

ارزیابی روش‌های تحلیل حساسیت در قاب خمشی بتن آرمه در معرض آتش‌سوزی پس از زلزله

مجید مرادی^۱، حمیدرضا توکلی^{۲*}، غلامرضا عبدالله‌زاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲، نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲

چکیده

حوادث متعددی ایمنی سازه را به خطر می‌اندازد. این حوادث می‌تواند پشت سرهم اتفاق افتند. آتش‌سوزی پس از زلزله جزئی از رخداد‌های متوالی است که ایمنی سازه را تهدید می‌کند. مقاومت سازه‌ها در برابر بار آتش و بار آتش پس از زلزله متفاوت است. هدف از این تحقیق بررسی روش‌ها و تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت قاب‌های بتن آرمه تحت در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله است. برای این منظور یک قاب ۷ طبقه بتن آرمه طراحی و به‌صورت مکانیکی-حرارتی مدل‌سازی شده است. پس از مدل‌سازی با استفاده از سه روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (Monte Carlo simulation)، (MCS)، دیاگرام ترنادو (Tornado Diagram Analysis)، (TDA) و تحلیل مرتبه اول ممان دوم (First-Order Second Moment)، (FOSM)، تأثیر پارامترهای طراحی بر مقاومت قاب بتن آرمه در بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله بررسی شده است. در این تحقیق با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی، قاب بتن آرمه پس از پوش در سطوح مختلف عملکرد، در معرض بار آتش ISO 834 قرار گرفته و تحلیل‌های حساسیت برای آن انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد در بین پارامترهای طراحی تنش تسلیم آرماتور بیش‌ترین تأثیر را بر زمان گسیختگی قاب بتن آرمه دارد. همچنین روش FOSM خطای کم‌تری را نسبت به روش TDA در بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله دارد.

کلیدواژه‌ها: آتش‌سوزی پس از زلزله، روش تحلیل حساسیت، قاب بتن آرمه، رخداد متوالی.

۱- مقدمه

دارد (Bommer, ۱۹۹۲). خسارات ناشی از زلزله به سیستم‌های الکتریکی و گازرسانی می‌تواند منجر به وقوع آتش‌سوزی در سازه شود و سرایت آتش به طبقات و ساختمان‌های مجاور می‌تواند باعث وقوع فاجعه‌ای ناشی از آتش‌سوزی شود. کشورهای زیادی از جمله ژاپن پدیده آتش‌سوزی پس از زلزله را به‌کرات تجربه کرده‌اند (Scawthorn, ۱۹۹۲). آتش‌سوزی و آتش‌سوزی پس از زلزله خطر بزرگی را برای جوامع بشری ایجاد می‌نماید. این اتفاق را می‌توان از جمله حوادث نادر با عواقب احتمالی زیاد در نظر گرفت (Elhami Khorasani و همکاران، ۲۰۱۵).

آتش‌سوزی پس از زلزله یک خطر بزرگ برای مکان‌های با تراکم زیاد محسوب می‌شود (Scawthorn و همکاران، ۲۰۱۵). وقوع آتش‌سوزی بعد از زلزله در قرن اخیر به‌عنوان یک نیروی مخرب و شدید شناخته شده است (Scawthorn و همکاران،

بارهای متعددی در طول عمر مفید ساختمان‌ها ایمنی سازه را تهدید می‌کنند. زلزله، آتش‌سوزی، انفجار و ... مخاطراتی هستند که ایمنی سازه را به خطر می‌اندازند (Tavakoli و همکاران، ۲۰۱۶). هریک از این بارها می‌توانند خسارات محلی در سازه ایجاد نمایند یا این‌که باعث خسارت کلی در سازه شوند (Tavakoli و همکاران، ۲۰۱۳). مهم‌ترین باری که ایمنی سازه را به مخاطره می‌اندازد و در طراحی‌ها در نظر گرفته می‌شود بار وارده به سازه ناشی از زلزله است (Tavakoli و همکاران، ۲۰۱۵). زلزله می‌تواند باعث کاهش مقاومت در برابر بارهای بعدی در سازه شود (Moradi و Tavakoli، ۲۰۱۸). اما زلزله می‌تواند علاوه بر خطراتی که خود پدید می‌آورد، خطراتی را نیز متعاقباً به دنبال داشته باشد. این خطرات در طبیعت می‌تواند شامل رانش زمین و سونامی باشد. علاوه بر این موارد زلزله خطراتی را نیز برای خود سازه به دنبال

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۱۱۳۳۲۳۷۰۷۱

TDA یکی از روش‌های متداول است که در زمینه آنالیز تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kodur و همکاران، ۲۰۰۸). TDA یک آنالیز حساسیت مرتبه اول است. در این روش حساسیت EDB به هر پارامتر به وسیله نمودارهای افقی نشان داده می‌شود. در این روش مجموعه‌ای از متغیرها با توزیع احتمالاتی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا خروجی مربوط به میانگین هر یک از این پارامترها اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار به عنوان مبنای خروجی‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس هر یک از پارامترها به صورت جداگانه در کران بالا و پایین توزیع احتمالاتی خود تعیین می‌شود. در این حالت سایر پارامترها در مقدار میانگین خود قرار دارند. اختلاف بین خروجی‌ها بین این دو کران بانام "نوسان"^۲ به عنوان حساسیت پارامتر انتخاب شده محاسبه می‌شود. در نهایت پارامتر ورودی بر اساس "نوسان" خود درجه‌بندی می‌شود (Kodur و همکاران، ۲۰۰۸).

در روش FOSM تنها میانگین و انحراف معیار (SD) متغیرهای تصادفی بر اساس توزیع خود فرض می‌شوند. و 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. جزئیات دقیقی از روش تحلیل حساسیت FOSM توسط Kodur و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است. در این تحقیق از دو روش TDA و FOSM با استفاده از روش MCS صحت‌سنجی شده‌اند.

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 درحالی‌که خواص مکانیکی باعث از دست دادن سختی و مقاومت در اعضای سازه‌ای می‌شود (Youssef و همکاران، ۲۰۰۷؛ Lie و همکاران، ۱۹۹۶؛ Remesh و همکاران، ۲۰۱۱). 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. اگر دمای بحرانی دمایی تعریف شود که مقاومت مصالح در آن دما کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد، این دما در آرماتورها برابر ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در بتن برابر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود (Remesh و همکاران،

۲۰۰۵). در سال‌های اخیر رویکرد تحقیقات در حوزه رویدادهای متوالی مانند آتش‌سوزی پس از زلزله بیشتر شده است. Gui و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی رفتار بارگذاری آتش پس از بار چرخه-ای^۱ در دیوارهای برشی بتن‌آرمه پرداختند. Kamath و همکاران (۲۰۱۱) نمونه آزمایشگاهی از قاب آسیب‌دیده بتن‌آرمه را تحت بارگذاری حرارتی مورد تحقیق قرار دادند.

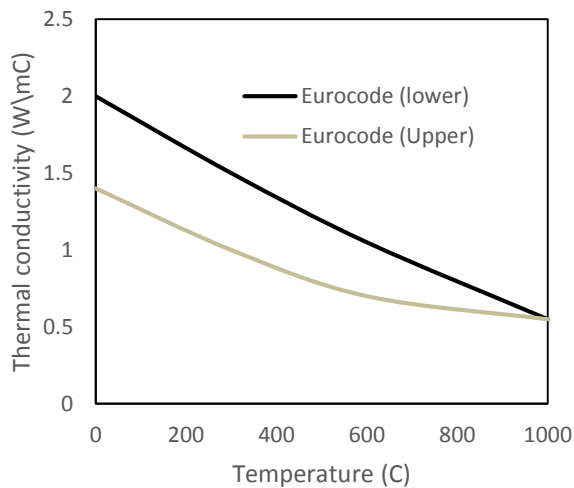
Ervine (۲۰۱۲) رفتار قاب‌های بتن‌آرمه را در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله بررسی کرده است. با وجود این‌که تحقیقات فراوانی در زمینه آتش‌سوزی پس از زلزله در قاب‌های فولادی انجام شده است اما تحقیقات چندانی در زمینه رفتار قاب‌های بتن‌آرمه در این زمینه صورت نگرفته است. با توجه به عدم وجود تحقیقات کافی در زمینه رفتار قاب‌های بتن‌آرمه در برابر بار آتش‌سوزی پس از زلزله، در این تحقیق سعی شده است تا به طور گسترده تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت قاب‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله مورد ارزیابی قرار گیرد. هدف از این تحقیق تعیین اهمیت پارامترهای بارگذاری و طراحی در قاب‌های بتن‌آرمه تحت بار آتش‌سوزی پس از زلزله است و همچنین بررسی دقت روش‌های تحلیل حساسیت در این زمینه است. برای انجام این هدف اهمیت چندین متغیر تصادفی با استفاده از سه روش تحلیل حساسیت بررسی شده است. برای شبیه‌سازی بار زلزله از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. بار حرارتی ارائه شده توسط ISO 834 به عنوان بارگذاری آتش در نظر گرفته شده است. قاب پس از طراحی و مدل‌سازی مکانیکی حرارتی بر اساس روش‌های تحلیل MCS، TDA و FOSM تحلیل شده است. در ادامه روش‌های مدل‌سازی و تحلیل بحث شده است.

