



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Sensitivity analysis of RC frame failure time in fire conditions after removal column under progressive collapse

Majid Moradi¹, HamidReza Tavakoli^{2*}, GholamReza Abdollahzade²

1- PHD Student, Department of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Consecutive loads can be a serious threat to the safety of structures. Abrupt removal of elemental elements such as columns is one of the causes of progressive failure in structures. The local breakdown caused by the sudden removal of the column can affect the behavior of the structures of successive courts. One of the loads that threatens the safety of the structure over the life of the structure is the fire. When a structure can withstand the load, one of the main factors in the safety of structures against thermal loads. Local loopholes in the structure, including the sudden removal of barrier elements, can affect the stability of structures against fire load as two successive events. In this research, the susceptibility of the RC frame to the stability of the continuous loading of the column and the subsequent fire is compared to the random variables. The 7-story concrete frame is modeled after mechanical design and is subject to the sudden removal of the column in different situations. Several parameters have been considered as random variables, and two methods of Monte Carlo and second-order second-order sensitivity analysis (FOSM) have been used for sensitivity analysis. Sensitivity analysis in a concrete frame for the analysis of dynamic duct and thermal analysis has been done separately. The results show that in the sudden removal of the column, the dead load, and in the subsequent fire scenario, the dead load and reinforcement coatings have the most sensitivity to other parameters. Also, the maximum sensitivity error of the FOSM method was calculated to be 11% compared to the Monte Carlo method.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 May 2019

Revise Date: 20 May 2021

Accept Date: 01 June 2019

Keywords:

Progressive collapse

Fire

Failure time

Sensitivity analysis

Uncertainty

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.183958.1850

*Corresponding author: HamidReza Tavakoli

Email address: tavakoli@nit.ac.ir

تحلیل حساسیت زمان گسیختگی قاب بتن آرمه در شرایط آتش سوزی پس از حذف

ستون تحت خرابی پیش‌رونده

مجید مرادی^{۱*}، حمیدرضا توکلی^۲ و غلامرضا عبدالله زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

بارهای متوالی می‌تواند تهدیدی جدی برای ایمنی سازه‌ها باشد. حذف ناگهانی المان‌های باربر مانند ستون یکی از عوامل ایجاد خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها می‌باشد. خرابی موضعی ناشی از حذف ناگهانی ستون می‌تواند بر رفتار سازه در بارهای متوالی تأثیرگذار باشد. یکی از بارهایی که ایمنی سازه را در طول عمر سازه تهدید می‌کند بار آتش است. زمانی که یک سازه می‌تواند در برابر بار آتش مقاومت کند یکی از فاکتورهای اصلی در ایمنی سازه‌ها در برابر بارهای حرارتی است. خرابی‌های موضعی موجود در سازه از جمله حذف ناگهانی المان‌های باربر می‌تواند بر پایداری سازه‌ها در برابر بار آتش به‌عنوان دو رویداد متوالی تأثیرگذار باشد. در این تحقیق سعی شده است حساسیت زمان پایداری قاب بتن آرمه در بارگذاری متوالی حذف ناگهانی ستون و آتش‌سوزی پس‌از آن نسبت به متغیرهای تصادفی بررسی شود. قاب بتن آرمه ۷ طبقه پس از طراحی به‌صورت مکانیکی-حرارتی مدل‌سازی شده و در معرض حذف ناگهانی ستون در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته است. چندین پارامتر به‌عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است و دو روش مونت کارلو و تحلیل حساسیت مرتبه اول ممان دوم (FOSM) برای انجام تحلیل حساسیت بکار گرفته شده است. تحلیل حساسیت در قاب بتن آرمه برای تحلیل پوشش دان دینامیکی و تحلیل حرارتی پس‌از آن به‌صورت مجزا انجام شده است. نتایج نشان داده است در سناریوی حذف ناگهانی ستون، بار مرده و در سناریوی آتش‌سوزی پس از آن، بار مرده و پوشش آرماتورها بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها ایجاد کرده‌اند. همچنین حداکثر خطای تحلیل حساسیت به روش FOSM نسبت به روش مونت کارلو برابر با ۱۱٪ محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: خرابی پیش‌رونده، آتش‌سوزی، زمان گسیختگی، تحلیل حساسیت، عدم قطعیت

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.183958.1850	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.183958.1850	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۱۱	۱۳۹۸/۰۳/۱۱	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۱۱
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حمیدرضا توکلی		
				tavakoli@nit.ac.ir		

۱- مقدمه

ایمنی سازه همواره تمایل کلیدی برای مهندسان طراح پروژه‌های مهندسی بوده است. یکی از مکانیسم‌های خرابی سازه که توجه زیادی را در دهه‌های اخیر به خود اختصاص داده است خرابی پیش‌رونده می‌باشد [۱]. یک یا چند عضو سازه‌ای به دلیلی خراب می‌شوند و هر باز توزیع باری باعث خرابی دیگر المان‌های سازه‌ای می‌شود و ساختمان به‌طور پیش‌رونده منهدم می‌شود [۲]. به‌طور کلی ساختمان‌ها برای شرایط بارگذاری با احتساب آتش، انفجارهای گاز، انفجارهای بمب، برخوردهای وسایل نقلیه، تصادم‌های هواپیما، طوفان، گردباد و از این قبیل بارها طراحی نمی‌شوند [۳]. از این‌رو زمانی که ساختمان‌ها در معرض چنین بارهای غیرمعمولی قرار می‌گیرند، ممکن است متحمل آسیب‌های بزرگی شوند [۴]. ساختمان‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند خرابی موضعی را با یکپارچه کردن اعضای سازه‌ای، بهبود بازپخش انرژی و توزیع مجدد بارها (با ایجاد مسیرهای جایگزین انتقال بار) محدود نموده و در مقابله با بارهای غیرمعمول مقاومت کنند [۵]. توجه جامعه مهندسی در ابتدا بعد از انهدام بخشی از ساختمان رونان پوینت^۱ در لندن در سال ۱۹۶۸ به این موضوع معطوف شد و بعد از حوادث ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، چندین کمیته استانداردسازی جهت بهبود استانداردهای روش‌های طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده شروع بکار کردند [۶]. بعد از وقوع حملات تروریستی، خصوصاً در برج‌های دوقلوی تجارت جهانی، مسئله ارزیابی و بررسی پتانسیل وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بااهمیت به یکی از محورهای تحقیقاتی تبدیل شده است. این پدیده همچنین می‌تواند برای سازه‌های طراحی شده بر اساس آئین‌نامه‌های جاری، حین رخداد زلزله‌های شدید مشکلاتی را به وجود آورد و حتی منجر به ویرانی کل سازه گردد. به عبارت دیگر، هر گونه ضعف در طراحی و یا اجرای المان‌های سازه‌ای ممکن است باعث به وجود آمدن پدیده خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها حین بارگذاری انفجار و یا لرزه‌ای گردد. برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در اثر بارهای غیرمعمول، آیین‌نامه ملی کانادا الزاماتی را برای طراحی المان‌های اصلی، اتصال المان‌ها و روش‌های ایجاد مسیرهای انتقال بار تعیین کرد. اداره سرویس عمومی آمریکا^۲ (GSA) [7] آیین‌نامه‌ای کاربردی جهت طراحی به‌منظور کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده ساختمان‌های فدرال ارائه داد. همچنین وزارت دفاع آمریکا^۳ (DOD) آیین‌نامه‌ای برای روش‌های طراحی ساختمان‌های DOD موجود ارائه داد [8]. تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر در زمینه‌ی خرابی پیش‌رونده انجام شده است که در ادامه به‌صورت خلاصه به چند نمونه از آن اشاره شده است. امیری و همکاران (۲۰۱۸) فاکتورهای افزایش فاکتور دینامیکی را در تحلیل خرابی پیش‌رونده‌ی قاب‌های بتن‌آرمه بررسی کرده‌اند [۹]. سوندو^۴ و همکاران (۲۰۱۹) رفتار قاب‌های فولادی در معرض بار آتش را در بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله بررسی کرده‌اند [۱۰]. کین^۵ و همکاران (۲۰۱۹) رفتار قاب‌های فولادی را در بارگذاری آتش‌سوزی تحت شرایط خرابی پیش‌رونده بررسی کرده‌اند [۱۱]. جیانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت قاب‌های فولادی تحت بارگذاری آتش موضعی تحت شرایط خرابی پیش‌رونده بررسی نمودند [۱۲].

