



ارزیابی زمان تناوب قائم ارتعاش سازه ناشی از حذف ستون و تاثیر آن بر پاسخ سازه در خرابی پیشرونده

موسی محمودی صاحبی^{1*}، طه تیموری²، سید هژیر کوزانی²، سید شاکر هاشمی³

1-استادیار گروه عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

2-کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

3-استادیار گروه عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

تاریخ دریافت: 1392/09/20؛ تاریخ بازنگری: 1393/04/30؛ تاریخ پذیرش: 1393/09/26

چکیده

خرابی پیشرونده پدیده‌ای است که در آن، قسمت اعظمی از یک سازه در اثر خرابی کوچک از بین می‌رود. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی در تحقیقات و آیین‌نامه‌های طراحی برای بررسی این پدیده ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، روش مسیر بار جایگزین است. در این روش برای ارزیابی رفتار سازه‌ها، علاوه بر تحلیل‌های استاتیکی خطی و استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی غیرخطی نیز پیشنهاد می‌گردد. در تحلیل دینامیکی غیرخطی، بار ناشی از حذف ستون در مدت زمان محدود به صورت دینامیکی (تاریخچه زمانی) به سازه اعمال می‌شود و پاسخ سازه در برابر آن ارزیابی می‌گردد. از آنجایی که مدت زمان حذف ستون در تحلیل دینامیکی غیرخطی تاثیر زیادی بر پاسخ سازه‌ها دارد، هدف این مقاله، بررسی تاثیر مدت زمان حذف ستون بر پاسخ سازه‌ها در برابر خرابی پیشرونده است. برای این منظور، چند ساختمان متداول انتخاب شد و پاسخ آنها در برابر مدت زمان حذف ستون بررسی و بحرانی‌ترین حالت آنها مشخص شد. نتایج نشان می‌دهد، تاثیر مدت زمان حذف ستون بر پاسخ سازه‌ها بسیار شدید است. از آنجایی که در آیین‌نامه‌های طراحی، مدت زمان حذف ستون به زمان تناوب قائم سازه ربط داده می‌شود، در این مقاله یک روش ساده برای تعیین زمان تناوب قائم سازه پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: خرابی پیشرونده؛ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی؛ قاب‌های خمشی؛ زمان تناوب قائم؛ مدت زمان حذف ستون.

Evaluation of the vertical vibration period due to column elimination and its effects on structural response in progressive collapse

M. Mahmoudi^{1*}, T. Teimoori², H. Koozani², S. Sh. Hashemi³

1. Assistant. Prof., Civil. Eng. Department, Shahid Rajaee Teacher Trainig Univ., Tehran, Iran

2. Ms.c. Student, Civil. Eng. Department, Shahid Rajaee Teacher Trainig Univ., Tehran, Iran

3. Assistant. Prof., Civil. Eng. Depetment, Persian Gulf University, Boushehr, Iran

Abstract

Progressive Collapse is a phenomenon in which a large part of a structure is destroyed by a small damage. In recent years, many codes and researches have investigated the behavior of structures against progressive collapse and proposed methods to evaluate the structural responses. One of the methods for estimation of structural response is alternative load path method using linear static, nonlinear static and nonlinear dynamic analysis. Nonlinear dynamic analysis is used to achieve more accurate responses. Since that, duration removed columns in the nonlinear dynamic analysis has a significant impact on the structural response, the purpose of this paper is to evaluate the effect of structural response due to duration removed columns. For this purpose, some ordinary buildings was selected and their responses was evaluated against column elimination's time and critical conditions was determined. Since that, in design codes, column elimination's time, depends on the vertical period of the bays above the removed column, a proposed method is presented for determination this time.

Keywords: Progressive collapse, Non-linear time history analysis, Moment resisting frames, Vertical structural period, Column elimination's time.

1- مقدمه

بعد از تخریب ساختمان مسکونی روناند در سال 1968 و توجه بیشتر مهندسين به بحث خرابی پیشرونده، تحقیقات زیادی در ارتباط با روش‌های پیشگیری و یا کاهش پتانسیل خرابی پیشرونده انجام شد. پس از گذشت چند سال و وقوع چندین حادثه مشابه، از جمله حوادث تروریستی 11 سپتامبر آمریکا، آیین‌نامه‌های مجزایی جهت کاهش و یا جلوگیری از تخریب تنظیم شد. از جمله‌ی این آیین‌نامه‌ها که به صورت مجزا به بحث خرابی پیشرونده می‌پردازند، می‌توان به دو آیین‌نامه DoD¹ و GSA² اشاره کرد [1 و 2]. رویکرد این آیین‌نامه‌ها بدین گونه است که در اثر تخریب ناگهانی یکی از اعضای اصلی سازه، اعضای باقیمانده قادر به پل زدن به روی دیگر المان‌ها بوده و مسیر جایگزینی به منظور انتقال بار داشته باشند. به منظور کنترل سازه در برابر خرابی پیشرونده، آیین‌نامه‌های مذکور سه روش تحلیل استاتیکی خطی³، استاتیکی غیرخطی⁴ و دینامیکی غیرخطی⁵ را معرفی می‌نمایند که در دو روش تحلیلی اول، اثرات غیرخطی مصالح و بار دینامیکی به صورت ضریب بزرگنمایی در بارگذاری سازه اعمال می‌شود.