۲-۲- روش تحقیق

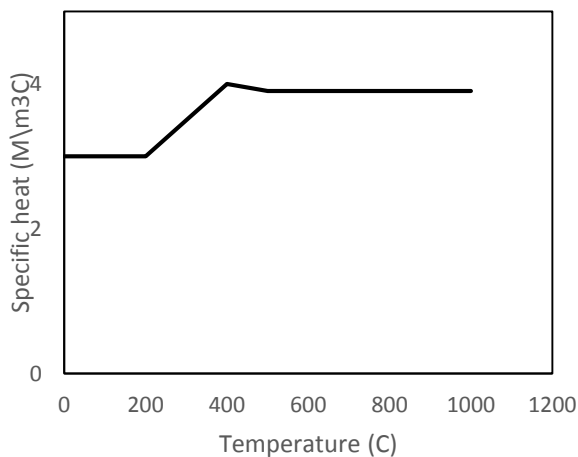
۲-۱- روش‌های تحلیل حساسیت

روش‌های مختلفی برای ارزیابی حساسیت سازه نسبت به پارامترهای مورد نظر مهندسی وجود دارد. سه روش: TDA، MCS 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 به صورت مجموعه‌ای از مقادیر تعینی تعریف می‌شود. این مجموعه‌ی داده‌های ورودی مجموعه‌ای از خروجی تعینی 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 (Lee و Mosalam، ۲۰۰۵؛ Dwaikat و همکاران، ۲۰۱۰). استفاده از روش MCS بسیار زمان‌بر است.

آرماتورها در انتقال حرارت صرف نظر 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 نرم افزار اپنسیس در جدول (۱) نشان داده شده است. نوع مصالح به کار رفته در این نرم افزار در بخش (۳-۱) توضیح داده شده است.



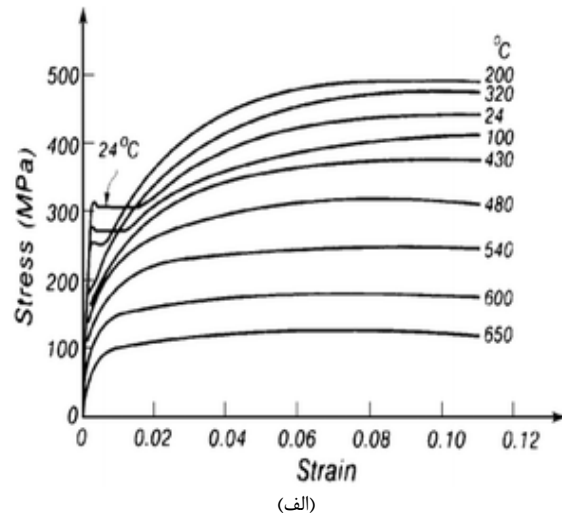
(الف)



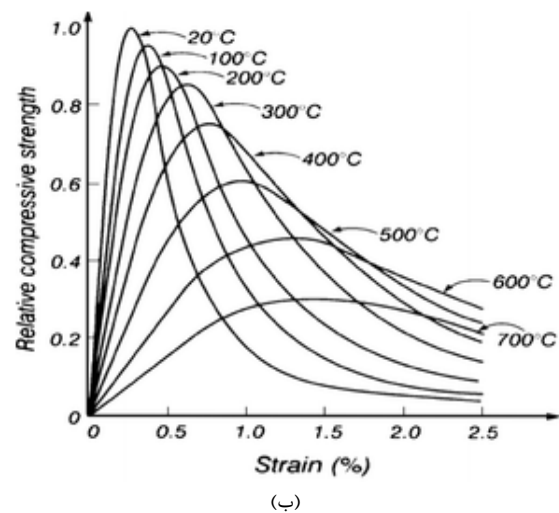
(ب)

شکل ۲- مشخصات حرارتی بتن: الف) هدایت گرمایی، ب) گرمای ویژه (Lie و همکاران، ۱۹۹۶)

(۲۰۱۱). خواص حرارتی به گرمای ویژه و هدایت گرمایی تقسیم می شود. هدایت گرمایی در فولاد بیشتر و در بتن کمتر است. گرمای ویژه در فولاد نسبت به بتن کمتر است بنابراین انتقال حرارت در فولاد سریع تر از بتن صورت می گیرد و افت مقاومت در فولاد سریع تر از بتن انجام می شود (Choi و همکاران، ۲۰۱۶).



(الف)



(ب)

شکل ۱- منحنی تنش کرنش در دماهای مختلف: الف) فولاد، ب) بتن (Imani و همکاران، ۲۰۱۵)

در این تحقیق تحلیل انتقال حرارت در نرم افزار آباکوس^۳ انجام شده است و پس از استخراج منحنی های دما- زمان در ارتفاع مقاطع، مدل سازی مکانیکی حرارتی در نرم افزار اپنسیس^۴ 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

4. Opensees

3. Abaqus

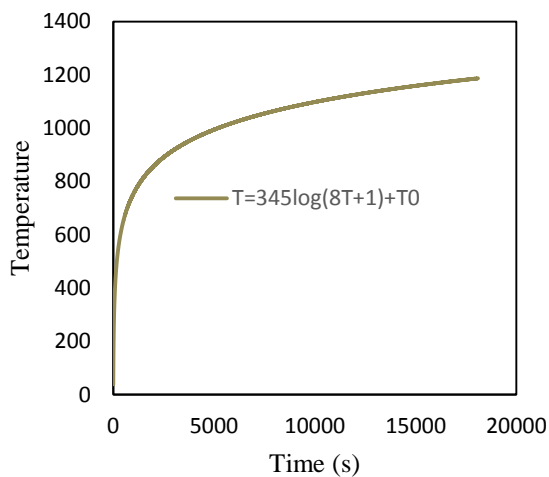
منحنی دما- زمان ISO یک منحنی استاندارد است که معمولاً برای بارگذاری حرارتی در تحلیل‌های عددی از آن استفاده می‌شود. تحقیقات بسیاری از این منحنی دما زمان استفاده کرده‌اند. ویژگی اصلی این منحنی که دلیل اصلی استفاده در این تحقیق است مربوط به زمان اعمال بار حرارتی است. این منحنی فرمولی را ارائه می‌دهد که بر اساس آن می‌توان منحنی دما- زمان را برای هر مدت محاسبه نمود. از آنجائی که سازه‌های این تحقیق از نوع بتن‌آرمه هستند و مدت زمان دوام آن‌ها در برابر بار حرارتی زیاد است محققان تصمیم گرفتند تا از بار حرارتی ISO استفاده کنند. با این توضیح آن‌قدر به سازه بار حرارتی ISO اعمال شده است تا سازه دچار گسیختگی شود و این ویژگی تنها در بار حرارتی ایزو موجود است. این بار اگرچه به‌عنوان بار حرارتی شدید برای سازه محسوب می‌شود اما هنوز از بارهای پرکاربرد در مهندسی آتش است.

جدول ۱- مدل رفتاری فولاد و بتن در برابر حرارت

$\theta(^{\circ}C)$	مصالح بتنی			مصالح فولادی		
	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$	$\varepsilon_{c,\theta}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$	$\frac{f_{sy,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{f_{sp,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{E_{s,\theta}}{E_s}$
۲۰	۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲	۱	۱	۱
۱۰۰	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲۲۵	۱	۰/۹۶	۱
۳۰۰	۰/۸۵	۰/۰۰۷	۰/۰۲۷۵	۱	۰/۸۱	۰/۷۲
۶۰۰	۰/۴۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۴	۰/۲۶	۰/۲۴
۱۰۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۴۵	۰/۰۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳
۲۰	۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲	۱	۱	۱
۱۰۰	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲۲۵	۱	۰/۹۶	۱
۳۰۰	۰/۸۵	۰/۰۰۷	۰/۰۲۷۵	۱	۰/۸۱	۰/۷۲
۶۰۰	۰/۴۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۲۴
۱۰۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۴۵	۰/۰۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳
۲۰	۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲	۱	۱	۱
۱۰۰	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲۲۵	۱	۰/۹۶	۱

۲-۳- بارگذاری آتش

روش‌های متعددی برای محاسبه دمای آزادشده در طی فرایند آتش‌سوزی در یک محیط بسته وجود دارد (Elhami Khorasani و همکاران، ۲۰۱۵) تمامی این روش‌ها یک منحنی تاریخیچه 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 مرحله گسترش کامل آتش لحاظ می‌شود. در مرحله گسترش کامل آتش دمای محیط به‌یک‌باره و با شیب زیاد افزایش پیدا می‌کند و باگذشت زمان این شیب کم می‌شود. در این تحقیق از منحنی دما زمان ارائه‌شده 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 پنج 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 زلزله است، از مدل‌های دارای فاز سرد شونده و مدل‌های آتش طبیعی صرف‌نظر شده است. در واقع در این تحقیق از حساسیت پاسخ سازه به بار آتش صرف‌نظر شده است تا بتوان مقاومت سازه در برابر آتش‌سوزی پس از زلزله را به‌درستی تعیین کرد.