در حوادث ۱۱ سپتامبر برخورد هواپیماهای تروریستی به برج‌های دوقلو باعث از بین رفتن المان‌های باربر در محل برخورد شده و سپس آتش‌سوزی ناشی از آن باعث ایجاد خرابی پیش‌رونده در دو ساختمان شده است. حذف المان‌های باربر و آتش‌سوزی پس از آن باعث شده پایداری سازه از بین رفته و المان‌های باربر در طبقات آسیب‌دیده ظرفیت خود را از دست داده و سازه به سمت خرابی پیش‌رونده پیش رود [۱۳]. یکی از روش‌های ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده روش مسیر بار جایگزین می‌باشد. در این روش فرض می‌شود المانی از سازه حذف شده و المان‌های مجاور باید بتواند باز توزیع نیروها را تحمل کرده و پایداری مجدد در سازه را ایجاد نمایند. حذف ناگهانی ستون مهم‌ترین روش در ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده و بررسی پاسخ سازه در این سناریو می‌باشد. ظرفیت سازه در برابر حذف ناگهانی ستون معمولاً با استفاده از تحلیل پوش دان استاتیکی و پاسخ دینامیکی سازه به حذف ناگهانی ستون با استفاده از تحلیل پوش دان دینامیکی ارزیابی می‌شود [۱۴].

¹ Ronan Point

² General Service Administration

³ Department of Defense

⁴ Suwondo

⁵ Qin

⁶ Jiang

در این تحقیق رفتار و حساسیت قاب ۷ طبقه‌ی بتن‌آرمه تحت بارگذاری آتش بعد از حذف ناگهانی ستون در شرایط خرابی پیش‌رونده ارزیابی شده است. در واقع فرض شده است قاب بتن‌آرمه تحت اثر یک نیروی خارجی یکی از ستون‌های میانی خود را از دست داده و بلافاصله در اثر این نیروی خارجی آتش‌سوزی رخ داده است. جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف‌شده به‌عنوان پاسخ سازه به حذف ناگهانی ستون و زمان اولین گسیختگی در اثر بار آتش به‌عنوان ظرفیت سازه در برابر بار آتش‌سوزی بعد از حذف ستون در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی حذف ناگهانی ستون از روش پوش دان دینامیکی و برای بار آتش از منحنی دما-زمان ISO 834 استفاده شده است. در ادامه نحوه‌ی مدل‌سازی و تحلیل این قاب بحث شده است.

۱-۲- روش تحقیق

۱-۲-۱ تحلیل حساسیت

روش‌های مختلفی برای ارزیابی حساسیت سازه نسبت به پارامترهای مورد نظر مهندسی وجود دارد. سه روش: مونت‌کارلو (MCS)، دیگرام تورنادو و FOSM پرکاربردترین این روش‌ها در ارزیابی حساسیت سازه‌ها هستند. MCS یکی از روش‌های عمیق در مسائل مربوط به تحلیل عدم قطعیت و تحلیل احتمالاتی است. در این روش متغیر تصادفی به‌صورت مجموعه‌ای از مقادیر تعیینی تعریف می‌شود. این مجموعه‌ی داده‌های ورودی مجموعه‌ای از خروجی تعیینی را نتیجه می‌دهند. در نهایت شکل احتمالاتی خروجی‌ها محاسبه و ارائه می‌شود. به علت دقت بالا معمولاً از روش MCS برای صحت‌سنجی سایر روش‌های احتمالاتی استفاده می‌شود [۱۵ و ۱۶]. استفاده از روش MCS بسیار زمان‌بر است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی حساسیت سازه نسبت به پارامترهای مورد نظر مهندسی وجود دارد. یکی از این روش‌ها روش تحلیل مرتبه‌ی اول ممان دوم^۷ (FOSM) است. در روش FOSM تنها میانگین و انحراف معیار (SD) متغیرهای تصادفی بر اساس توزیع خود فرض می‌شوند. میانگین و SD پاسخ‌ها اندازه‌گیری می‌شود. انحراف معیار این روش می‌تواند معیاری برای حساسیت‌سنجی محسوب شد. مزیت اصلی روش FOSM این است که با وجود ساده‌تر بودن روند تحلیل در آن نسبت به سایر روش‌ها، مشخصات احتمالاتی پاسخ‌های سازه قابل حاصل شدن هستند [۱۵]. در واقع این روش علی‌رغم سادگی دقت بالایی در تعیین میانگین و انحراف معیار پاسخ سازه دارد. در این روش $Y=g(X)$ به‌عنوان تابعی با متغیر تصادفی X دارای میانگین μ_X و واریانس σ_x^2 در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه مشتقات $g(x)$ نسبت به x موجود است تقریب مرتبه‌ی اول از $g(x)$ با استفاده از بست سری تیلر در نقطه‌ی x_0 به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه (۱)).

$$Y \approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0) \quad (1)$$

ممان مرتبه‌ی اول و دوم Y (یعنی میانگین و واریانس) می‌توانند از رابطه‌ی (۱) محاسبه شوند. که این تقریب روش FOSM نامیده می‌شود. به‌طور خاص اگر $x_0 = \mu_x$ (این یک انتخاب معمول در روش FOSM است) میانگین و واریانس از طریق روابط (۲) محاسبه می‌شوند:

$$\mu_Y = g(\mu_X) \quad (2)$$

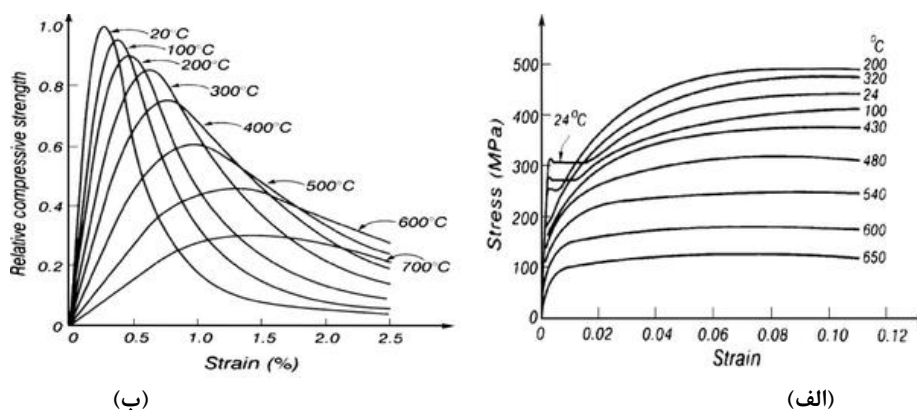
$$\sigma_Y^2 \approx \left(\frac{dg}{dx}\right)_0^2 \sigma_X^2 \quad (3)$$

این تقریب روش مقدار میانگین FOSM نامیده می‌شود. که می‌توان با استفاده از آن مقدار میانگین و واریانس (و انحراف معیار) را پاسخ را تخمین زد. توضیحات کاملی در مورد چگونگی انجام تحلیل حساسیت به روش FOSM در مرجع [۱۵] موجود است.

⁷ First-Order Second Moment (FOSM)

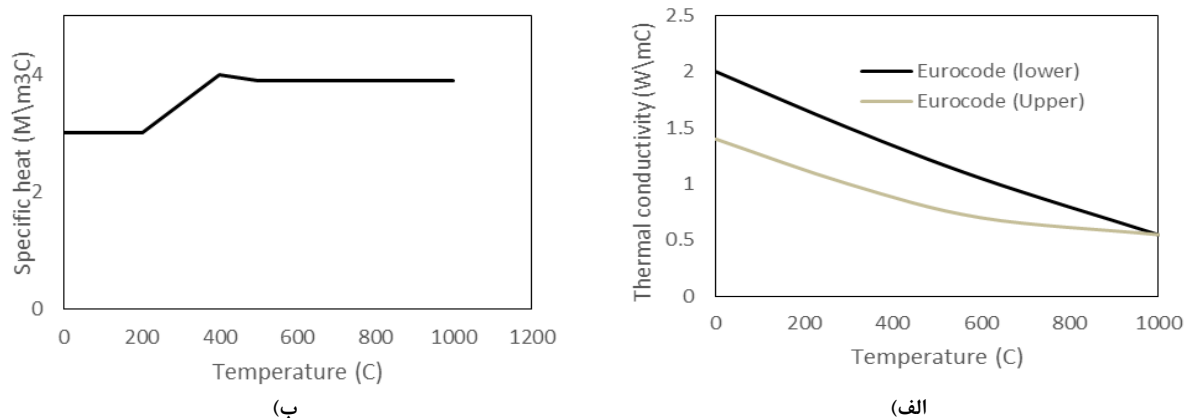
۲-۲ مشخصات مکانیکی حرارتی مصالح

خواص مکانیکی و حرارتی بتن و فولاد در اثر حرارت دچار تغییر می‌شوند. خواص حرارتی باعث انتقال حرارت از المان در معرض آتش به سایر المان‌های سازه‌ای می‌شود در حالی که خواص مکانیکی باعث از دست دادن سختی و مقاومت در اعضای سازه‌ای می‌شود [۱۸] و [۱۷]. خواص مکانیکی شامل کاهش مقاومت فشاری و کششی، افزایش کرنش و کاهش سختی در مصالح بتنی و آرماتور می‌شود. رفتار مصالح آرماتور (فولاد) و بتن در برابر بار حرارتی متفاوت است. در شکل ۱ تغییرات تنش فشاری بتن و آرماتور در دماهای بالا بر اساس یورو کد ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱: منحنی تنش کرنش در دماهای مختلف الف) فولاد ب) بتن [۱۷ و ۱۸]