در روش تحلیل استاتیکی خطی (LS)، ابتدا با توجه به نوع سازه و نوع اتصال تیر به ستون در محدوده خرابی، ضریبی تحت عنوان m_{LIF} بدست می‌آید. سپس بارهای وارده در محدوده ستون حذف شده با اعمال ضریب بزرگنمایی (Ω_{LS}) افزایش می‌یابد. پس از تحلیل و طراحی با استفاده از آیین‌نامه معتبر و با مقایسه نسبت تنش‌های وارده به تنش مجاز (DCR)⁶ و m_{LIF} سازه در برابر خرابی پیشرونده کنترل می‌گردد. به عبارت دیگر، در صورتی المان‌های سازه در برابر این نوع خرابی مقاوم است که DCRهای بدست آمده از m_{LIF} کوچکتر باشد.

در کنترل سازه به روش استاتیکی غیرخطی (NS)، با توجه به نوع سازه و نوع اتصال تیر به ستون در محدوده خرابی، ضریبی تحت عنوان DIF محاسبه می‌گردد. سپس

بارهای وارده در محدوده حذف ستون با ضریب بزرگنمایی (Ω_{NS}) افزایش یافته که پس از تحلیل، وضعیت مفاصل به وجود آمده با محدوده‌های معرفی شده در دستورالعمل FEMA274 مقایسه می‌شود [3].

تحلیل به روش تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی (ND)، بدین صورت است که فرض می‌شود، ستون محل مورد بررسی در مدت زمان بسیار کوتاهی از بین می‌رود. بر اساس این فرض، اثرات دینامیکی حذف سریع ستون، بر سازه اعمال می‌شود. در آیین‌نامه DoD برای مدل کردن حذف ستون، ابتدا عکس العمل وارد شده به سازه در محل مورد نظر محاسبه می‌شود و پس از حذف ستون، عکس العمل‌های مذکور در مدت زمان مشخص باربرداری می‌شود. کوکات⁷ و همکاران [4] در تحقیق خود بر روی سازه‌های بتنی، مدت زمان 0/005 ثانیه را برای تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده کرده‌اند. آنها این زمان را بر اساس مدت زمان اثر انفجار و تخریب ستون در نظر گرفته‌اند. همچنین ایربارن⁸ و همکاران [5] تحقیقات متعددی بر روی پارامترهای مختلف از جمله تاثیر زمان باربرداری بر روی سازه‌های بتنی انجام داده‌اند. در این تحقیق مشخص شده است که با افزایش مدت باربرداری، میزان آسیب رسیده به سازه کاهش می‌یابد. رویکرد دو آیین‌نامه DoD و GSA [1 و 2] برای حذف ستون در تحلیل دینامیکی غیرخطی یکسان بوده به نحوی که این زمان را برابر یک‌دهم زمان تناوب ارتعاشی قائم گره محل حذف ستون می‌دانند. بدین ترتیب برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، مقادیر عکس‌العمل‌های سازه در این مدت زمان از سازه حذف می‌گردد (شکل 1). در این شکل، t_0 مدت زمان باربرداری، T پرپود قائم ارتعاشی سازه در محل حذف ستون و P_0 عکس العمل سازه در گره فوقانی محل حذف ستون می‌باشد.

روش‌های تحلیلی فوق در تحقیقات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. به عنوان نمونه لیو (Liu) [6] بر روی روش بهینه شده سازه‌های فولادی مقاوم در برابر خرابی پیشرونده تحقیق نموده است. در این تحقیق، هر یک از سازه‌ها، در حالت عادی (NWD)، استاتیکی خطی (PCLS)، استاتیکی

¹ Department of Defense

² General Service Administration

³ Linear Static (LS)

⁴ Non-Linear Static (NS)

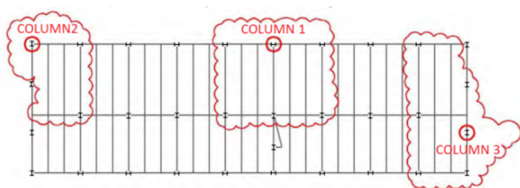
⁵ Non-Linear Dynamic (ND)