شکل ۳- منحنی استاندارد دما زمان ISO 834

۲-۴- بار لرزه‌ای

در این تحقیق برای شبیه‌سازی رفتار سازه در بار لرزه‌ای از تحلیل پوش‌آور استفاده شده است. تحلیل پوش‌آور به یک‌پوش عمومی و پرکاربرد برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای و عملکرد سازه‌ها در برابر بار لرزه‌ای تبدیل شده است. در تحلیل پوش‌آور سازه بر مبنای الگوهای بارهای خاصی پوش می‌شود و منحنی تغییر مکان برش پایه به‌عنوان منحنی پوش‌آور یا منحنی ظرفیت ارائه می‌گردد. بر اساس FEMA356 در تحلیل پوش‌آور می‌توان سطوح عملکردی را برای سازه در نظر گرفت. در این تحقیق سه سطح LS، IO و CP^۱ برای ارزیابی رفتار سازه در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله در تحلیل پوش‌آور در نظر گرفته شده است. بر مبنای FEMA 356

7. Collapse Prevention

5. Immediate Occupancy

6. Life Safety

نتایج حاصل از طراحی سازه بر اساس مقاطع بتن آرمه در جدول (۲) نشان داده شده است. پس از طراحی اولیه، قاب میانی سازه به عنوان قاب مورد بررسی برای تحلیل‌های مکانیکی-حرارتی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی مکانیکی حرارتی از نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است. در مدل‌سازی غیرخطی در تمامی دهانه‌ها به جز دهانه‌های آتش‌سوزی از مدل مفصل پلاستیک متمرکز (شکل (۴)) استفاده شده است. اما در دهانه‌هایی که بار حرارتی به آن اعمال می‌شود از مدل خمیری^{۱۰} گسترده استفاده شده است. در مدل‌سازی پلاستیسیته گسترده از المان‌های disp Beam Column Thermal با مصالح Concrete 02 thermal برای بتن و Steel 02 thermal برای آرماتور استفاده شده است. مشخصات حرارتی این دو مصالح در جدول (۱) نشان داده شده است. برای مدل‌سازی مکانیکی حرارتی هر المان به چند المان مکانیکی حرارتی کوچک‌تر تقسیم شده و در هر المان از مقطع حرارتی استفاده شده است. در شکل (۴) مدل اجزای محدودی برای قاب دوعبدهی نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی غیرخطی سازه می‌توان از دو روش مفصل پلاستیک گسترده یا متمرکز استفاده کرد. از آنجائی که استفاده از مفصل پلاستیک متمرکز باعث افزایش سرعت تحلیل می‌شود سعی شده است تا در دهانه‌هایی که در آن‌ها از بار حرارتی استفاده نشده است، از مفصل پلاستیک متمرکز استفاده شود. در دهانه‌ای که بار حرارتی به آن اعمال شده است نیاز است تا روابط تنش کرنش در کل طول المان‌ها در نظر گرفته شود. بنابراین ناگزیر به استفاده از مفصل پلاستیک گسترده بوده است.

۳-۲- الگوی آتش‌سوزی پس از زلزله

برای انجام تحلیل آتش‌سوزی پس از زلزله فرض شده است فرض شده است در اثر زلزله یک حادثه آتش‌سوزی در دو دهانه از طبقه چهارم قاب هفت طبقه رخ می‌دهد (شکل (۴)). برای مدل‌سازی شرایط آتش‌سوزی پس از زلزله باید تحلیل حرارتی پس از یک تحلیل مکانیکی انجام شود. بر اساس بخش (۲-۴) المان بتن آرمه ممکن است پس از بار مکانیکی دچار ترک خوردگی شوند. این ترک خوردگی و کنده شدن پوشش بتن می‌تواند بر انتقال حرارت در مقاطع بتن آرمه تأثیرگذار باشد.

در این تحقیق ابتدا تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی به صورت مجزا انجام شده است. پس از انجام تحلیل پوش‌آور سطوح عملکرد استخراج شده و برای هر سطح عملکرد میزان ترک خوردگی و کنده شدن پوشش بتن آن سطح فرض شده است. نرم‌افزار اپنسیس توانایی انجام تحلیل انتقال حرارت را ندارد بنابراین در این تحقیق

در سطح عملکرد IO آسیب‌های بسیار کمی در سازه ایجاد می‌شود. در سطح LS آسیب‌ها در تیرها و ستون‌ها گسترش می‌یابد. در سطح عملکرد CP آسیب بسیار بیشتر و شدیدتری نسبت به دو سطح IO و LS ایجاد می‌شود. یکی از ویژگی‌های اصلی المان‌های بتن آرمه ترک خوردگی بتن در بارهای لرزه‌ای مختلف است. بر اساس Table C1-3 استاندارد FEMA356 المان‌های تیر و ستون در سطح عملکرد IO دارای ترک‌هایی با عرض بسیار کمی هستند. در سطح عملکرد LS ترک‌های عریض‌تر به همراه پوسته‌پوسته شدن در پوشش آرماتور ایجاد می‌شود عرض ترک‌ها در سطح عملکرد LS به 1/8" محدود می‌شود. در سطح عملکرد CP جدا شدن پوشش بتن و ترک‌های عریض به‌طور واضح در المان‌های تیر و ستون قابل مشاهده است. از مقادیر ترک خوردگی در تحلیل‌های انتقال حرارت استفاده شده است. در این تحقیق بر مبنای جدول C1-3 تغییر مکان نسبی^۸ کلی سازه در سطوح عملکرد IO، LS و CP به ترتیب برابر ۰/۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است.

۳-۳- مدل اجزای محدود

۳-۱- مدل سازه‌ای

هدف از این تحقیق ارزیابی حساسیت قاب بتن آرمه در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله است. برای این منظور یک سازه سه‌بعدی ۷ طبقه با ۴ دهانه ۵ متری با پلان مربع در نظر گرفته شده است. برای طراحی سازه فرض شده است ساز در یک منطقه با لرزه‌خیزی زیاد ($A=0.3g$) و در زمین نوع سه واقع شده است. بار مرده برابر 600 Kg/m^2 و بار زنده برابر 200 Kg/m^2 در نظر گرفته شده است. برای بارگذاری جانبی از استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده شده و قاب بتن آرمه بر اساس استاندارد طراحی سازه‌های بتن آرمه 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 ضریب کشسانی^۹ $2e5 \text{ Mpa}$ استفاده شده است.

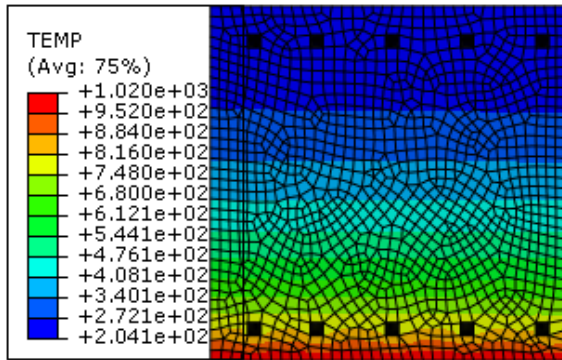
جدول ۲- مقاطع سازه‌ای قاب بتن آرمه

طبقه	مقاطع بتن آرمه			
	تیر	ستون	بعد	پس از آرماتور
۱	۲۰-۸	۲۰-۷	۷۰	۲۲-۲۰
۲	۲۰-۸	۲۰-۷	۶۵	۲۲-۲۰
۳	۱۶-۸	۱۶-۶	۵۵	۲۰-۱۸
۴	۱۶-۷	۱۶-۶	۵۰	۱۸-۲۰
۵	۱۲-۷	۱۲-۶	۴۵	۱۸-۲۰
۶	۱۲-۷	۱۲-۵	۳۵	۱۶-۱۸
۷	۱۲-۵	۱۲-۴	۳۵	۱۶-۱۸

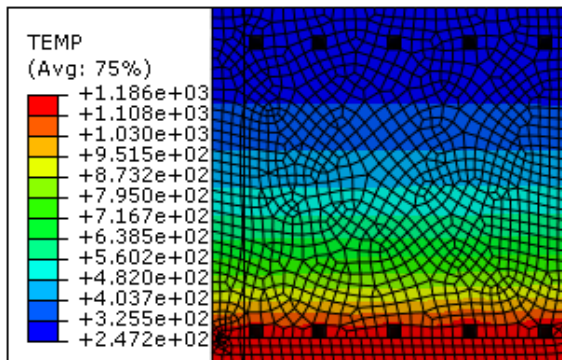
10. Plasticity

8. Drift

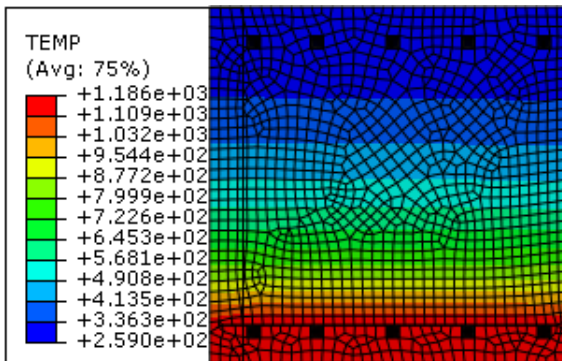
9. Plasticity modulus



(الف)



(ب)

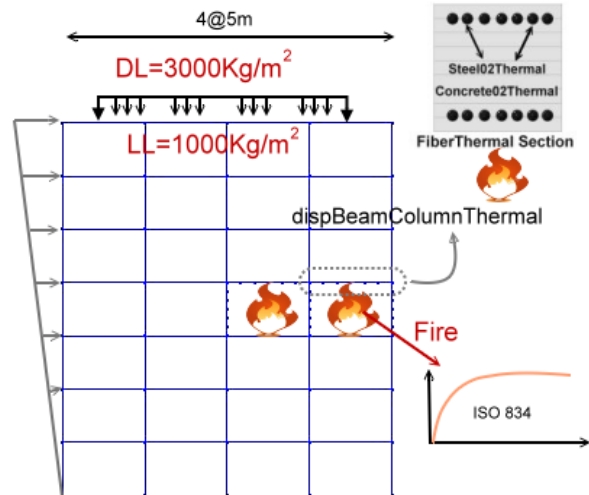


(ج)