خواص حرارتی به گرمای ویژه و هدایت گرمایی تقسیم می‌شود. هدایت گرمایی در فولاد بیشتر و در بتن کمتر است. گرمای ویژه در فولاد نسبت به بتن کمتر است بنابراین انتقال حرارت در فولاد سریع‌تر از بتن صورت می‌گیرد و افت مقاومت در فولاد سریع‌تر از بتن انجام می‌شود [۱۷]. در این تحقیق تحلیل انتقال حرارت در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است و پس از استخراج منحنی‌های دما-زمان در ارتفاع مقاطع، مدل‌سازی مکانیکی حرارتی در نرم‌افزار اپنسیس انجام شده است. در تحلیل انتقال حرارت در آباکوس خواص حرارتی بتن در نظر گرفته شده است. در مدل غیرخطی مکانیکی حرارتی در اپنسیس خواص مکانیکی مصالح بتنی و فولادی در نظر گرفته شده است. این تحقیق در روند تحلیل انتقال حرارتی از تأثیر آرماتورها در انتقال حرارت صرف‌نظر شده است. خواص حرارتی بتن در تحلیل انتقال حرارت بر اساس شکل ۲ تعریف شده است. برای خواص مکانیکی حرارتی از رفتار بتن و فولاد متناسب با استاندارد یورو کد استفاده شده است. مدل رفتاری مکانیکی حرارتی بتن و فولاد در نرم‌افزار اپنسیس در جدول ۱ نشان داده شده است.



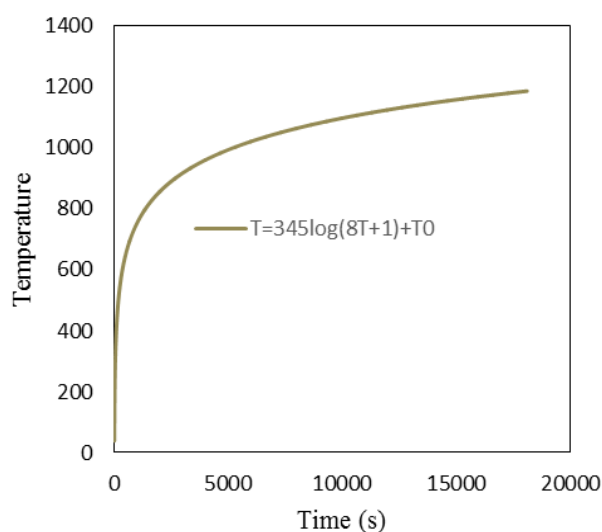
شکل ۲: مشخصات حرارتی بتن الف) هدایت گرمایی ب) گرمای ویژه [۱۷]

جدول ۱ مدل رفتاری بتن و فولاد در نرم‌افزاری اپنسیس

$\theta(^{\circ}C)$	Concrete02thermal			Steel02thermal		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c,\theta}$	$\epsilon_{cu,\theta}$	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$	$f_{sp,\theta} / f_{yk}$	$E_{s,\theta} / E_s$
20	1	0.0025	0.02	1	1	1
100	1	0.004	0.0225	1	0.96	1
200	0.95	0.0055	0.025	1	0.92	0.87
300	0.85	0.007	0.0275	1	0.81	0.72
400	0.75	0.01	0.03	0.94	0.63	0.56
500	0.6	0.015	0.0325	0.67	0.44	0.4
600	0.45	0.025	0.035	0.4	0.26	0.24
700	0.3	0.025	0.0375	0.12	0.08	0.08
800	0.15	0.025	0.04	0.11	0.06	0.06
900	0.08	0.025	0.0425	0.08	0.05	0.05
1000	0.04	0.025	0.045	0.05	0.03	0.03
1100	0.01	0.025	0.0475	0.03	0.02	0.02

۲-۳ الگوی بار حرارتی

روش‌های متعددی برای محاسبه‌ی دمای آزاد شده در طی فرایند آتش‌سوزی در یک محیط بسته وجود دارد [۱۹] تمامی این روش‌ها یک منحنی تاریخچه زمانی دما به نام منحنی زمان دما را ارائه می‌دهند. نمونه‌ای از این منحنی‌ها منحنی دما زمان ISO 834 و ASTM E119 هستند. در روش دیگر می‌توان بر اساس حجم گاز موجود منحنی‌های دما زمان آتش طبیعی را استخراج کرد. در هر دو مدل مرحله‌ی گسترش کامل آتش لحاظ می‌شود. در مرحله‌ی گسترش کامل آتش دمای محیط به یک‌باره و با شیب زیاد افزایش پیدا می‌کند و با گذشت زمان این شیب کم می‌شود. در این تحقیق از منحنی دما زمان ارائه شده توسط ISO 834 برای اعمال بار حرارتی به المان‌های سازه‌ای استفاده شده است. در این تحقیق فرض شده است بار حرارتی آن‌قدر به سازه اعمال می‌شود تا یک گسیختگی در سازه ایجاد شود. در واقع بارگذاری حرارتی در سازه آن‌قدر ادامه می‌یابد تا در یکی از المان‌های در معرض بار حرارتی گسیختگی ایجاد شود. در یک فرض اولیه بار حرارتی به مدل ۵ ساعت به سازه اعمال خواهد شد. منحنی دما زمان ISO 834 در مدت ۵ ساعت در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجایی که هدف اصلی این تحقیق ارزیابی میزان حساسیت مقاومت سازه در برابر بار آتش‌سوزی پس از حذف ستون است، از مدل‌های دارای فاز سرد شونده و مدل‌های آتش طبیعی صرف نظر شده است. در واقع در این تحقیق از حساسیت پاسخ سازه به بار آتش صرف نظر شده است تا بتوان مقاومت سازه در برابر آتش‌سوزی پس از حذف ستون را به‌درستی تعیین کرد.



شکل ۳: منحنی استاندارد دما زمان ISO 834

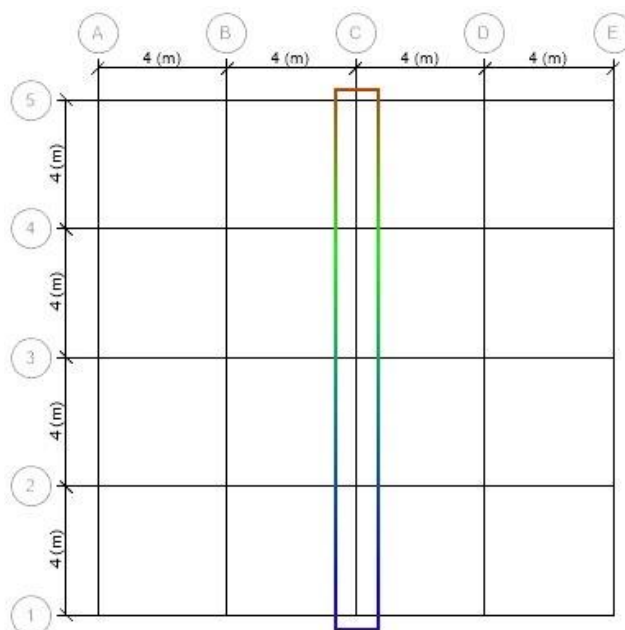
۲-۴ مسیر بار جایگزین

مهم‌ترین روش ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها استفاده از روش تحلیل پوش دان می‌باشد [۲۰]. روش انجام تحلیل پوش دان مبتنی بر روش مسیر بار جایگزین می‌باشد [۲۱]. در این روش المان مورد نظر از سازه حذف شده و المان‌های مجاور مجبور به تحمل اضافه‌بار ناشی از حذف المان می‌باشد. در صورتی که المان‌ها بتوانند اضافه‌بار را تحمل نمایند سازه پایدار بوده و در غیر این صورت خرابی به صورت پیش‌رونده در سازه اتفاق می‌افتد. تحلیل پوش دان به دو روش استاتیکی و دینامیکی قابل انجام است [۲۲]. در تحلیل پوش دان استاتیکی در ابتدا المان مورد نظر از سازه حذف شده و سپس بار ثقلی به ترکیب بار ارائه شده در استانداردها به صورت گام‌به‌گام به سازه اعمال شده و تغییر مکان قائم نقطه‌ی آسیب‌دیده نسبت به ضریب بار ثقلی اعمالی به عنوان منحنی پوش دان استاتیکی ارائه می‌شود. منحنی پوش دان استاتیکی ظرفیت سازه را در برابر بار ثقلی ناشی از حذف المان برابر نشان می‌دهد [۲۳]. در تحلیل پوش دان دینامیکی ابتدا بار ثقلی به صورت ترکیب بار موجود در استانداردها به مدت پنج ثانیه از صفر تا مقدار واقعی به سازه وارد می‌شود. در ادامه به مدت دو ثانیه بار ثقلی ثابت باقی می‌ماند تا ارتعاشات ناشی از بارگذاری مستهلک شود. پس از ثانیه‌ی هفتم المان مورد نظر از سازه حذف و ارتعاشات قائم نقطه‌ی بالای المان حذف شده نسبت به زمان به عنوان منحنی پوش دان دینامیکی در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. منحنی پوش دان دینامیکی پاسخ سازه را نسبت به حذف ناگهانی ستون نشان می‌دهد. در این تحقیق از روش تحلیل پوش دان دینامیکی استفاده شده است.