⁶ Demand Capacity Ratio

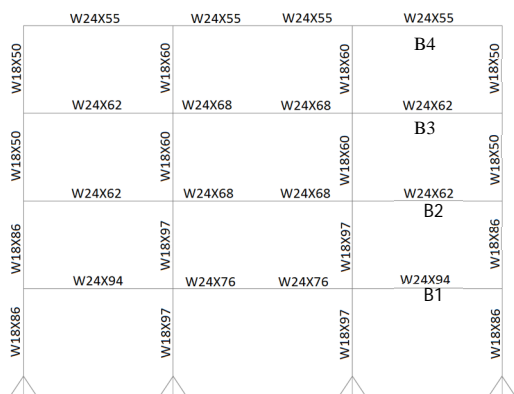
⁷ Kokot

⁸ Iribarren

سازه نشان داده شده در شکل 3 برای حذف ستون شماره 2 در شکل 2 به روش مسیر بار جایگزین و با استفاده از تحلیل استاتیکی خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل 3 مشخصات اعضای سازه مورد ارزیابی نشان داده شده است. جدول 1 وضعیت اختلاف DCRهای به دست آمده در این تحقیق و مثال حل شده در آیین نامه DoD را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب حاصل در دو حالت به هم نزدیک بوده و لذا روش مورد استفاده در این تحقیق مورد تأیید قرار می‌گیرد.



شکل 2- سناریوهای مختلف تخریب [1]



شکل 3- موقعیت اعضا به منظور صحت سنجی

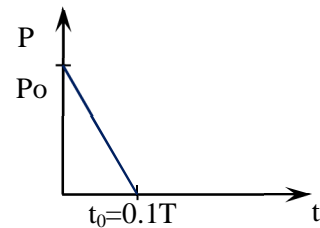
جدول 1- مقایسه نتایج DCRهای بدست آمده به منظور

صحت سنجی							
محل	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
DoD	1.56	1.97	1.81	1.26	1.2	0.9	1.46
تحقیق	1.56	1.97	1.82	1.25	1.3	0.9	1.41

3- مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق

در این تحقیق، سناریوهای مختلف حذف ستون براساس موقعیت‌های معرفی شده در آیین‌نامه DoD انتخاب گردید که از لحاظ رفتاری به سه گروه ستون گوشه، کناری و میانی

غیرخطی (PCNS) و دینامیکی غیرخطی (PCND) با توجه به الگوریتم ژنتیک به صورت بهینه طراحی شدند و در انتها وزن هر یک از سازه‌ها مقایسه شده است. میزان افزایش وزن مورد نیاز سازه در سه حالت استاتیکی خطی (PCLS)، استاتیکی غیرخطی (PCNS) و دینامیکی غیرخطی (PCND) نسبت به حالت عادی به ترتیب برابر 38/8٪، 13/2٪ و 8/2٪ محاسبه شده است. بر اساس نتایج حاصله، طراحی به روش استاتیکی خطی محافظه کارانه‌تر و غیر اقتصادی‌تر می‌باشد.



شکل 1- الگوی باربرداری در تحلیل تاریخچه زمانی

ضرایب بزرگنمایی و روش‌های تحلیل در سال‌های اخیر از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است که یکی از این روش‌ها، روش کشش قائم می‌باشد. در این روش، محدوده خراب شده در سازه به روش‌های مختلف به سمت پایین کشیده شده و پاسخ‌های سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [7 و 8].

اهداف این تحقیق شامل دو قسمت است. ابتدا به کمک تحلیل دینامیکی غیرخطی، حساسیت سازه‌ها به زمان باربرداری حذف ستون ارزیابی می‌شود. سپس، از آنجا که زمان باربرداری و حذف ستون به پیوند (زمان تناوب) قائم ارتعاشی وابسته است، مقدار پیوند ارتعاشی قائم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و یک رابطه ساده برای تعیین آن در سازه‌های فولادی پیشنهاد می‌شود.

2- صحت سنجی تحقیق

به منظور بررسی صحت تحلیل‌های صورت گرفته در این تحقیق از مثال‌های حل شده در پیوست E آیین‌نامه DoD استفاده شده است. در این پیوست، یک سازه با مشخصات معلوم، طی سناریوهای مختلف (حذف ستون‌های مختلف در شکل 2) و با سه روش تحلیلی استاتیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی با استفاده از نرم افزار SAP2000ver.14 مورد ارزیابی قرار گرفت. به عنوان نمونه

دینامیکی غیرخطی سازه‌ها بر اساس آنها انجام شد و پاسخ ماکزیمم سازه (تغییر مکان سازه) در هر یک از چهار حالت تعیین شد. این چهار حالت عبارتند از:

الف - 0.01T

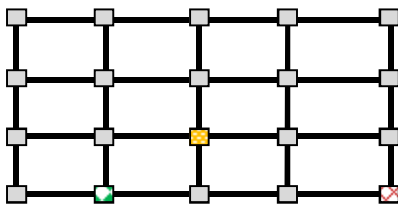
ب - 0.1T

ج - 0.5T

د - 0.9T

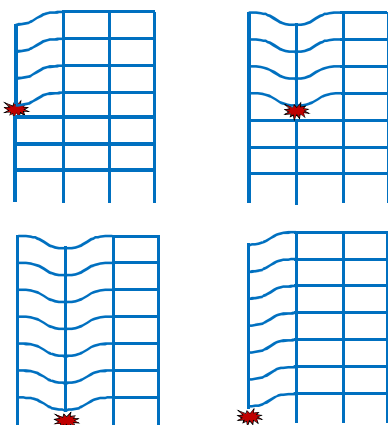
که T زمان تناوب قائم ارتعاش است.