شکل ۵- نتایج تحلیل انتقال حرارت در مقطع تیر: (الف) مقطع سالم، (ب) مقطع در سطح عملکرد LS، (ج) مقطع در سطح CP

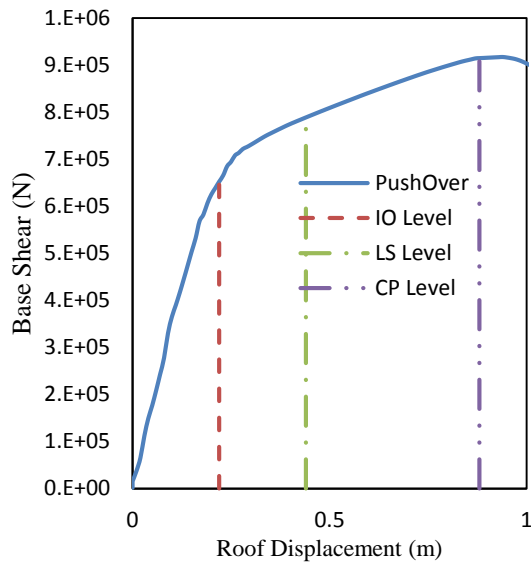
در تحلیل آتش‌سوزی پس از زلزله از تحلیل حرارتی پس از تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) استفاده شده است. در شکل (۷) منحنی پوش‌آور قاب موردنظر و سه سطح عملکرد متناظر با آن نشان داده شده است. سازه در هر سه سطح عملکرد به‌صورت مجزا پوش شده و سپس در معرض بار آتش قرار گرفته است. در واقع تحلیل‌های حساسیت در این تحقیق در چهار سناریو انجام شده است. در سناریوی اول سازه بدون پوش شدن در معرض بار حرارتی قرار گرفته است. در سناریوی دوم سازه پس از پوش تا سطح IO در معرض بار حرارت قرار گرفته است. و در سناریوی سوم و چهارم به‌ترتیب پس از پوش در سطح LS و CP در معرض بار حرارتی قرار گرفته است.

برای انجام تحلیل انتقال حرارت از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. برای انجام تحلیل انتقال حرارت از مشخصات حرارتی ارائه‌شده در بخش (۲-۲) و منحنی حرارتی در بخش (۳-۲) استفاده شده است. مقاطع در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند.



شکل ۴- مدل اجزای محدودی قاب بتن‌آرمه با خواص مکانیکی حرارتی

پس از تحلیل انتقال حرارت ارتفاع هر مقطع به ۹ قسمت تقسیم‌شده و برای هر قسمت منحنی دما- زمان آن مقطع از نرم‌افزار آباکوس استخراج شده و در نرم‌افزار اپنسیس برای تحلیل مکانیکی حرارتی استفاده شده است. برای نمونه در شکل (۵) نتایج تحلیل انتقال حرارت برای مقاطع بتن‌آرمه برای سه سطح IO، LS و CP نشان داده شده است. برای سطح LS فرض شده است کندن شدن بتن در اثر اعمال بار جانبی در ناحیه پوشش اتفاق افتاده است و مرز اعمال بار حرارتی از این محدوده در نظر گرفته شده است. در سطح CP مرز بار حرارتی با فرض ایجاد کندگی بتن در ناحیه بالاتر از پوشش در نظر گرفته شده است. این روند برای مقاطع ستون مرکزی در ناحیه آتش‌سوزی با اعمال بار حرارتی به چهار وجه مقطع و برای دو ستون کناری برای سه وجه تکرار شده است. در نهایت از منحنی‌های دما- زمان ارتفاع‌های مقطع برای انجام تحلیل مکانیکی حرارتی در نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است. برای نمونه منحنی‌های دما زمان برای میله‌گردهای بالا و پایین تیر در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس این شکل افزایش سطح عملکرد باعث می‌شود دما در میله‌گردهای پایینی با سرعت بیشتری گرم شده و طبیعتاً باعث می‌شود در زمان کم‌تری مقاومت خود را از دست دهند. ایجاد ترک و کندگی بتن تأثیر کم‌تری بر آرماتورهای بالایی دارد و حساسیت دمای میله‌گردهای بالا به افزایش دما نسبت به میله‌گردهای پایینی کم‌تر است.

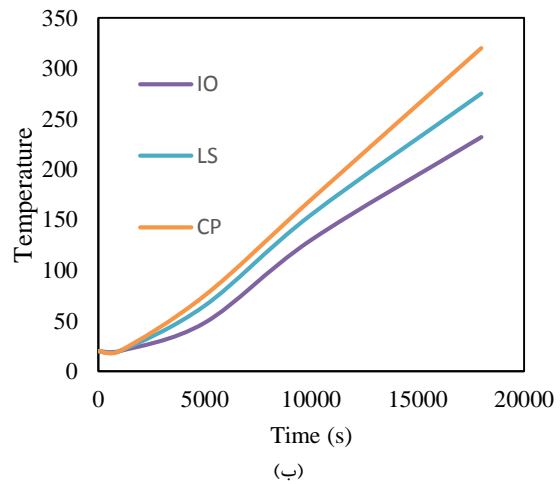
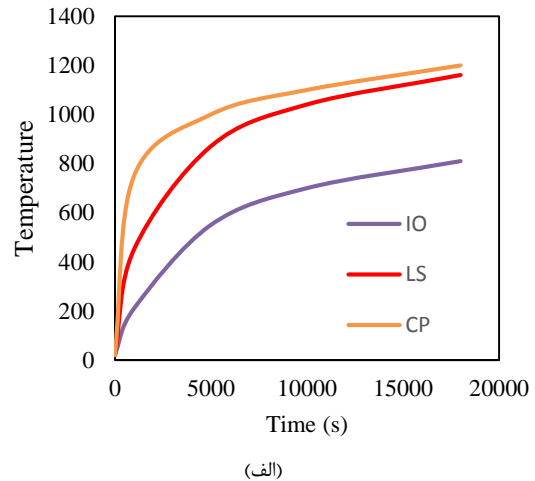


شکل ۷- منحنی پوش آور قاب بتن آرمه

۳-۳- صحت‌سنجی

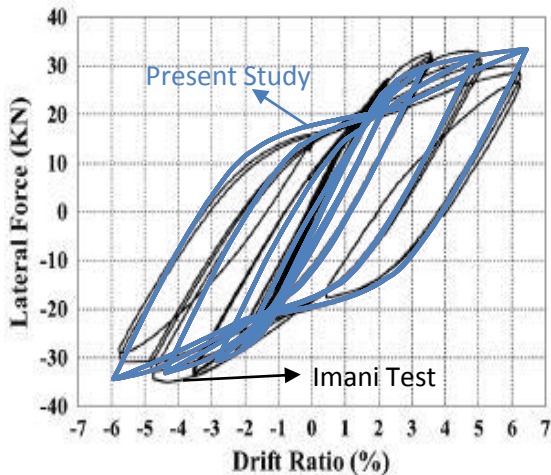
همان‌طور که قبلاً بیان شده است هدف از این تحقیق بررسی حساسیت زمان گسیختگی المان‌های سازه‌ای در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله است. بنابراین مهم‌ترین پارامتر در این تحقیق زمان گسیختگی در اثر آتش‌سوزی پس از زلزله است. با اینکه چند تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی در زمینه آتش‌سوزی پس از زلزله انجام شده است اما هنوز تحقیقی که در آن سازه بتن‌آرمه در اثر آتش‌سوزی به مرحله 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).

در این تحقیق از مدل آزمایشگاهی Imani و همکاران برای انجام صحت‌سنجی استفاده شده است. آن‌ها یک ستون مرکب را در معرض بارهای سیکلیک به‌صورت کنترل شونده توسط نیرو و پس‌از آن در معرض بار آتش قرار داده‌اند. سپس تغییر شکل‌های قائم و زمان دوام آن را در طی بار حرارتی بررسی نمودند. در شکل (۸) به‌صورت گرافیکی مدل آزمایشگاهی ایمانی نشان داده شده است:

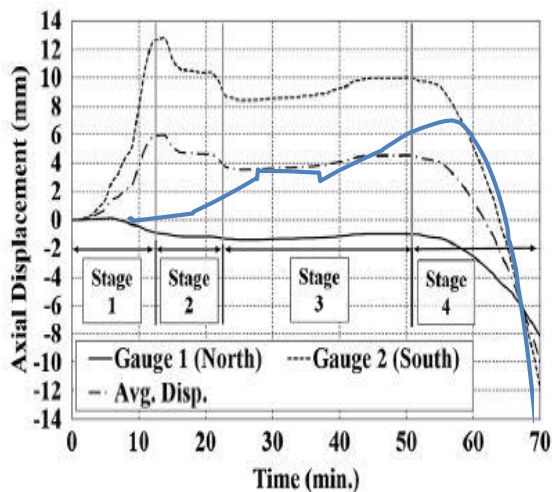


شکل ۶- منحنی دما زمان در آرماتور: الف) بالایی، ب) پائینی

در تحلیل آتش‌سوزی پس از زلزله از تحلیل حرارتی پس از تحلیل استاتیکی غیرخطی^{۱۱} استفاده شده است. در شکل (۷) منحنی پوش آور قاب موردنظر و سه سطح عملکرد متناظر با آن نشان داده شده است. سازه در هر سه سطح عملکرد به‌صورت مجزا پوش شده و سپس در معرض بار آتش قرار گرفته است. در واقع تحلیل‌های حساسیت در این تحقیق در چهار سناریو انجام شده است. در سناریوی اول سازه بدون پوش شدن در معرض بار حرارتی قرار گرفته است. در سناریوی دوم سازه پس از پوش تا سطح IO در معرض بار حرارت قرار گرفته است و در سناریوی سوم و چهارم به‌ترتیب پس از پوش در سطح LS و CP در معرض بار حرارتی قرار گرفته است.