۳- مدل اجزاء محدود

۳-۱ طرح اولیه

همان‌طور که در بخش ۱ اشاره شده است برای این تحقیق از قاب دوبعدی ۷ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه برای انجام تحلیل‌های مکانیکی-حرارتی استفاده شده است. ابتدا یک سازه‌ی سه بعدی با پلان مربعی با ۴ دهانه‌ی ۴ متری (شکل ۴) مدل‌سازی و طراحی شد. ارتفاع طبقات در این تحقیق برابر با ۳ متر فرض شده است. برای طراحی سازه بار ثقلی مرده معادل 600 Kg/m^2 ، زنده معادل 200 Kg/m^2 و بار برف معادل 150 kg/m^2 در نظر گرفته شده است. برای اعمال بار جانبی مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران فرض شده است سازه‌ها در منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد با بیشینه شتاب $0.35g$ و زمین نوع سه قرار دارند. قاب بتن‌آرمه بر اساس استاندارد طراحی سازه‌های بتن‌آرمه‌ی ایران طراحی شده است. برای طراحی این قاب از بتنی با مقاومت ۲۸ روزه برابر 21 Mpa و آرماتوری با تنش تسلیم 240 Mpa و مدول الاستیسیته $2e5 \text{ Mpa}$ استفاده شده است. نتایج حاصل از طراحی سازه بر اساس مقاطع بتن‌آرمه در جدول ۲ نشان داده شده است. پس از طراحی، قاب میان‌ی (قاب C در شکل ۴) از سازه‌ها برای انجام تحلیل‌های مکانیکی و حرارتی انتخاب شده است.



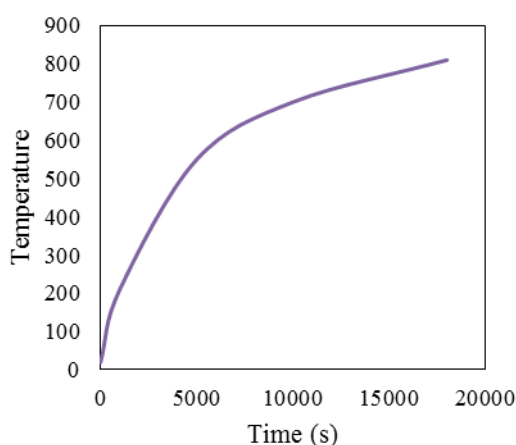
شکل ۴: پلان سازه‌های مورد نظر

جدول ۲ مشخصات مقاطع سازه‌ای

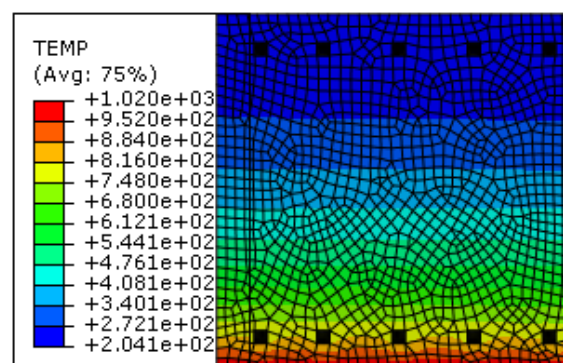
طبقه	قاب ۷ طبقه بتن آرمه			ستون	
	ارتفاع	تیر		ارتفاع	آرماتور
		آرماتور پائین	آرماتور بالا		
1	50	8 d20	7 d20	70	20 d22
2	45	8 d20	7 d20	65	20 d22
3	45	8 d16	6 d16	55	18 d20
4	40	7 d 16	6 d16	50	20 d18
5	40	7 d 12	6 d 12	45	20 d18
6	35	7 d 12	5 d 12	35	18 d16
7	35	5 d 12	4 d 12	35	18 d16

۳-۲ مدل مکانیکی-حرارتی

در این تحقیق برای انجام تحلیل حرارتی-مکانیکی از نرم‌افزار Opensees استفاده شده است. نرم‌افزار اپنسیس قادر به انجام تحلیل انتقال حرارت در عرض مقطع نسبت بنابراین برای انجام تحلیل انتقال حرارت از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. یک مدل حرارتی با مشخصات ارائه شده در شکل ۲ ایجاد شده و پس از اعمال بار حرارتی مطابق با شکل ۳ منحنی‌های تاریخچه زمانی برای نقاط مختلف در عمق مقطع استخراج شده و برای انجام تحلیل در نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است. نمونه‌ای از مدل حرارتی در نرم‌افزار آباکوس برای المان تیر در شکل ۵ نشان داده شده است. به عنوان نمونه منحنی تاریخچه زمانی دما-زمان برای آرماتور پائینی نیز نشان داده شده است.



(ب)

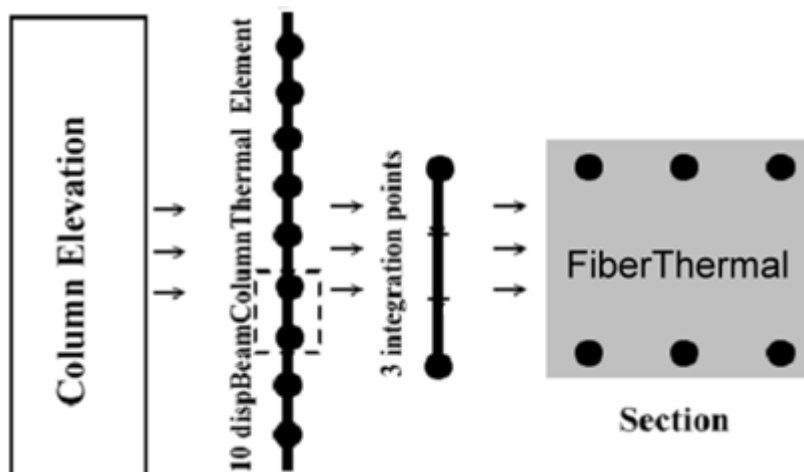


(الف)

شکل ۵: نتایج حاصل از تحلیل انتقال حرارت در مقطع تیر

در این تحقیق برای تحلیل‌های مکانیکی (دینامیکی غیرخطی) و حرارتی از نرم‌افزار opensees استفاده شده است. Opensees یک نرم‌افزار open source می‌باشد که با هدف تحلیل‌های مهندسی سازه و زلزله گسترش یافته است. این نرم‌افزار اساساً نرم‌افزاری برای انجام تحلیل‌های غیرخطی در سازه می‌باشد. این نرم‌افزار توسط دانشگاه Edinburg برای انجام تحلیل‌های حرارتی و بارگذاری آتش توسعه یافته است. در واقع با اضافه شدن این قابلیت این نرم‌افزار توانایی انجام تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی حرارتی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار توسط دانشگاه Berkeley ایجاد شده و به صورت رایگان برای انجام تحلیل‌های مهندسی و تحقیقاتی در اختیار مهندسان و دانشجویان قرار گرفته است. در این نرم‌افزار مصالح حرارتی فولادی با نوع Steel01thermal و Steel02thermal و مصالح حرارتی بتنی با Concrete02thermal بر اساس استاندارد EN 1992-1-2 ارائه شده است. نسبت کاهش پارامترهای مختلف بر اثر افزایش دما در جدول ۱ نشان داده شده است.