در شکل‌های 5 و 6، پاسخ یک سازه 7 طبقه با دهانه 6 متری در موقعیت خرابی CF و حالت‌های بارگذاری الف تا د، به عنوان نمونه ارائه شده است. شکل 5 پاسخ سازه در نسبت‌های مختلف t_0 به T را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش مدت زمان باربرداری، پاسخ سازه‌ها شدیدتر خواهد شد.



- CF: ستون در موقعیت گوشه ساختمان
- EF: ستون در موقعیت لبه ساختمان
- MF: ستون در موقعیت میانی ساختمان

الف) موقعیت ستون‌ها در پلان



ب) موقعیت ستون‌ها در طبقات

شکل 4- تقسیم بندی موقعیت تخریب ستون

تقسیم‌بندی می‌شوند. موقعیت هر یک از این گروه‌ها در پلان، در شکل 4-الف و موقعیت ارتفاعی هر یک از این تخریب‌ها در شکل 4-ب آمده است. در مجموع به بررسی چهل مدل ساختمانی قاب خمشی فولادی، پرداخته شده است. این سازه‌ها با تعداد طبقات 3، 5، 7 و 10 طبقه با تعداد دهانه‌های 3 و 5 تقسیم‌بندی شده‌اند و به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، تنوع طولی دهانه‌ها در هر یک از مدل‌های مورد بررسی در حالت 4، 5، 6، 7 و 8 متری، مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارتفاع طبقات در همه مدل‌ها یکسان و برابر با $3/4$ متر در نظر گرفته شده است. تمامی مدل‌های مورد بررسی بر مبنای آیین‌نامه بارگذاری ایران [9]، بارگذاری و بر مبنای آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی ایران طراحی شده‌اند [10]. این سازه‌ها برای منطقه با خطر زلزله خیلی زیاد و خاک نوع سه طراحی شده‌اند. بارگذاری ثقیلی برای تمامی ساختمان‌ها در طبقات برابر 600 دکانیوتن بر مترمربع و بار زنده متناسب با کاربری مسکونی در نظر گرفته شده است. بار مرده بام، مشابه بار مرده طبقات و بار زنده آن برابر با 150 دکانیوتن بر مترمربع مد نظر قرار گرفته است. مشخصات هندسه قاب‌ها در دو جهت عمود بر هم در پلان مشابه در نظر گرفته شده است. در مجموع 360 حالت خرابی برای هر یک از حالت‌های تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفت است.

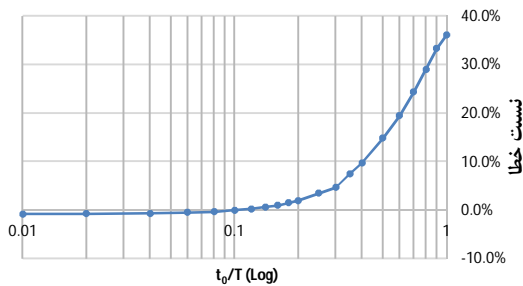
4- بررسی تاثیر سرعت باربرداری بر پاسخ سازه

از آنجا که در تحلیل خرابی پیشرونده، باربرداری متأثر از حذف ستون به صورت ضربه می‌باشد (شکل 1)، نتایج حاصل از تحلیل سازه به مدت زمان حذف ستون وابسته است. لذا محاسبه این زمان از اهمیت زیادی برخوردار است. در صورتی که مدت این باربرداری زیاد باشد، پاسخ‌های سازه به رفتار تحلیل استاتیکی نزدیک می‌شود. از سوی دیگر با کاهش بیش از حد این مدت زمان، هزینه و زمان تحلیل استاتیکی غیرخطی تاریخچه زمانی افزایش پیدا می‌کند و این در حالی است که با کاهش بیش از اندازه زمان باربرداری، تغییر شکل‌های سازه تقریباً ثابت می‌ماند. این موضوع در تمامی سازه‌های مورد ارزیابی کاملاً مشهود می‌باشد.

برای بررسی تاثیر مدت زمان حذف ستون، چهار حالت زمانی برای مدت زمان بارگذاری در نظر گرفته شد و تحلیل

ادعا کرد حساسیت سازه‌ها در محدوده یک دهم پریود قائم ارتعاشی ($0.1T$) ناچیز است.

از شکل‌های 5 تا 7 می‌توان نتیجه گرفت که مدت زمان پیشنهادی در آئین‌نامه‌های DoD و GSA ناظر به بیشترین پاسخ سازه است و محافظه‌کارانه محسوب می‌شود. در نظر نگرفتن زمان‌های کوتاه‌تر خطای قابل ملاحظه‌ای ایجاد نخواهد کرد.