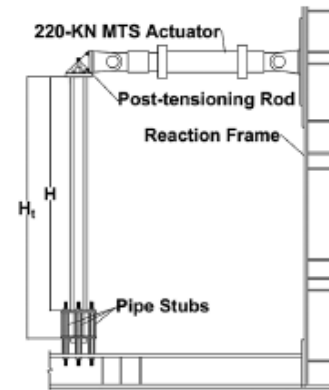
شکل ۹- منحنی چرخه‌ای در مدل آزمایشگاهی ایمانی و مدل عددی در تحقیق حاضر



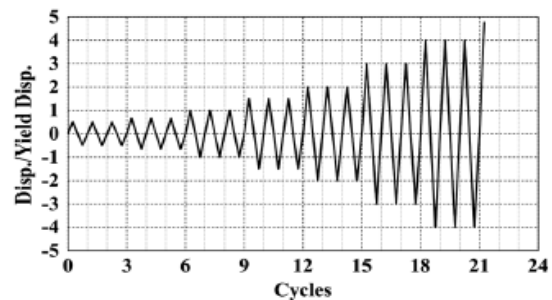
شکل ۱۰- منحنی تغییر مکان قائم نسبت به زمان در مدل آزمایشگاهی ایمانی و تحلیل عددی در تحقیق حاضر

۴- نتایج تحلیل

۴-۱- پاسخ قاب بتن آرمه در معرض آتش‌سوزی پس از زلزله پس از مرحله مدل‌سازی تحلیل‌های مکانیکی حرارتی برای بارگذاری‌های PEF (Post-Earthquake Fire) انجام شده است. پیش از بررسی حساسیت سازه‌ها به پارامترهای موردنظر تحقیق، پاسخ قاب بتن آرمه به بارگذاری‌های PEF بررسی شده است. در ابتدا قاب موردنظر برای سه سطح عملکرد IO، LS و CP پوش داده شده و سپس بار حرارتی متناسب با هر سطح عملکرد به دو دهانه از طبقه چهارم مطابق با شکل (۴) اعمال شده است. برای ارزیابی مقاومت قاب در برابر بارهای PEF جابه‌جایی قائم دهانه تیرهای در معرض بار حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۱۱) جابه‌جایی‌های قائم میانه تیر در دهانه آتش‌سوزی شده تحت بارهای PEF نشان داده شده است. زمان افزایش ناگهانی جابه‌جایی



(الف)

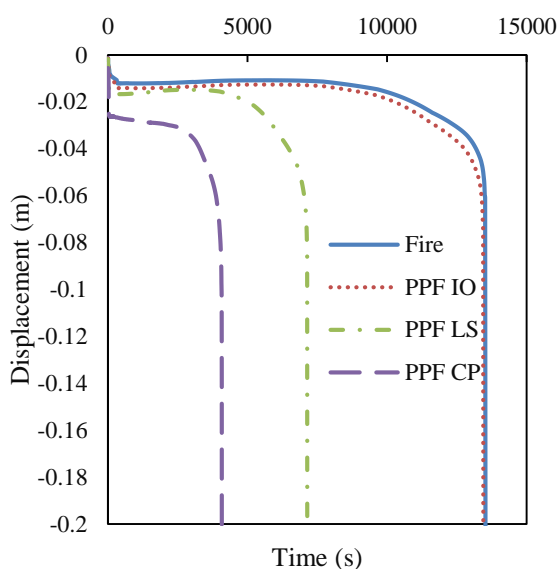


(ب)

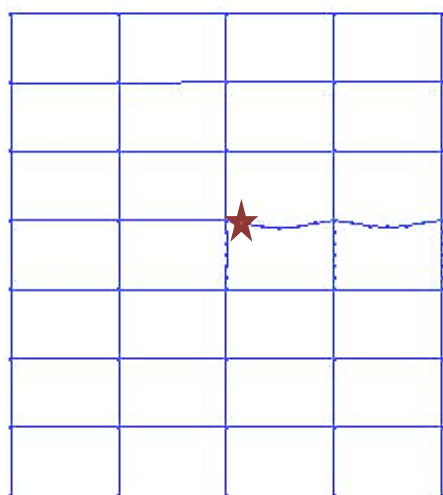
شکل ۸- مدل آزمایشگاهی Imani

برای مدل‌سازی این ستون مرکب از مصالح مکانیکی - حرارتی بتنی و فولادی استفاده شده است. برای المان‌ها با خواص مکانیکی حرارتی از Beam Column Thermal disp استفاده شده است. ستون مطابق با مدل آزمایشگاهی Imani مدل‌سازی و بارگذاری شد است. نتایج تحلیل سیکلیک این ستون تحت بار جانبی در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج تحلیل مکانیکی غیرخطی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد منحنی برش پایه- دررفت در نمونه‌های آزمایشگاهی ایمانی و مدل عددی در این تحقیق دارای همگرایی خوبی می‌باشند.

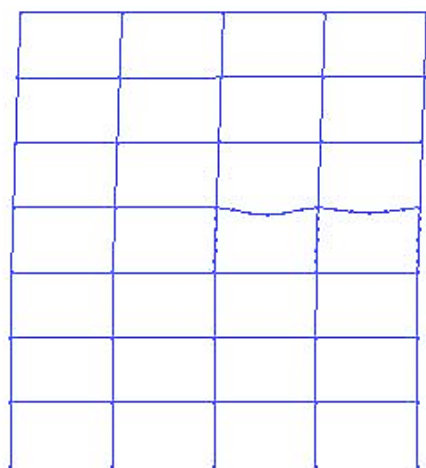
در ادامه پس از تحلیل سیکلیک بار حرارتی مطابق با مدل آزمایشگاهی Imani به ستون اعمال شده است. شکل (۱۰) منحنی‌های تغییر شکل قائم- زمان برای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در تحقیق حاضر نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد تغییر مکان قائم ستون در محدوده تغییر شکل‌های قائم در گنج‌های مختلف موجود در سرستون مدل آزمایشگاهی بوده و زمان گسیختگی در مدل عددی تحقیق حاضر نسبت به مدل آزمایشگاهی ایمانی دقت کافی دارد. جابه‌جایی قائم در مدل عددی نزدیک به مقدار میانگین گنج‌های ۱ و ۲ در مدل آزمایشگاهی (شکل (۱۰)) است که نشان‌دهنده صحت نتایج عددی در این تحقیق است.



شکل ۱۱- منحنی مقاومت قاب تحت بارگذاری های آتش و PEF



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- تغییر شکل قاب در لحظاتی قبل از گسیختگی:

(الف) در بار حرارتی تنها، (ب) در بار PEF در سطح CP

قائم تیر به عنوان گسیختگی سازه تحت بارهای PEF در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که در تحلیل PEF مقاومت قاب در سطح عملکرد IO تقریباً با مقاومت در حالتی که قاب به تنهایی در معرض بار حرارتی قرار گرفته است برابر است. در این سطح سازه به مدت ۱۳۸۱۶ ثانیه در برابر بار PEF مقاومت کرده است و پس از آن اولین گسیختگی در قاب رخ داده است. با افزایش سطح عملکرد و اعمال جابه جایی بیشتر در تحلیل پوش آور مقاومت سازه در برابر بار PEF کاهش می یابد. زمان گسیختگی در قاب مورد نظر در تحلیل PEF در سطح عملکرد LS به حدود ۷۱۴۰ ثانیه کاهش یافته است. در سطح عملکرد CP زمان گسیختگی به ۴۰۷۶ ثانیه کاهش یافته است. این کاهش تنومندی ناشی از جابه جایی های ماندگار در اثر اعمال بار لرزه ای و لحاظ کردن اثر ترک خوردگی در تحلیل انتقال حرارت است. تغییر شکل های قاب در لحظاتی قبل از گسیختگی در شکل (۱۲) برای حالت آتش سوزی و PEF در سطح CP نشان داده شده است. بر اساس این شکل تغییر شکل های قاب در بارگذاری PEF در سطح CP بسیار بیشتر از قاب در حالتی است که تنها تحت بارگذاری حرارتی قرار داشته است. این در حالی است که زمان گسیختگی در بارگذاری PEF (CP) برابر با ۴۰۷۶ ثانیه و در بارگذاری آتش تنها برابر ۱۳۸۱۶ ثانیه است. نتایج نشان می دهد زمان گسیختگی در آتش سوزی پس از سطوح مختلف بار جانبی می تواند بسیار کم تر (حدود ۲۹٪) از حالتی باشد که سازه تنها تحت بارگذاری حرارتی قرار دارد.