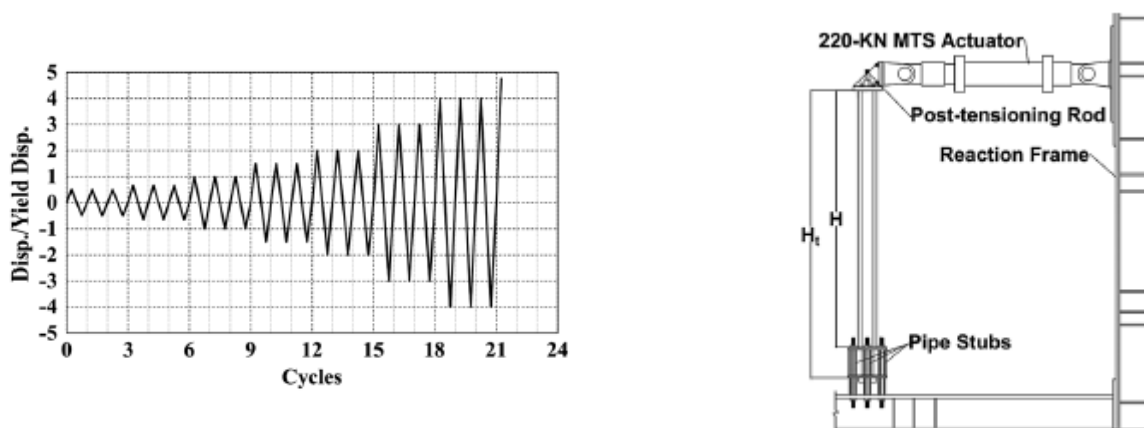
برای مدل‌های مکانیکی-حرارتی از المان `dispBeamColumnThermal` استفاده شده است. هر المان مکانیکی-حرارتی به چندین المان کوچک‌تر تقسیم شده و برای هر قسمت یک منحنی حرارتی اختصاص داده شده است. در شکل ۶ به صورت شماتیک نحوه‌ی مدل‌سازی المان با خواص مکانیکی حرارتی نشان داده شده است:



شکل ۶ شماتیک مدل‌سازی مکانیکی حرارتی

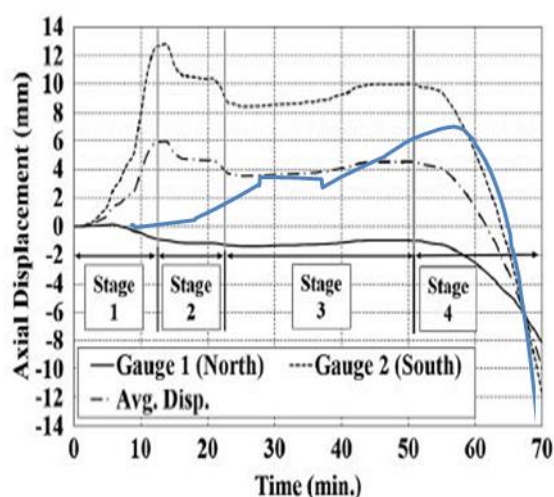
۳-۳ صحت سنجی

همان‌طور که قبلاً بیان شده است هدف از این تحقیق بررسی حساسیت زمان گسیختگی المان‌های سازه‌ای در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون است. بنابراین مهم‌ترین پارامتر در این تحقیق زمان گسیختگی در اثر آتش‌سوزی پس از تغییر شکل‌های سازه در اثر حذف ناگهانی ستون است. با اینکه چند تحقیق به صورت آزمایشگاهی در زمینه‌ی آتش‌سوزی انجام شده است اما هنوز تحقیقی که در آن سازه‌ی بتن‌آرمه در اثر آتش‌سوزی به مرحله‌ی گسیختگی برسد انجام نشده است. تنها تحقیق آزمایشگاهی که در آن زمان گسیختگی المان لحاظ شده است مربوط به تحقیق Imani و همکاران است (۲۰۱۵) [۲۵]. در این تحقیق از مدل آزمایشگاهی Imani و همکاران برای انجام صحت سنجی استفاده شده است. آن‌ها یک ستون مرکب را در معرض بارهای سیکلیک به صورت کنترل شونده توسط نیرو و پس از آن در معرض بار آتش قرار داده‌اند. سپس تغییر شکل‌های قائم و زمان دوام آن را در طی بار حرارتی بررسی نمودند. در شکل ۷ به صورت گرافیکی مدل آزمایشگاهی ایمانی نشان داده شده است:

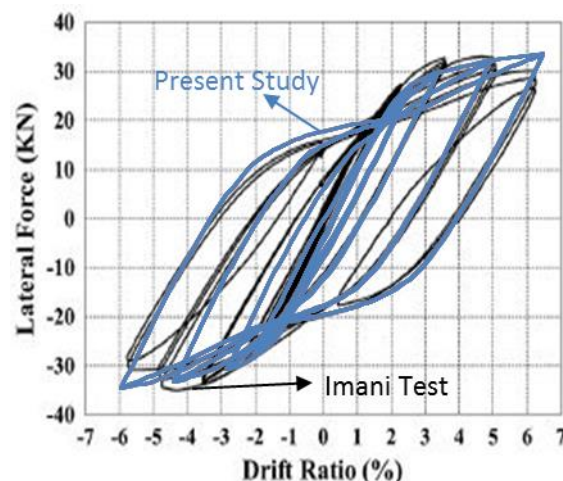


شکل ۷: مدل آزمایشگاهی Imani

نتایج تحلیل سیکلیک این ستون تحت بار جانبی در شکل ۸-الف نشان داده شده است. نتایج تحلیل مکانیکی غیرخطی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد منحنی برش پایه-دریفت در نمونه‌های آزمایشگاهی ایمانی و مدل عددی در این تحقیق دارای همگرایی خوبی می‌باشند. در ادامه پس از تحلیل سیکلیک بار حرارتی مطابق با مدل آزمایشگاهی Imani به ستون اعمال شده است. شکل ۸-ب منحنی‌های تغییر شکل قائم-زمان برای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد تغییر مکان قائم ستون در محدوده‌ی تغییر شکل‌های قائم در گج‌های مختلف موجود در سرستون مدل آزمایشگاهی بوده و زمان گسیختگی در مدل عددی تحقیق حاضر نسبت به مدل آزمایشگاهی ایمانی دقت کافی دارد. جابجایی قائم در مدل عددی نزدیک به مقدار میانگین گج‌های ۱ و ۲ در مدل آزمایشگاهی است که نشان‌دهنده‌ی صحت نتایج عددی در این تحقیق است.



ب) آتش‌سوزی پس از اعمال بار جانی



الف) تحلیل مکانیکی

شکل ۸ نتایج تحلیل صحت سنجی

۳-۴ متغیرهای تصادفی

همان‌طور که عنوان شده است برای تعیین حساسیت زمان گسیختگی قاب بتن‌آرمه به پارامترهای مختلف از سه روش تحلیل حساسیت استفاده شده است. این روش‌ها مبتنی بر متغیر تصادفی هستند. سه نوع متغیر تصادفی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. مصالح، بارگذاری و هندسی سه نوع متغیر تصادفی در نظر گرفته شده در این تحقیق هستند. تنش تسلیم آرماتور (F_y)، مدول الاستیسیته ی آرماتور (E)، مقاومت بتن (F_c) متغیرهای تصادفی مصالح هستند. بار مرده، زنده و بار لرزه‌ای به عنوان متغیرهای تصادفی بارگذاری در نظر گرفته شده‌اند. طول دهانه و اندازه‌ی پوشش هم به عنوان متغیر تصادفی مربوط به هندسه در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات مربوط به نوع توزیع و مقدار میانگین هر متغیر در جدول ۳ نشان داده شده است.

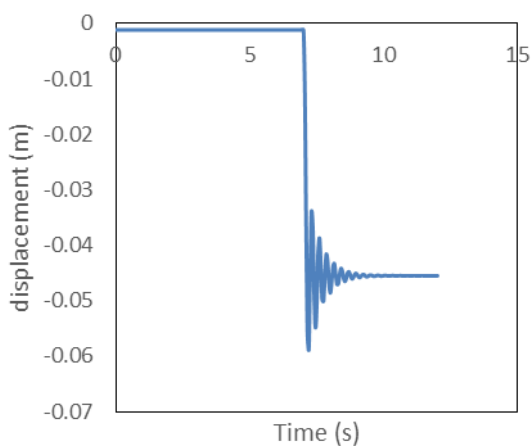
جدول ۳ مشخصات متغیرهای تصادفی

انواع	ویژگی	میانگین	COV(%)	نوع توزیع	
مصالح	آرماتور	F_y	۲۴۰ Mpa	۱۰	لاگنرمال
	آرماتور	E	۲۰۵ Mpa	۵	نرمال
	بتن	F_c	۲۱ Mpa	۱۰	لاگنرمال
بار	بار مرده	۳۰۰۰ Kg/m	۱۰	نرمال	
هندسی	ابعاد	طول دهانه	۵ m	۵	گاما
	پوشش	اندازه پوشش	۴ cm	-	تعیینی

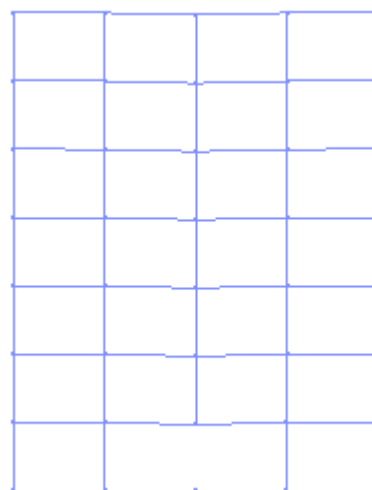
۴- نتایج حاصل از تحلیل

۴-۱ تحلیل پوش دان دینامیکی

همان طور که عنوان شده است مهم ترین هدف این تحقیق ارزیابی حساسیت زمان گسیختگی قاب بتن آرمه نسبت به متغیرهای تصادفی تحت شرایط خرابی پیش رونده ناشی از حذف ستون است. برای ارزیابی بهتر این هدف ابتدا پاسخ سازه و حساسیت آن در شرایط حذف ناگهانی ستون ارزیابی شده است. در این تحقیق ستون میانی طبقه اول به عنوان ستون محذوف در نظر گرفته شده است (شکل ۹). برای انجام تحلیل پوش دان دینامیکی بر اساس استانداردهای GSA و DOD ابتدا بار ثقلی به مدت پنج ثانیه به صورت خطی به سازه اعمال شده است. پس از آن ثابت باقی می ماند. در دو ثانیه پس از اعمال بار ثقلی (ثانیه هفتم) ستون مورد نظر به صورت ناگهانی از سازه حذف شده و سازه شروع به ارتعاش می کند. ارتعاش نقطه‌ی بالای ستون حذف شده به عنوان پاسخ سازه به حذف ناگهانی ستون و منحنی پوش دان دینامیکی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ پاسخ سازه (منحنی پوش دان دینامیکی) در حالتی که تمامی پارامترها در مقدار میانگین خود قرار دارند نشان داده شده است. بر اساس این شکل سازه در اثر حذف ناگهانی ستون به حداکثر جابجایی قائم ۵,۹ سانتی متر می رسد و پس از ارتعاشات در ۴,۵ سانتی متر به تعادل مجدد می رسد.



