- [16] Talaat, M., Mosalam, Kh. (2009). Modeling progressive collapse in reinforced concrete buildings using direct element removal. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 609-634.
- [17] Khandelwal K., El-Tawil S. (2011). Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis. *Engineering Structures*, 33(9), 2653-61.
- [18] Scott, M.H., and Fenves, G. (2010). Krylov Subspace Accelerated Newton Algorithm: Application to Dynamic Progressive Collapse Simulation of Frames. *Journal of Structural Engineering*, 136(5), 473-480.
- [19] Wu, S.R., Gu, L. (2012). *Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient dynamics*, Hoboken, Published: John Wiley & Sons, 335 pages.
- [20] Building and Housing Research Center of the Islamic Republic of Iran (BHRC), (2015). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (standard No.2800)*. 4th edition, Tehran, BHRC.
- [21] MRUD (Ministry of Roads and Urban Development of the Islamic Republic of Iran). (2013). *Iranian national building code, Part 9: Design and construction of reinforced concrete buildings*. Tehran, MRUD.
- [22] Livingston E., Sasani M., Bazan M., Sagioglu S. (2015). Progressive collapse resistance of RC beams. *Engineering Structures*, 95, 61-70.
- [23] Scott, B.D., Park, R. and Priestley M.J.N. (1982). Stress–strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI Struct. J.*, 79(1), 13–27.
- [24] Ghahremannejad M., Park Y. (2016). Impact on the number of floors of a reinforced concrete building subjected to sudden column removal. *Engineering Structures*, 111, 11-23.
- [25] Kim J, An D. (2009). Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action. *The structural design of tall and special buildings*, 18(4), 455-65.
- [26] Taucer, F.T., Spacone, E. and Filippou, F.C. (1991). *A Fiber Beam–Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Report UCB/EERC-91/17, University of California, Berkeley.

- [27] Kim HS, Kim J, An DW. (2009). Development of integrated system for progressive collapse analysis of building structures considering dynamic effects. *Advances in Engineering Software*, 40(1), 1-8.
- [28] Rahai A, Asghshahr MS, Banazede M, Kazem H. (2013). Progressive collapse assessment of RC structures under instantaneous and gradual removal of columns. *Advances in Structural Engineering*, 16(10), 1671-82.
- [29] Brunesi E, Nascimbene R. (2014). Extreme response of reinforced concrete buildings through fiber force-based finite element analysis. *Engineering Structures*, 69, 206-15.
- [30] Kazemi-Moghaddam, A. and Sasani, M. (2015). Progressive collapse evaluation of Murrah Federal Building following sudden loss of column G20. *Engineering Structures*, 89, 162-171.
- [31] Li M, Sasani M. (2015). Integrity and progressive collapse resistance of RC structures with ordinary and special moment frames. *Engineering Structures*, 95, 71-9.
- [32] Kordbagh B., Mohammadi M. (2017). Influence of seismicity level and height of the building on progressive collapse resistance of steel frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. [online] 26(2), e1305. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tal.1305/full>
- [33] Zhang Q, Li Y. (2017). The Performance of Resistance Progressive Collapse Analysis for High-Rise Frame-Shear Structure Based on OpenSees. *Shock and Vibration*, Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/3518232>
- [34] Weng J, Tan KH, Lee CK. (2017). Modeling progressive collapse of 2D reinforced concrete frames subject to column removal scenario. *Engineering Structures*, 141, 126-43.
- [35] Havaei G. (2017). Assessment of sliding-rubber isolator effect in progressive collapse of bridges under two scenarios. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tal.1418/full>
- [36] Vamvatsikos D, Cornell CA. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
- [37] Brunesi E, Nascimbene R, Parisi F, Augenti N. (2015). Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. *Engineering Structures*, 104, 65-79.
- [38] Arshian AH, Morgenthal G, Narayanan S. (2016). Influence of modelling strategies on uncertainty propagation in the alternate path mechanism of reinforced concrete framed structures. *Engineering Structures*, 110, 36-47.