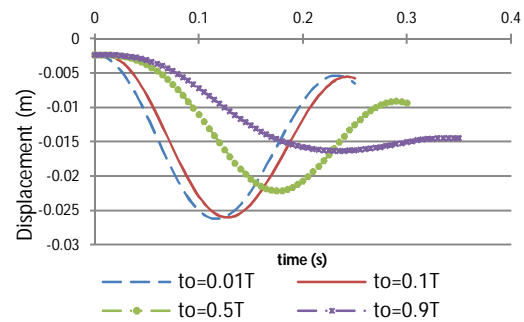
شکل 7- حساسیت تغییر مکان سازه نسبت به تغییر مکان حاصل از یک‌دهم پریود قائم ارتعاشی

5- ارائه رابطه پیشنهادی برای پریود قائم ارتعاشی

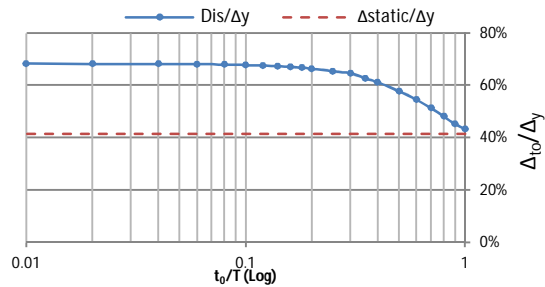
پریود ارتعاشی (T) در واقع بیان‌کننده خصوصیات فیزیکی و رفتاری سیستم در مقابل حرکت دینامیکی می‌باشد و چون رابطه معکوس با سختی دارد، پس بیان دیگری از سختی است. تعیین مشخصه‌های ارتعاشی شامل فرکانس‌ها و مدهای طبیعی یک سازه نیاز به حل ماتریس مساله مقدار ویژه دارد. برای محاسبه پریود ارتعاشی سازه‌ها دو رابطه Rayleigh-Ritz و Rayleigh موجود است [11].

همانطور که اشاره شد، به منظور تحلیل خرابی پیشرونده به روش دینامیکی غیرخطی، نیاز به محاسبه پریود قائم ارتعاشی محل عضو حذف شده می‌باشد. از آنجا که محاسبه این پریود ارتعاشی به منظور تعیین پاسخ‌های سازه بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است، بدست آوردن رابطه‌ای ساده و با میزان دقت بالا، می‌تواند برای کاهش زمان این محاسبه، بسیار راهگشا و کاربردی باشد. به منظور محاسبه پریود ارتجاعی از نرم افزار SAP2000-ver14.2 استفاده شده است [12]. از آنجایی که پریود ارتجاعی به دو عامل اصلی، جرم و سختی بستگی دارد، در این تحقیق به بررسی عوامل

شکل 6 حاصل حداکثر نشست سازه مذکور در نسبت‌های مختلف t_0 به T را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر این نمودار بیانگر نسبت بیشترین تغییر مکان به تغییر مکان تسلیم (Δy)، گره، در نسبت‌های مختلف t_0 به T می‌باشد. t_0 مدت زمان باربرداری، T پریود قائم ارتعاشی سازه در محل حذف ستون است. در شکل 6 برای نمایش بهتر به دلیل گسترده بودن اطلاعات در محور افقی از مقیاس لگاریتمی استفاده شده است. لازم به ذکر است، روند تغییرات $\Delta/\Delta y$ به t_0/T برای تمامی حالت‌های خرابی و در سازه‌های مختلف مشابه می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه هر چه مدت زمان باربرداری کمتر باشد، عکس‌العمل سازه شدیدتر خواهد بود ولی این مقدار برای مدت زمان کمتر از زمان $0.1T$ چندان تفاوت محسوس نخواهد داشت.



شکل 5- پاسخ سازه در نسبت‌های مختلف زمان باربرداری



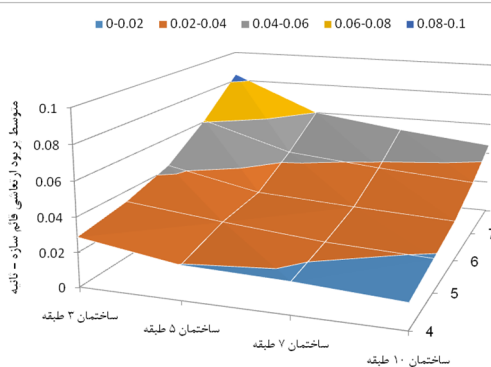
شکل 6- بیشترین پاسخ سازه نسبت‌های مختلف زمان باربرداری

شکل 7 میزان تغییرات $\frac{\Delta_{t_0}}{\Delta_y}$ را در t_0 های مختلف بر حسب نشان $\frac{\Delta_{0.1T}}{\Delta_y}$ نشان می‌دهد. این شکل در واقع بیانگر میزان خطای Δ_{t_0} های مختلف به $\Delta_{0.1}$ می‌باشد. با توجه به شکل 7، می‌توان

برای هر حالت سازه، زمان تناوب به کمک نرم‌افزار تعیین شد. با توجه به تعدد سازه‌های مورد ارزیابی، از متوسط مقادیر پیروید قائم ارتعاشی در سازه‌های تحلیل شده استفاده شده است. همچنین بر اساس زمان تناوب به دست آمده مدت زمان اعمال بار بر اساس آئین نامه DoD در جدول 2 ارائه شده است. در این جدول L طول دهانه می‌باشد. مقادیر بدست آمده در جدول 2 در شکل 9 به صورت تصویری به نمایش درآمده است.