شکل ۱۰: نتایج حاصل از تحلیل پوش دان

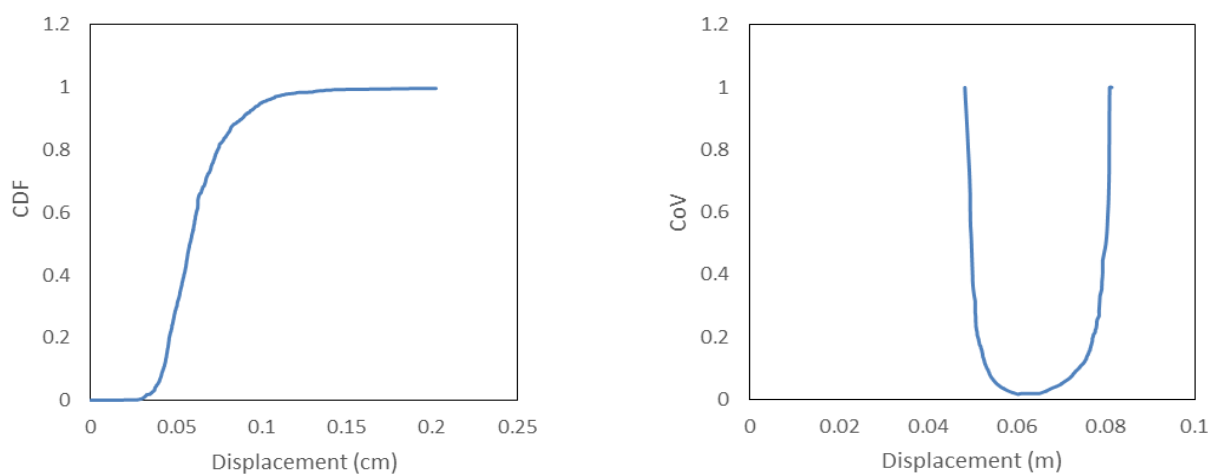


شکل ۹: تغییر شکل‌ها در قاب بتن آرمه پس از حذف ناگهانی ستون

در ادامه برای ارزیابی تأثیر متغیرهای تصادفی بر پاسخ سازه، تحلیل حساسیت با استفاده از روش مونت کارلو بررسی شده است. در گام نخست حساسیت پاسخ سازه نسبت به متغیر تنش تسلیم آرماتور بررسی شده است. در حالتی که سایر متغیرها در مقدار میانگین خود قرار دارند، تنش تسلیم آرماتور به عنوان یک متغیر تصادفی تعریف شده و تحلیل حساسیت برای این متغیر انجام شده است. در شکل ۱۱ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو برای پارامتر تنش تسلیم آرماتور نشان داده شده است. در این تحلیل حداقل مقدار COV به ۰,۰۰۹۸ محدود شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو بر اساس منحنی تابع توزیع احتمالاتی تجمعی (CDF) با تابع هدف جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده ارائه شده است. در شکل ۱۱-ب منحنی‌های CDF جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان می دهد مقادیر جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده در صورتی که تنش تسلیم آرماتور به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شود دارای میانگینی برابر با ۶,۲ سانتی متر و انحراف معیاری برابر با ۲,۲ سانتی متر است. برای ارزیابی و مقایسه‌ی بهتر نتایج تحلیل حساسیت از میزان نوسان پاسخ‌ها استفاده شده است. اختلاف بین خروجی‌ها بین این دو کران با نام “نوسان”^۸ به عنوان حساسیت پارامتر انتخاب شده محاسبه می شود. در این تحقیق

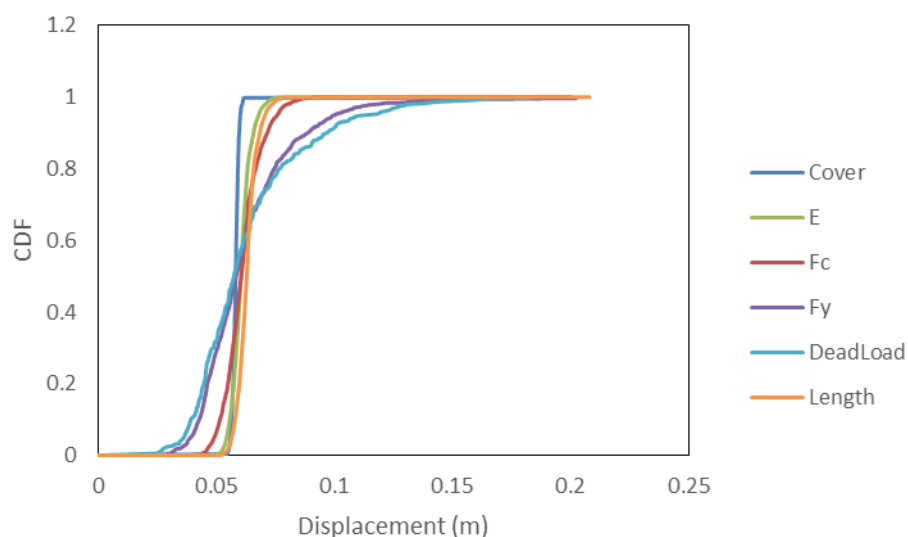
⁸ swing

نوسانات به صورت اختلاف بین میانگین بعلاوه ی انحراف معیار و میانگین منهای انحراف معیار تعریف شده است. بنابراین تنش تسلیم آرماتور ها بر روی جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده دارای نوسانی برابر با ۴,۴ سانتی متر است.



شکل ۱۱: نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو برای پارامتر F_y (الف) COV (ب) CDF

در ادامه تأثیر سایر متغیرهای تصادفی بر جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده به روش مونت کارلو بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل به صورت منحنی‌های CDF در شکل ۱۲ نشان داده شده است. پهنای منحنی‌های CDF نشان می‌دهد که بار مرده دارای بیشترین پهنای و پوشش بتن دارای کمترین پهنای در بین متغیرهای تصادفی هستند.



شکل ۱۲: نتایج تحلیل مونت کارلو برای سناریوی حذف ناگهانی ستون

همان‌طور که در مقدمه‌ی این تحقیق اشاره شده است، روش مونت کارلو یک روش مرجع اما در عین حال بسیار زمان بر است. تحلیل FOSM یک روش سریع ارزیابی حساسیت سازه است اما می‌تواند دارای خطاهایی نیز باشد. در ادامه‌ی این تحقیق نتایج حاصل از تحلیل FOSM بررسی و با نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو مقایسه شده است. دو پارامتر میانگین و نوسان پاسخ‌ها به عنوان معیار مقایسه‌ی نتایج تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ نتایج حاصل از دو تحلیل مونت کارلو و FOSM برای پاسخ سازه در

برابر حذف ناگهانی ستون نشان داده شده است. این نتایج شامل میانگین پاسخها، اندازه‌ی نوسانات، خطای تحلیل FOSM نسبت به مونت کارلو و اندازه‌ی حساسیت است. اندازه‌ی حساسیت به صورت نسبت نوسانات پاسخ سازه به مقدار میانگین آن تعریف شده است. همچنین مقدار خطای تحلیل FOSM نسبت به مونت کارلو با پارامتر اندازه حساسیت محاسبه شده است.