اگرچه کمانش ستون، ناپایداری طبقه با افزایش دریافت و گسیختگی تیر که با اندازه گیری تغییر مکان وسط دهانه قابل اندازه گیری است می تواند سه مود گسیختگی غالب در این تحقیق باشد اما نتایج تحقیق نشان داده است مود گسیختگی تیر که با افزایش ناگهانی وسط دهانه همراه است محتمل ترین حالت گسیختگی در سازه های بتن آرمه است.

در ادامه روند تحقیق منحنی تنش و کرنش میله گرد پائین در تیر در ناحیه اتصال به ستون (ستاره در شکل (۱۲)) مورد ارزیابی قرار گرفته است. این منحنی ها برای حالت بارگذاری حرارتی و PEF در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این منحنی ها تا لحظاتی قبل از گسیختگی استخراج شده اند. مقدار کرنش ها در لحظه گسیختگی به شدت افزایش می یابد که نشان دادن آن باعث می شود منحنی های تنش کرنش به درستی قابل مقایسه نباشند به همین دلیل این منحنی ها تا لحظاتی قبل از گسیختگی ارائه شده اند. در بارگذاری PEF تنش ها تحت اثر بار جانبی از حالت فشاری به حالت کششی تغییر یافته و پس از باربرداری به مقدار اولیه خود تحت اثر بار ثقیل رسیده اند. با افزایش دما تنش ها مقداری افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود می رسند و سپس روند کاهشی را طی می کنند.

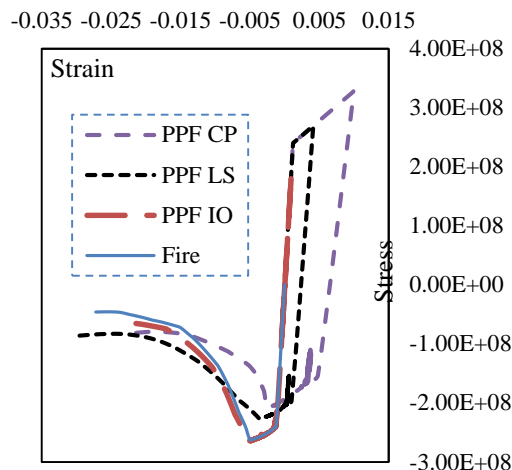
جدول ۳- متغیرهای تصادفی (Kim, ۲۰۱۱; Guo, ۲۰۱۴; Iqbal, ۲۰۱۱; Parisi, ۲۰۱۱)

نوع توزیع	COV (%)	میانگین	ویژگی
لاگنرمال ^{۱۳}	۱۰	۲۴۰ Mpa	تنش تسلیم (Fy) آرما تور
نرمال	۵	۲۰۰۰۰ Mpa	مدول (E) الاستیسیته آرما تور
لاگنرمال	۱۰	۲۱ Mpa	مقاومت بتن (Fc)
نرمال	۱۰	۳۰۰۰ Kg/m	(Dead Load) بار مرده
گاما	۸۰	۱۰۰۰ Kg/m	بار (Live Load) زنده
گاما	۵	۵ m	طول دهانه (Lenth)
تعیینی	-	۴ cm	پوشش (Cover)

برای مقایسه حساسیت با سه روش مختلف، نتایج حاصل از روش MCS و FOSM نیز در همان نمودارهای TDA ارائه شده است. نمودارهای گردبادی بر اساس میانگین به علاوه منهای دو برابر انحراف معیار متغیرهای تصادفی توسعه داده شد. عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده برای این تحقیق مربوط به کل پروسه تحلیل است و در هر دو تحلیل مکانیکی- حرارتی اعمال شده است. به- عنوان مثال توزیع مربوط به مقاومت بتن از ابتدای مرحله بارگذاری ثقلی، بارگذاری جانبی و بارگذاری حرارتی در نظر گرفته شده است. بنابراین تغییر این پارامتر بر تمامی پاسخ‌های سازه در سه گام عنوان شده تأثیرگذار خواهد بود.

تمامی متغیرهای تصادفی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است بر مبنای پژوهش‌های معتبری که قبلاً انجام شده است انتخاب شده است. در دید نخست به نظر می‌رسد که تغییر مدول الاستیسیته آرما تور نتواند تأثیری در پاسخ نهایی داشته باشد اما نتیجه نشان داده است که تغییر همین پارامتر نیز می‌تواند بر زمان گسیختگی سازه تغییر ایجاد کند.

در ابتدا نتایج حاصل از تحلیل MCS به صورت منحنی‌های CDF^{۱۴} برای زمان گسیختگی نسبت به متغیرهای تصادفی بررسی شده است. در شکل (۱۴) منحنی‌های CDF برای قاب مورد نظر در تحلیل PEF در حالت‌های IO، LS و CP نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو نشان می‌دهد با افزایش سطح عملکرد زمان مقاومت سازه در برابر بار آتش کاهش می‌یابد. با افزایش سطوح عملکرد از میزان پهنای منحنی‌ها کاسته می‌شود که نشان می‌دهد با افزایش سطوح عملکرد میزان پراکندگی و حساسیت



شکل ۱۳- منحنی تنش کرنش در آرما تور پائینی در تیر تحت بارگذاری حرارتی و PEF

با افزایش دما در تحلیل PEF در سطح CP بیشینه تنش در میله‌گرد مورد نظر نسبت به بار حرارتی تنها کاهش می‌یابد. کرنش‌ها در این حالت نسبت به بار حرارتی تنها، در زمان کم‌تری افزایش می‌یابند و گسیختگی سریع‌تر ایجاد می‌شود.

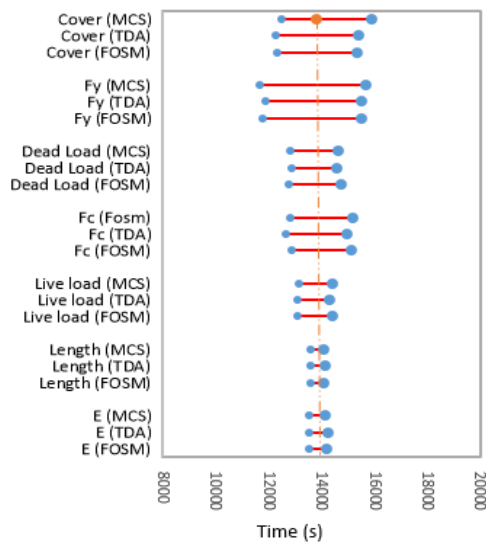
۲-۴- تحلیل حساسیت

پس از بررسی پاسخ قاب بتن آرمه تحت بارهای PEF حساسیت زمان اولین گسیختگی قاب بتن آرمه در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله بررسی شده است. با استفاده از تحلیل‌های PEF حساسیت زمان گسیختگی با استفاده از سه روش MSC، TDA و FOSM بررسی شده است. برای انجام تحلیل حساسیت از پارامترهای تنش تسلیم آرما تور (Fy)، مدول الاستیسیته آرما تور (E)، مقاومت بتن (Fc)، بار مرده و زنده^{۱۴}، طول دهانه و پوشش بتن به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است. مشخصات تابع توزیع، میانگین و COV این متغیرها در جدول (۳) نشان داده شده است. در روش‌های TDA و FOSM، SD زمان گسیختگی به موجب SD های متغیر تصادفی به عنوان اندازه حساسیت متغیرهای مورد نظر لحاظ شده است. در انجام تحلیل‌های حساسیت برای یک پارامتر خاص سایر پارامترها در مقدار میانگین خود در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌های حساسیت به فورم دیاگرام تورنادو ارائه شده است. متغیر بودن زمان گسیختگی به علت متغیر بودن یک متغیر تصادفی به عنوان «نوسان» تعریف می‌شود. یک اندازه نوسان بزرگ‌تر نتیجه اثر بزرگ‌تری از متغیر تصادفی متناظر را در زمان گسیختگی می‌دهد.

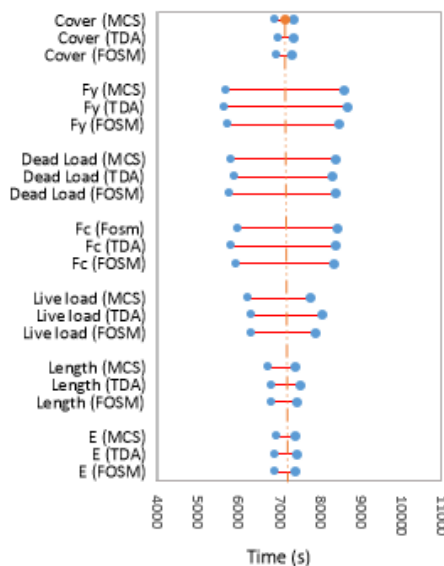
13. Log-Normal

14. Cumulative Distribution Function

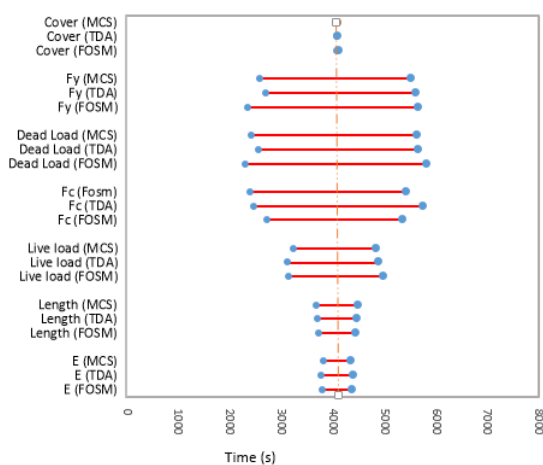
12. Dead and live load



(الف)