جدول 2- متوسط زمان باربرداری (0.1T) بر حسب تانیه

طول دهانه	L=4	L=5	L=6	L=7	L=8
3 طبقه	0.0287	0.0337	0.0425	0.0609	0.0840
5 طبقه	0.0198	0.0274	0.0304	0.0436	0.0600
7 طبقه	0.0182	0.0220	0.0270	0.0379	0.0519
10 طبقه	0.0148	0.0194	0.0242	0.0335	0.0455



شکل 9- مقادیر زمان باربرداری با توجه به طول دهانه و تعداد طبقات

با توجه به شکل 9، زمان باربرداری (و یا همان زمان تناوب) به تغییرات دو پارامتر طول دهانه و تعداد طبقات وابستگی زیادی دارد. برای بررسی هر یک از این وابستگی‌ها به صورت مجزا می‌بایست نمودار تغییرات هر یک از آنها را رسم نمود. شکل 10 بیانگر میزان تغییرات متوسط پیروید قائم ارتعاشی به طول دهانه در تعداد طبقات مختلف می‌باشد. همانطور که مشخص است با افزایش تعداد طبقات نسبت تاثیر تغییرات سختی (افزایش نامعینی) به جرم بیشتر شده است. لذا پیروید قائم ارتعاشی و در نتیجه، زمان باربرداری کاهش می‌یابد. نرخ این تغییرات به صورت تابع درجه 2 است.

تاثیرگذار بر این دو عامل پرداخته شده است. این موارد به شرح ذیل می‌باشد:

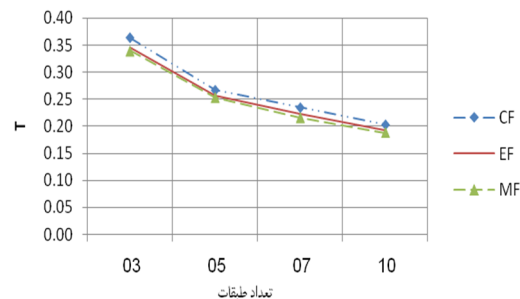
- مقدار بارگذاری (عامل جرم)
- موقعیت خرابی (عامل سختی)
- طول دهانه‌ها (عامل سختی)
- تعداد طبقات (عامل سختی و جرم)

5-1- تاثیر مقدار بارگذاری

از آنجا که مدل‌های مورد استفاده، سازه‌های متعارف (مسکونی) می‌باشد و همچنین اعضای سازه‌ای متناسب با بارهای وارده طراحی می‌شوند، عامل جرم ثابت بوده و می‌توان از این عامل صرفه نظر کرد.

5-2- تاثیر موقعیت خرابی ستون

برای بررسی حساسیت پیروید ارتعاشی نسبت به موقعیت خرابی، میزان پیرویدهای ارتعاشی در سه حالت معرفی شده در شکل 4 الف، مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در شکل 8 مشخص است، پیروید قائم ارتعاشی سازه‌ها در موقعیت‌های مختلف خرابی در طبقات، تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل 8- حساسیت سازه نسبت موقعیت خرابی

5-3- تاثیر طول دهانه و تعداد طبقات

تعداد طبقات و طول دهانه به عنوان عوامل اصلی تعیین کننده پیروید قائم ارتعاشی سازه شناخته می‌شوند. برای بررسی تاثیر این عوامل، پاسخ سازه‌ها در حالت‌های مختلف برای طول دهانه و تعداد طبقات بررسی شده است. در این تحقیق طول دهانه‌های قاب برابر 4 تا 8 متر در نظر گرفته شد. همچنین تعداد طبقات 3 تا 10 برای بررسی تعداد طبقات بر زمان تناوب در نظر گرفته شد.

جدول 3- مقادیر a و b بر حسب طول دهانه

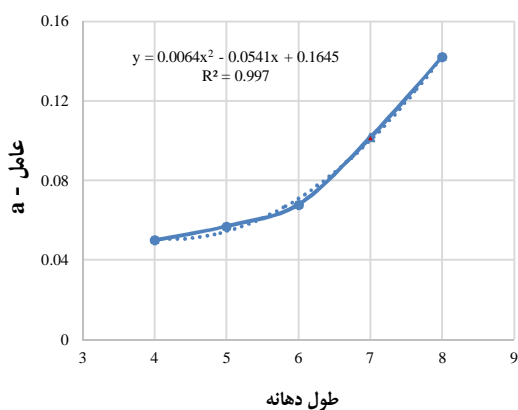
طول دهانه (m)	function	R ²	a-factor	b-factor
4	$0.05X^{-0.531}$	0.972	0.05	-0.53
5	$0.057X^{-0.472}$	0.989	0.06	-0.47
6	$0.068X^{-0.468}$	0.963	0.07	-0.47
7	$0.101X^{-0.497}$	0.976	0.10	-0.50
8	$0.142X^{-0.509}$	0.979	0.14	-0.51