جدول ۴: نتایج تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو و FOSM (واحدها بر حسب سانتی‌متر) برای سناریوی حذف ناگهانی ستون

پوشش بتن	بار مرده	طول دهانه	E	Fc	Fy	نتایج (پاسخ)	پارامتر	تحلیل
۵,۸	۶,۲۸	۶,۲	۶	۶	۶,۱	میانگین	تحلیل مونت کارلو	
۱,۳	۴,۹	۰,۹	۱,۶	۱,۹	۴	اندازه نوسان		
۰,۲۳۶	۰,۷۹۲	۰,۱۵	۰,۲۷	۰,۳۱	۰,۶۴	اندازه حساسیت		
۵,۹	۵,۹	۵,۹	۵,۹	۵,۹	۵,۹	میانگین	تحلیل FOSM	
۱,۲۸	۵,۱	۰,۹	۱,۵۹	۲	۳,۵	اندازه نوسان		
۰,۲۱۶	۰,۸۶۴	۰,۱۵۲	۰,۲۶۹	۰,۳۳۸	۰,۵۹۳	اندازه حساسیت		
۱,۵۳	-۴,۱	۰	۰,۶۲۵	-۵,۲	۱۲,۵	خطای تحلیل		
						FOSM		

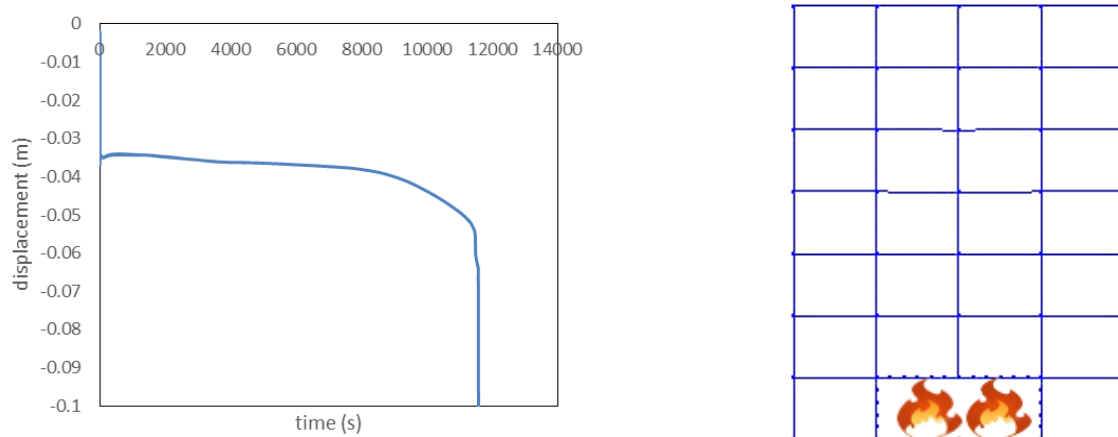
نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که بار مرده در بین پارامترها بیشترین تأثیر را بر پاسخ سازه در سناریوی حذف ناگهانی ستون دارد. پس از بار مرده تنش تسلیم فولاد مؤثرترین پارامتر بر میزان جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده است. طول دهانه و پوشش بتن کمترین تأثیر را بر حساسیت پاسخ سازه در این سناریو دارند. این روند در تحلیل FOSM نیز وجود دارد و رتبه‌ی متغیرها از نظر تأثیر بر پاسخ سازه در سناریوی حذف ناگهانی ستون یکسان است اما میزان پاسخها متفاوت است. در تحلیل FOSM میانگین پاسخها در تمامی موارد یکسان است. بیشترین خطای تحلیل FOSM مربوط به پارامتر تنش تسلیم آرماتور است. این میزان خطا برابر با ۱۲,۵٪ محاسبه شده است. همچنین خطا در پارامتر طول دهانه برابر با صفر محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد هرچقدر حساسیت سازه نسبت به پارامتری کمتر باشد (در سناریوی حذف ناگهانی ستون) نتایج تحلیل FOSM به تحلیل مونت کارلو نزدیک‌تر است.

۴-۲ تحلیل حرارتی پس از حذف ستون

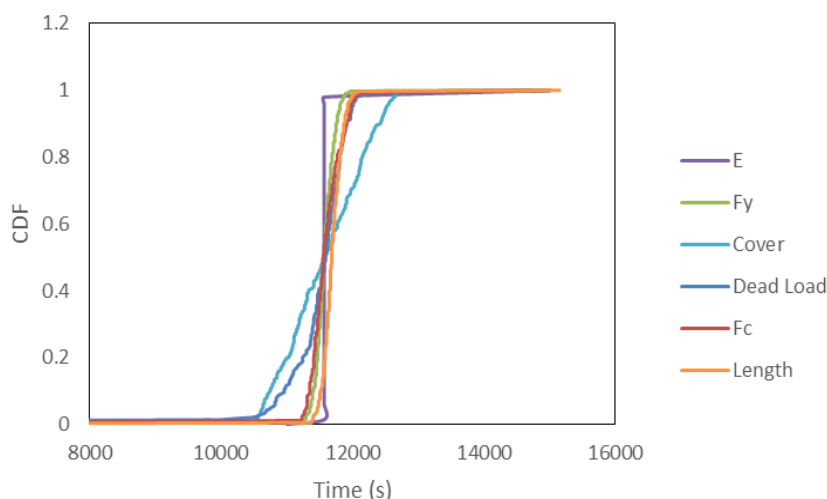
در گام قبل پاسخ و حساسیت پاسخ سازه به پارامترهای مختلف در سناریوی حذف ناگهانی ستون بررسی شده است. در ادامه‌ی روند تحقیق تحلیل بار حرارتی پس از حذف ناگهانی ستون به صورت متوالی انجام شده است. در ابتدا ستون بر اساس بخش ۴-۱ از سازه حذف و سپس بار آتش به دهانه‌های مجاور ستون حذف شده اعمال شده باشد تا شرایط سازه به صورت آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون قرار گیرد. در ابتدا پاسخ سازه به این دو بارگذاری متوالی ارزیابی شده است. در این بخش از تحلیل برخلاف بخش ۴-۱ جابجایی قائم تیرهای وسط دهانه‌های در معرض بار آتش به عنوان پاسخ و مقاومت سازه در برابر بار آتش در نظر گرفته شده است. شرایط بارگذاری و پاسخ سازه تحت بار آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بر اساس این شکل جابجایی وسط دهانه پس از حذف ناگهانی ستون به بیشینه مقدار ۳,۷ سانتی‌متر رسیده و پس از چند نوسان در ۳,۴ سانتی‌متر به تعادل می‌رسد. پس از اعمال بار حرارتی و افزایش دما این جابجایی افزایش یافته و در نهایت در ثانیه‌ی ۱۱۵۹۹ افزایش ناگهانی می‌یابد و شکست در سازه ایجاد می‌شود. با توجه به هدف تحقیق، زمان اولین گسیختگی در المان‌های سازه (تغییر شکل ناگهانی و زیاد) به عنوان مقاومت سازه در برابر بار حرارتی در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های مونت کارلو و FOSM برای ارزیابی تأثیر متغیرهای تصادفی بر مقاومت سازه در این سناریو در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۴ نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو نشان داده شده است.

نتایج شکل ۱۴ نشان می‌دهد برخلاف پاسخ سازه در فاز حذف ناگهانی ستون، پوشش بتن در مقاومت سازه در فاز اعمال بار حرارتی تأثیر زیادی را ایجاد می‌کند. مقادیر مختلف پوشش بتن نسبت به سایر پارامترها گستره‌ی وسیع‌تری از زمان گسیختگی را در سازه ایجاد کرده است. پوشش بتن بر میزان انتقال حرارت در عمق مقطع مخصوصاً در موقعیت آرماتورها ایجاد می‌کند. بار مرده همانند فاز حذف ناگهانی ستون یکی از کلیدی‌ترین متغیرها در میزان پراکندگی زمان گسیختگی سازه است. خلاصه‌ی نتایج تحلیل مونت کارلو و

نتایج مربوط به تحلیل FOSM و خطای این تحلیل در جدول ۵ نشان داده شده است. ذکر مجدد این نکته ضروری است که پاسخ یا مقاومت سازه در فاز حرارتی برابر با زمان اولین گسیختگی در نظر گرفته شده است. به عبارت ساده تر تابع هدف در تحلیل‌های حساسیت برابر با زمان اولین گسیختگی تعریف شده است.