(ب)

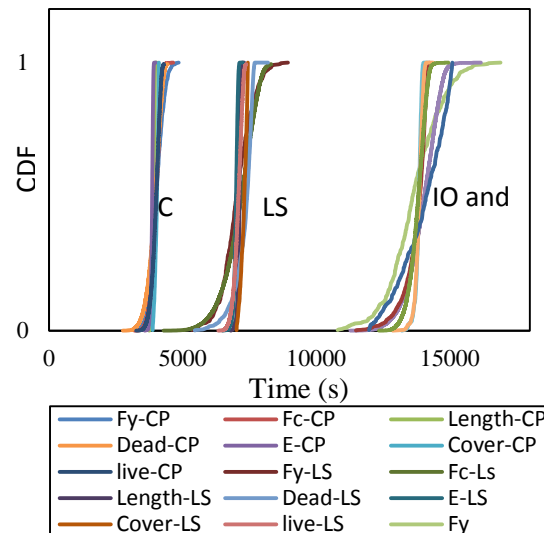


(ج)

شکل ۱۵- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در سطوح عملکرد:

(الف) IO، (ب) LS، (ج) CP

زمان گسیختگی کاهش می‌یابد. تعداد تحلیل‌های انجام‌شده در این تحقیق بر مبنای ضریب تغییرات هدف بوده است که به‌طور معمول در محدوده ده هزار تحلیل بوده است. بر مبنای تحقیق Kim (۲۰۱۱) محققین می‌توانستند از مقدار ۵٪ استفاده کنند اما برای افزایش دقت این مقدار برابر با ۱٪ انتخاب شده است.



شکل ۱۴- منحنی‌های CDF حاصل از تحلیل MCS

نتایج حاصل از حساسیت به سه روش موردنظر در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در شکل (۱۵) خط‌چین نشان‌دهنده مقدار زمان گسیختگی در حالتی است که تمامی متغیرهای تصادفی در مقدار میانگین خود قرار دارند. بر اساس شکل (۱۴) و (۱۵-الف) نتایج در حالتی که قاب بدون اعمال بار جانبی تحت بار آتش قرار می‌گیرد باحالتی که قاب پس از اعمال بار جانبی در سطح IO در معرض آتش قرار می‌گیرد یکی است. در این حالت تنش تسلیم آرماتور بیش‌ترین حساسیت و پوشش آرماتور دومین متغیر تصادفی است که بیش‌ترین حساسیت را در زمان گسیختگی ایجاد می‌کنند. طول دهانه و مدول الاستیسیته آرماتور کم‌ترین حساسیت را در بین متغیرهای تصادفی دارد.

نتایج حاصل از تحلیل‌های حساسیت در قاب بتن‌آرمه برای حالت آتش‌سوزی پس از سطح LS در شکل (۱۵-ب) نشان داده شده است. بر اساس این شکل و برخلاف شکل (۱۵-الف) پوشش آرماتور کم‌ترین حساسیت را در بین متغیرهای تصادفی دارد. در سطح LS تنش تسلیم آرماتور و مقاومت بتن بیش‌ترین حساسیت را در زمان گسیختگی سازه ایجاد کرده‌اند. در شکل (۱۵-ج) نتایج حاصل از تحلیل‌های حساسیت در سطح CP نشان داده شده است. در این سطح بارهای مرده، مقاومت بتن و تنش تسلیم آرماتور بیش‌ترین حساسیت را در زمان گسیختگی قاب موردنظر ایجاد کرده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد با افزایش سطوح عملکرد، بازه نوسانات متغیرهای تصادفی کاهش می‌یابد. نتایج تحلیل در سطوح مختلف عملکرد نشان می‌دهد نتایج سطوح مختلف عملکرد بیش‌ترین تأثیر را بر زمان گسیختگی قاب‌های بتن‌آرمه داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در بین پارامترهای طراحی و بارگذاری این تحقیق مقدار بار جانبی و تنش تسلیم آرماتور بیش‌ترین تأثیر را بر زمان گسیختگی قاب‌های بتن‌آرمه داشته است.

برای ارزیابی دقت تحلیل‌های FOSM و TDA در سناریوی آتش‌سوزی پس از زلزله میزان خطای این روش‌ها نسبت به روش MSC محاسبه شده است. خطا در روش‌های FOSM و TDA در جدول (۴) برای متغیرهای تصادفی نشان داده شده است. بر اساس این جدول بیش‌ترین خطا در روش FOSM برابر ۱/۱۹٪ و در تحلیل TDA برابر ۲/۱۶٪ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت روش FOSM دارای خطای کم‌تری در تحلیل حساسیت در قاب‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله است. همچنین

جدول ۴- درصد خطای اندازه نوسانات برای روش‌های TDA و FOSM

بار زنده	بار مرده	طول	پوشش بتن	مدول الاستیسیته	مقاومت بتن	تنش تسلیم	روش	عملکرد
۴,۷۵	-۹,۶	-۵,۹	۱۲,۵۱	-۸,۷	۶,۴۹	۷,۳	FOSM	عملکرد
-۰,۹۸	۶,۶۴	-۷,۷۶	۸	-۱۵,۵	۳,۰۳۵	۸,۹	TDA	بی‌وقفه
-۴,۶	-۱,۲۲	۷,۱۴	۱۸,۲	-۱۹,۱	-۳,۱۸	۵	FOSM	ایمنی جانی
-۱۲	۷,۶۳	-۵,۷	۲۱,۶	-۱۲	-۳,۱	-۵,۴۷	TDA	ایمنی جانی
-۱۲,۴	-۹,۲۵	۵	۰,۵	-۱۲	۱۳,۴	-۱۲,۸	FOSM	آستانه
-۹,۷	۳,۲۵	۱۲,۵	-۱,۲۵	-۲۰	-۸,۵۳	۰,۲۷	TDA	فروریزش

۶- قدردانی

این پژوهش تحت حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گرنت BUT/388011/99 انجام شده است.

۷- مراجع

- Bommer JJ, Boore DM, "Engineering seismology; encyclopaedia of geology", New York, Academic Press, 2004.
- Choi H, Sanada Y, Kashiwa H, Watanabe Y, Tanjung J, Jiang H, "Seismic Response Estimation Method for Earthquake-Damaged RC Buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2016, 45, 99-1018.
- Dwaikat MB, Kodur VKR, "Fire induced spalling in high strength concrete beams", Fire Technology, 2010, 46, 1, 251-274.
- Elhami Khorasani N, Garlock M, Quiel S, "Modeling steel structures in OpenSees: Enhancements for fire and multi-hazard probabilistic analyses", Computers and Structures, 2015, 157, 218-231.
- Ervine A, "Damaged Reinforced Concrete Structures in Fire", Edinburgh University, PhD Thesis, 2012.
- FEMA356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings: FEMA356, in rehabilitation requirements. Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2000.
- Gui-rong L, Yu-Pu S, Fu-Lai Q, "Post-fire cyclic behavior of reinforced concrete shear walls", Journal of Central South University, Technol, 2010, 17, 1103-1108.
- Guo Q, Jeffers AE, "Finite-Element Reliability Analysis of Structures Subjected to Fire", Struct Engineering ASCE, 2014, 49, 793-811.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی حساسیت متغیرهای تصادفی در زمان گسیختگی قاب‌های بتن‌آرمه در معرض بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله بود. در ابتدا با استفاده از سه روش TDA, MSC و FOSM حساسیت قاب‌های بتن‌آرمه در بارگذاری حرارتی پس از پوش سازه بررسی شده است. نتایج نشان داده است روش FOSM خطای کم‌تری را تحلیل حساسیت در بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله نسبت به روش TDA ایجاد می‌کند. زمان گسیختگی قاب بتن‌آرمه برخلاف قاب فولادی (Elhami Khorasani و همکاران، ۲۰۱۵) در بارگذاری آتش‌سوزی پس از زلزله با افزایش سطح عملکرد کاهش می‌یابد. این کاهش برای سطح LS برابر با ۵۱٪ و در سطح عملکرد CP برابر با ۲۹٪ محاسبه شده است. کاهش زمان گسیختگی در بارهای لرزه‌ای مختلف نشان می‌دهد زمان گسیختگی نسبت به بار لرزه‌ای بیش‌ترین حساسیت را دارا است. در تمامی سطوح عملکرد در بین پارامترهای طراحی تنش تسلیم آرماتور بیش‌ترین حساسیت را در بین سایر متغیرها داشته است. پوشش بتن یکی از حساس‌ترین متغیرهای تصادفی در حالتی است که قاب در بارگذاری حرارتی تنها یا آتش‌سوزی پس از بارهای جانبی در سطح IO قرار دارد. حساسیت این پارامتر در حالتی که سازه پس از سطح LS و CP در معرض بار حرارتی قرار گرفته است بسیار اندک است. مدول الاستیسیته آرماتور و طول دهانه کم‌ترین حساسیت را در بین پارامترهای مختلف داشته‌اند.