در شکل‌های 12 و 13 نحوه‌ی تغییرات عامل‌های a و b بر حسب طول دهانه ارائه شده است. یعنی مقادیر ارائه شده در جدول 3 به صورت منحنی رسم شده است. در شکل 12 محور افقی طول دهانه (ستون اول از سمت راست در جدول 3) است و محور قائم مقدار ضریب a (ستون چهارم در جدول 3) است. همچنین در شکل 13 محور افقی طول دهانه (ستون اول از سمت راست در جدول 3) است و محور قائم مقدار ضریب b (ستون پنجم در جدول 3) است. در صورتیکه محاسبه مقادیر a و b برای تعداد دهانه‌های دیگر مد نظر باشد می‌توان به ترتیب از روابط پیشنهادی 2 و 3 استفاده نمود.

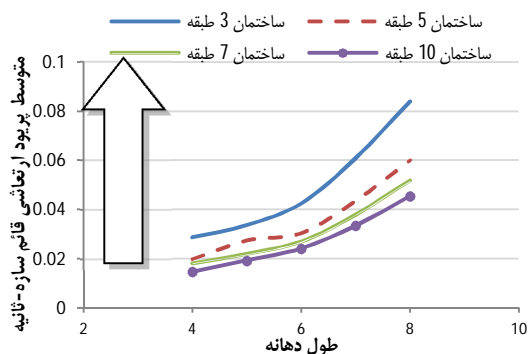
$$a = 0.006 * L^2 - 0.0541 * L + 0.164 \quad (2)$$

$$b = 0.006 * L^3 - 0.121 * L^2 + 0.78 * L - 2.11 \quad (3)$$

که در آنها L طول تیر بر حسب متر است.

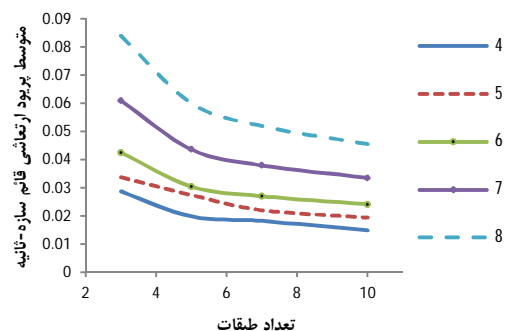


شکل 12- تغییرات مقادیر a نسبت به طول دهانه



شکل 10- تغییرات پریود قائم ارتعاشی به طول دهانه

همچنین اگر تغییرات پریود قائم ارتعاشی بر حسب تعداد طبقات، برای طول دهانه‌های مختلف رسم شود، شکل 11 حاصل خواهد شد. در این شکل محور افقی تعداد طبقات و محور قائم زمان تناوب قائم ارتعاشی است.



شکل 11- مقایسه بین متوسط پریود قائم ارتعاشی به تعداد طبقات

با توجه به شکل‌های 10 و 11 می‌توان تغییرات زمان تناوب قائم ارتعاشی بر حسب تعداد طبقات (ارتفاع سازه) و طول دهانه را به صورت رابطه (1) بیان کرد.

$$T = a.H^b \quad (1)$$

در این رابطه H ارتفاع سازه است که تغییرات زمان تناوب بر حسب تعداد طبقات را تنظیم می‌کند و دو ضریب a و b ضرایب وابسته به طول دهانه هستند که تغییرات زمان تناوب قائم بر حسب طول دهانه را اعمال می‌کنند. در جدول 3 مقادیر a و b که بر اساس برازش انجام شده بر روی منحنی‌های مربوطه تعیین گردیده، ارائه شده است.

در مطالعه دوم، سازه‌هایی خارج از موارد مطرح شده در این مقاله، طراحی شد و پریود قائم ارتعاشی آنها استخراج شد و در نهایت مقادیر بدست آمده با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی مقایسه گردید. جدول 4 نشان دهنده میزان خطای (ΔT) در این دو حالت است. در این جدول L_n طول تیرهای متصل به ستون می‌باشد.

جدول 4- میزان خطای رابطه پیشنهادی برای تعیین پریود

قائم ارتعاشی							
ΔT	محل خرابی	H	متوسط طول تیر	L_4	L_3	L_2	L_1
3.8%	CF	6	6.75	-	-	7.5	6
3.2%	EF	8	5.17	-	4	4.5	7
0.6%	MF	9	7	8	6.5	6	7.5

8- نتیجه گیری

هدف این تحقیق ارزیابی تاثیر مدت زمان حذف ستون بر پاسخ سازه و همچنین ارائه رابطه ساده برای تعیین زمان تناوب قائم سازه در محل گره فوقانی ستون حذف شده است. برای این منظور، چهل مدل ساختمانی با قاب خمشی فولادی انتخاب شد و اهداف تحقیق برای آن بررسی شد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی سازه‌های فولادی و ارزیابی آنها در برابر خرابی پیشرونده به روش مسیر بار جایگزین، نتایج ذیل حاصل شد:

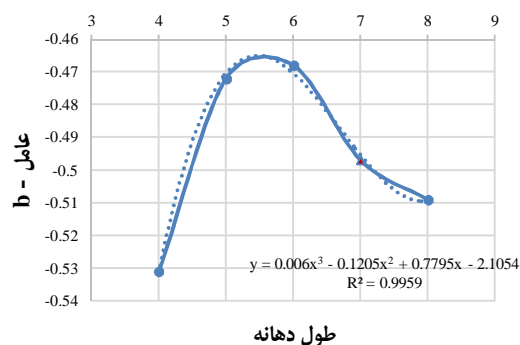
1- در تحلیل دینامیکی غیرخطی، بیشترین اثر دینامیکی وقتی حاصل می‌شود که زمان باربرداری ناشی از حذف ستون برابر یک‌دهم پریود قائم ارتعاشی گره فوقانی محل حذف ستون در نظر گرفته شود.

2- تعداد دهانه‌های مجاور به ستون حذف شده و موقعیت محل خرابی، تاثیری بر مقدار زمان تناوب عمودی سازه‌های فولادی ندارد.

3- طول دهانه‌های متصل شده به گره ستون حذف شده، تاثیر بسزایی بر پریود قائم ارتعاشی سازه دارد.

4- تعداد طبقات ساختمان تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار زمان تناوب قائم دارد.

5- رابطه‌ی پیشنهادی در این تحقیق از دقت خوبی برخوردار بوده و مستقل از منظم بودن طول تیرها در دو طرف ستون حذف شده می‌باشد.



شکل 13- تغییرات مقادیر b نسبت به طول دهانه

6- مزایای رابطه پیشنهادی

برخی از مزایای رابطه پیشنهادی به شرح ذیل است:

1- سرعت بالای محاسبه مقادیر پریود قائم ارتعاشی
2- کاهش تعداد تحلیل‌ها در خرابی پیشرونده به دلیل حذف شدن تحلیل اولیه که صرفاً به منظور محاسبه پریود قائم ارتعاشی انجام می‌شود.

رابطه مذکور مستقل از منظم بودن طول تیرها در دو طرف ستون می‌باشد. اگر طول تیرهای متصل به ستون در دو طرف متفاوت باشد، می‌توان با متوسط‌گیری از طول تیرها، از این رابطه استفاده نمود.

این رابطه برای ساختمان‌های با قاب خمشی فولادی کاربرد دارد و برای سایر سیستم‌های سازه‌ای، می‌بایست روابط جداگانه‌ای ارائه شود. همچنین این روابط برای ساختمان‌های متعارف پیشنهاد شده و بارگذاری‌های سازه در آنها مد نظر قرار نگرفته است.

7- مطالعه موردی

برای بررسی دقت رابطه پیشنهادی، دو مطالعه موردی انجام شد.

در مطالعه اول، یک سازه جدید، با دهانه 7 متر، طراحی شد و به کمک نرم‌افزار، مقدار پریود قائم ارتعاشی آن تعیین شد. آنگاه پریود قائم ارتعاشی آن از رابطه پیشنهادی به دست آمد. نتایج حاکی است که اختلاف پریود ارتعاشی حاصل از تحلیل با مقدار محاسبه شده از رابطه پیشنهادی ناچیز است. این مقدار در اشکال 12 و 13 با نشانه مثلث مشخص شده است.

- مراجع**
- [7] Tsai M (2011) Analytical load and dynamic increase factors for progressive collapse analysis of building frames. American Society of Civil Engineers, AEI: 172–179.
- [8] Khandelwal K, El-Tawil S (2011) Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis. *Engineering Structures* 33: 2653–2661.
- [9] وزارت مسکن و شهرسازی (1388) دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم، بارهای وارده بر ساختمان.
- [10] وزارت مسکن و شهرسازی (1388) دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی.
- [11] Chopra AK (2012), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [12] CSI (2010) *Analysis reference manual for Sap2000*, Berkeley-California, USA.
- [1] UFC, Unified Facilities Criteria (2013) Design of buildings to resist progressive collapse (UFC4-023-03). Washington (DC), Department of Defense.
- [2] GSA (2003) Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. Washington (DC), US General Service Administration.
- [3] Kim J, Kim T (2009) Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames. *Journal of Constructional Steel Research* 65: 169–179.
- [4] Kokot S, Anthoine A, Negro P, Solomos G (2012) Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse. *Engineering Structures* 40: 205–217.
- [5] Santafé Iribarren B, Berk P, Bouillard Ph, Vantommea J, Massart TJ (2011) Investigation of the influence of design and material parameters in the progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Structures* 33: 2805–2820.
- [6] Liu M (2011) Progressive collapse design of seismic steel frames using structural optimization. *Constructional Steel Research* 67: 322–332.