شکل ۱۳: پاسخ سازه به سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون



شکل ۱۴: نتایج تحلیل مونت کارلو برای حساسیت سنجی در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون

جدول ۵: نتایج تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو و FOSM (واحدها برحسب سانتی‌متر) برای سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون

تحلیل	پارامتر	نتایج (پاسخ)	Fy	Fc	E	طول دهانه	بار مرده	پوشش بتن
تحلیل مونت کارلو	میانگین		۱۱۵۸۲	۱۱۵۴۸	۱۱۶۲۵	۱۱۵۵۳	۱۱۴۳۵	۱۱۶۷۲
	اندازه نوسان		۴۲۸	۶۵۷	۱۵۹	۲۷۴	۸۰۲	۱۰۸۶
	اندازه حساسیت		۰,۰۳۷	۰,۰۵۶۸	۰,۰۱۳۸	۰,۰۲۳۵	۰,۰۶۹	۰,۰۹۴
تحلیل FOSM	میانگین		۱۱۵۹۸	۱۱۵۹۸	۱۱۵۹۸	۱۱۵۹۸	۱۱۵۹۸	۱۱۵۹۸
	اندازه نوسان		۴۹۲	۵۴۵	۱۷۲	۲۲۵	۹۲۵	۹۲۵
	اندازه حساسیت		۰,۰۴۲	۰,۰۴۷	۰,۰۰۸۵	۰,۰۰۱۳۷	۰,۰۰۸	۰,۰۷۱
	خطای تحلیل FOSM		-۱۴,۹	۱۷	-۸,۱	۱۷,۹	-۱۵,۳	۱۴,۸

نتایج تحلیل‌های حساسیت نشان می‌دهد که در تحلیل بار مرده و پوشش بتن بیشترین تأثیر را در زمان گسیختگی قاب بتن‌آر메 در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ستون ایجاد کرده‌اند. در این سناریو همانند حالت حذف ستون تنها، مدول الاستیسیته ی آرماتور و طول دهانه کمترین حساسیت را ایجاد کرده‌اند. همچنین مقایسه‌ی تحلیل حساسیت مونت کارلو و FOSM نشان می‌دهد که خطای تحلیل FOSM در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ستون از حذف ستون تنها بیشتر است. در تحلیل FOSM بیشترین متغیری که بر زمان گسیختگی ایجاد حساسیت کرده است بار مرده است در حالی که در تحلیل مونت کارلو پوشش بتن بیشترین پارامتر حساسیت زا بوده است. اندازه‌ی حساسیت در تحلیل مونت کارلو برای پوشش بتن برابر با ۰,۰۹۴ و در تحلیل FOSM برابر با ۰,۰۷۱ محاسبه شده است. این مقدار برای پارامتر بار مرده به ترتیب برابر با ۰,۰۶۹ و ۰,۰۸۸ محاسبه شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که اندازه حساسیت در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ستون به مراتب کمتر از همین مقدار در سناریوی حذف ناگهانی ستون است. این مطلب نشان می‌دهد که اولاً میزان حساسیت در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ستون نسبت به متغیرهای تصادفی به مراتب کمتر از سناریوی حذف ستون است. ثانیاً با وجود افزایش میزان خطای تحلیل FOSM در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ستون، این میزان خطا نسبت میانگین زمان گسیختگی بسیار ناچیز است. به عنوان مثال میزان خطا در تحلیل FOSM نسبت به تحلیل مونت کارلو در پارامتر پوشش بتن برابر با ۱۴,۸٪ محاسبه شده است که برابر با ۱۶۱ (تقریباً ۲,۵ دقیقه) ثانیه می‌باشد که نسبت به ۱۱۵۹۸ ثانیه بسیار ناچیز است.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی حساسیت پاسخ قاب هفت طبقه‌ی بتن‌آرمة تحت شرایط آتش‌سوزی پس از حذف ستون است. در این تحقیق شش متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و تأثیر آن طی دو تحلیل حساسیت مونت کارلو و FOSM بر پاسخ این سازه در سناریوهای آتش‌سوزی پس از حذف ستون و حذف ستون تنها بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل به شرح زیر است:

- در سناریوی حذف ناگهانی ستون بار مرده، تنش تسلیم آرماتور و مقاومت نهایی بتن بیشترین تأثیر را در جابجایی قائم نقطه‌ی بالای ستون حذف شده (پاسخ سازه) داشته است. طول دهانه، مدول الاستیسیته و پوشش بتن کمترین حساسیت را برای پاسخ سازه ایجاد کرده‌اند.
- در تحلیل آتش‌سوزی پس از حذف ستون پوشش بتن، بار مرده و مقاومت نهایی بتن بیشترین تأثیر را بر مقاومت سازه در برابر بار آتش پس از حذف ناگهانی ستون داشته‌اند. مدول الاستیسیته آرماتور، طول دهانه و تنش تسلیم آرماتور نیز کمترین تأثیر را در این سناریو داشته‌اند.
- اندازه‌ی حساسیت در تحلیل حذف ناگهانی ستون بسیار بیشتر از اندازه‌ی حساسیت متغیرهای تصادفی در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون محاسبه شده است.
- حداکثر خطای تحلیل حساسیت به روش FOSM در سناریوی حذف ناگهانی ستون برابر با ۱۲,۵٪ برای تنش تسلیم آرماتور محاسبه شده است. بیشترین خطا در سناریوی آتش‌سوزی پس از حذف ناگهانی ستون با استفاده از روش FOSM برابر با ۱۷,۹٪ برای پارامتر طول دهانه محاسبه شده است.
- با توجه به مقادیر خطا و اندازه‌ی حساسیت و زمان بر بودن روش مونت کارلو توصیه می‌شود از روش حساسیت سنجی FOSM برای ارزیابی حساسیت مقاومت قاب ای بتن‌آرمة در شرایط مربوط به آتش‌سوزی استفاده شود.

مراجع

- [1] Tavakoli, H.R, Moradi Afrapoli, M., (2018), "Robustness Analysis of Steel Structures with Various Lateral Load Resisting Systems under Seismic Progressive Collapse", Engineering Failure Analysis, 83, 89-101.
- [2] Tavakoli, H.R, Kiakojouri, F., (2012), "Progressive collapse of frame structures: suggestions for robustness assessment", Scientia Iranica, 21(2), 329-338.

- [3] Tavakoli, H.R., Rashidi Alashti, A., (2013), "Evaluation of progressive collapse potential of multi-story moment resisting steel frame buildings under lateral loading" , Scientia Iranica, 20(1), 77-86.
- [4] Tavakoli, H.R., Naghavi, F. , and Goltabar, R., (2015), "Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse" Earthquakes and Structures, 9 (3), 639-656.
- [5] Lew, H., "Best practices Guidelines For Mitigation of Building For progressive collapse", 2003.
- [6] Menchel Kfir, Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new computational procedures, PHD thesis, 2009.
- [7] GSA, "Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects," General Services Administration Washington (DC, USA), 2003.
- [8] Unified Facilities Criteria, UFC-DoD, "Design of buildings to resist progressive collapse," 2005.
- [9] Amiri, S., Saffari, H., Mashhadi, J., (2018), "Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures", Engineering Failure Analysis, 84, 300-310.
- [10] Suwondo, R., Cunningham, L., Gillie, M., Bailey, C., (2019), "Progressive collapse analysis of composite steel frames subject to fire following earthquake", Fire Safety Journal, 103, 49-58.
- [11] Qn, C., Mahmoud, H., (2019), "Collapse performance of composite steel frames under fire", Engineering Structures, 183, 662-676.
- [12] Jiang, B., Li, G.Q., Li, L., Izzuddin, B.A., (2017), "Simulations on progressive collapse resistance of steel moment frames under localized fire", Journal of Constructional Steel Research, 138, 380-388.
- [13] Grabbe, C., (2008), "Progressive Collapse of the World Trade Center: A Simple Analysis", Journal of Engineering Mechanics, 136, 125-132.
- [14] Hartanto Wibowo, Modelling Progressive Collapse of RC Bridges during Earthquakes, CSCE Annual General Conference, 2009.
- [15] Lee, T.H. and Mosalam, K.M., (2005), "Seismic Demand Sensitivity of Reinforced Concrete Shear-Wall Building Using FOSM Method", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34:14, 1719-1736.
- [16] Dwaikat MB, and Kodur VKR, (2010), "Fire induced spalling in high strength concrete beams," Fire Technology, 46, 1, 251-274.
- [17] Lie TT, Kodur VKR, (1998), "Thermal and mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete at elevated temperatures," Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 23, no. 2, pp. 511-517.
- [18] Youssef MA, Moftah M, (2007) ,"General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures", Engineering Structures, 29(10), 2618-2634.
- [19] Elhami Khorasani N, Garlock M, Quiel S,(2015), "Modeling steel structures in OpenSees: Enhancements for fire and multi-hazard probabilistic analyses", Computers and Structures, 157, 218-231.
- [20] Tian, L.F., Wei, J.P., Hao, J. and Wang, X., (2017), "Dynamic analysis method for the progressive collapse of long-span spatial grid structures", Steel and Composite Structures, 23 (4), 435-444.
- [21] Tavakoli, H. And Kiakojouri, F., (2012) "Influence Of Sudden Column Loss On Dynamic Response Of Steel Moment Frames Under Blast Loading," International Journal Of Engineering-Transactions B: Applications, 26, 197-206.
- [22] Marjanishvili, S. And Agnew, E., (2006) "Comparison Of Various Procedures For Progressive Collapse Analysis," Journal Of Performance Of Constructed Facilities, 20, 365- 374.
- [23] Kim, J. And Kim, T., (2009) "Assessment of Progressive Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames," Journal Of Constructional Steel Research, 65, 169-179.
- [24] Marjanishvili, S. And Agnew, E., (2006) "Comparison Of Various Procedures For Progressive Collapse Analysis," Journal Of Performance Of Constructed Facilities, 20, 365- 374.
- [25] Imani, R., Mosqueda, G., Bruneau, M., (2015), "Experimental Study on Post-Earthquake Fire Resistance of Ductile Concrete-Filled Double-Skin Tube Columns", Journal of Structural Engineering, Volume 141 Issue 8.