- Earthquakes and Structures, 2015, 9 (3), 639-656.
- Vamvatsikos D, Cornell CA, "Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics", 2011, 31 (3), 491-514.
- Youssef MA, Moftah M, "General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures", Engineering Structures, 2007, 29 (10), 2618-2634.
- Imani R, Mosqueda G, Bruneau M, "Experimental Study on Post-Earthquake Fire Resistance of Ductile Concrete-Filled Double-Skin Tube Columns", Journal of Structural Engineering, 2015, 141 (8), 257-273.
- Iqbal S, Harichandran RS, "Capacity reduction and fire load factors for LRFD of steel columns exposed to fire", Fire Safty, 2011, 46, 234-242.
- Kamath P, Kumar Sharma U, Kumar V, Bhargava P, Usmani A, Singh B, Singh Y, Torero J, Gillie M, Pankaj P, "Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame", Fire Safety Journal, 2015, 73, 1-19.
- Kim J, Park JH, Lee TH, "Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss", Engineering Structures, 2011, 33, 421-432.
- Kodur VR, Harmathy TZ, "Properties of building materials", in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, P.J. DiNenno, Ed., National Fire Protection Association, Quincy, Mass, USA, 2008.
- Lee TH, Mosalam KM, "Seismic Demand Sensitivity of Reinforced Concrete Shear-Wall Building Using FOSM Method", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34, 14, 1719-1736.
- Lie TT, Kodur VKR, "Thermal and mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete at elevated temperatures", Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23 (2) 511-517.
- Minson A, Eurocode 2-3. Concrete Structures, 2006, 40 (1), 30-31.
- Parisi F, Scalvenzi M, Brunesi E, "Performance limit states for progressive collapse analysis of reinforced concrete framed buildings", Structural Concrete, 2018, 1-17.
- Remesh K, Tan KH, "Performance comparison of zone models with compartment fire tests", Journal of Fire Sciences, 2011, 25 (4), 321-353.
- Scawthorn C, "Fire Following Earthquakes", New York, McGraw-Hill, 1992.
- Scawthorn C, Eidinger JM, Schiff AJ., "Fire following earthquake. Technical council on lifeline earthquake engineering", Monograph No. 26. Reston: Published by the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Scawthorn C, Eidinger JM, Schiff AJ, "Fire Following Earthquake", ASCE Publications, Reston, VA, 2005.
- Tavakoli HR, Kiakojouri F, "Numerical study of progressive collapse in framed structures: a new approach for dynamic column removal", International Journal of Engineering-Transactions A: Basics, 2013, 26.
- Tavakoli HR, Moradi Afrapoli M, "Robustness Analysis of Steel Structures with Various Lateral Load Resisting Systems under Seismic Progressive Collapse", Engineering Failure Analysis, 2018, 83, 89-101.
- Tavakoli HR, Rashidi A, Akbarpour S, "Effect of lateral force resisting system on seismic performance of special steel frames under progressive collapse", Sharif: Civil Engineering (In Persian), 2016, 31 (2), 101-108.
- Tavaloki HR, Naghavi F, Goltabar AR, "Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse",

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Sensitivity Analysis Methods in RC Frame exposed Post-Earthquake Fire

Majid Moradi, HamidReza Tavakoli*, GholamReza Abdolazhade

Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Received: 17 November 2019; Accepted: 12 January 2021

Keywords:

Post-earthquake fire, Sensitivity analysis method, RC frame, Consecutive even.

1. Introduction

Several loads over the lifetime of buildings threaten the safety of structures. Earthquake, fire, explosion and ... hazard that jeopardize the safety of the structure. The purpose of this study is to investigate the methods and effects of different parameters on the strength of reinforced concrete frames in the post-earthquake fire scenario. For this purpose, a 7-story concrete frame is designed and mechanically-thermally modeled. After modeling, using three methods of Monte Carlo simulation (MCS), Trento diagram (TDA) and first-order second moment (FOSM), the effect of design parameters on RC frame in post-earthquake fire loading was investigated.

2. Methodology

2.1. Sensitivity Analysis

Three different methods based on the probability theory were adopted: (1) Monte Carlo simulation (MCS), (2) Tornado Diagram Analysis (TDA), and (3) the First-Order Second Moment (FOSM) method. MCS is one of the methods widely used to analyze random problems. In this method, random variables are represented by sets of deterministic values that are used to produce sets of deterministic outputs. Then probabilistic forms of outputs are constructed. Because of its robustness, MCS is frequently used to validate other probabilistic analysis methods (Kim et al. 2011).

TDA is one of the sensitivity analysis tools commonly used in decision analysis. In TDA, the upper and lower bounds of a random variable are selected and the corresponding structural responses are obtained. The difference between such structural responses, referred to as swing, is considered as a measure of sensitivity.

In the FOSM method, means and standard deviations (SD) of random variables are assumed and the mean and SD of structural responses are obtained where SD can be used as a measure of sensitivity. The advantage of the FOSM method is that the analysis procedure is simpler than rigorous probabilistic methods such as the first-order reliability method, stochastic finite element method, and the MCS method, while major probabilistic properties of the structural responses can be obtained (Guo et al. 2014).

2.2. Thermo-Mechanical properties of materials

In this study, thermal conductivity and specific heat parameters are considered as a temperature function. Different values of thermal conductivity and specific heat of concrete materials are indicated in Fig. 1 and Fig. 2. Thermal characteristic of steel and concrete material in high temperature indicated in Table 1. In this study

* Corresponding Author

E-mail addresses: majid_moradi68@yahoo.com (Majid Moradi), tavakoli@nit.ac.ir (HamidReza Tavakoli), abdollahzadeh@nit.ac.ir (Gholam-Reza Abdolazhade).

heat transfer analysis was applied in Abaqus Software and mechanical thermal analysis was applied in open sees.

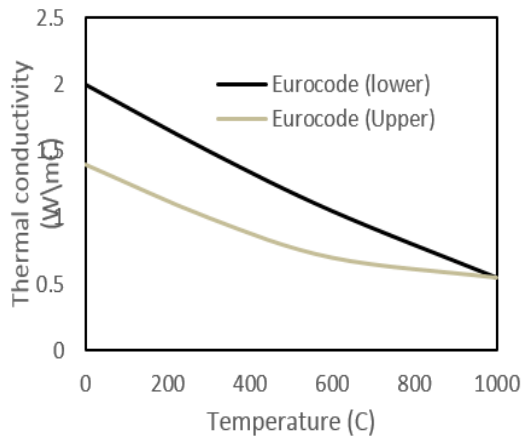


Fig. 1. Concrete thermal conductivity

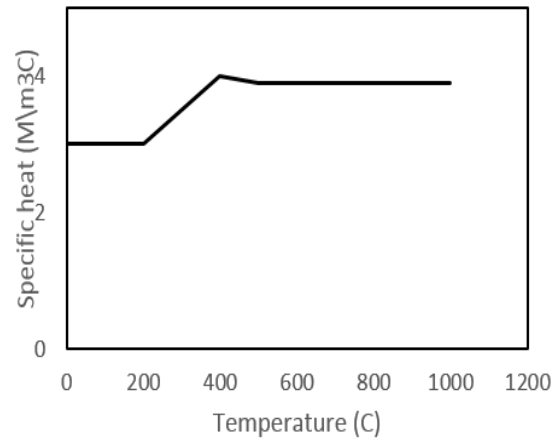


Fig. 2. Concrete specific heat

2.3. Fire Loading

In this research, the temperature curve provided by ISO 834 for the application of thermal load to the elements has been used. In this research, it is assumed that the thermal load is so applied to the structure as to cause a failure in the structure. The thermal loading in the structure continues so that one of the elements exposed to the thermal load is failed.

2.4. Earthquake load

In this research, pushover analysis is used to simulate structural behavior in seismic load. Three levels of IO, LS, and CP are considered for assessing the behavior of the structure in the post-earthquake fire scenario in push-overt analysis.

3. FE Modeling

In this research, a 7-story three-dimensional structure with 4span (5-meter) with a square plan is considered. After the initial design, the mid frame of the structure has been selected as a frame for mechanical-thermal analysis.

4. Analysis result

The results show that in the PEF analysis, the frame resistance at the IO performance level is approximately equal to the resistance in the case where the frame is exposed to fire load. At this level, the structure has resisted 13816 seconds, and then the first failure in the frame has occurred. The failure time in the frame in the PEF analysis has been reduced at a level of LS performance to about 7140 seconds. At the CP performance level, the failure time was reduced to 4076 seconds (Fig. 3).

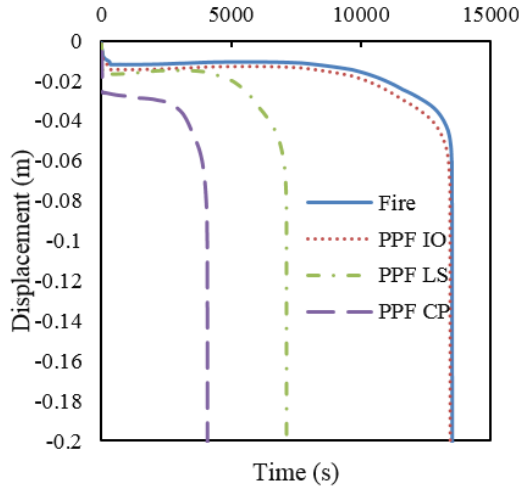


Fig. 3. Resistance of RC frame

After examining the response of a concrete frame under PEF loads, the sensitivity of the first time of the concrete frame failure in the post-earthquake fire scenario was investigated. Fig. 4 shows the CDF and for the frame in PEF analysis in IO, LS and CP level and CP level for stativity analyzing.

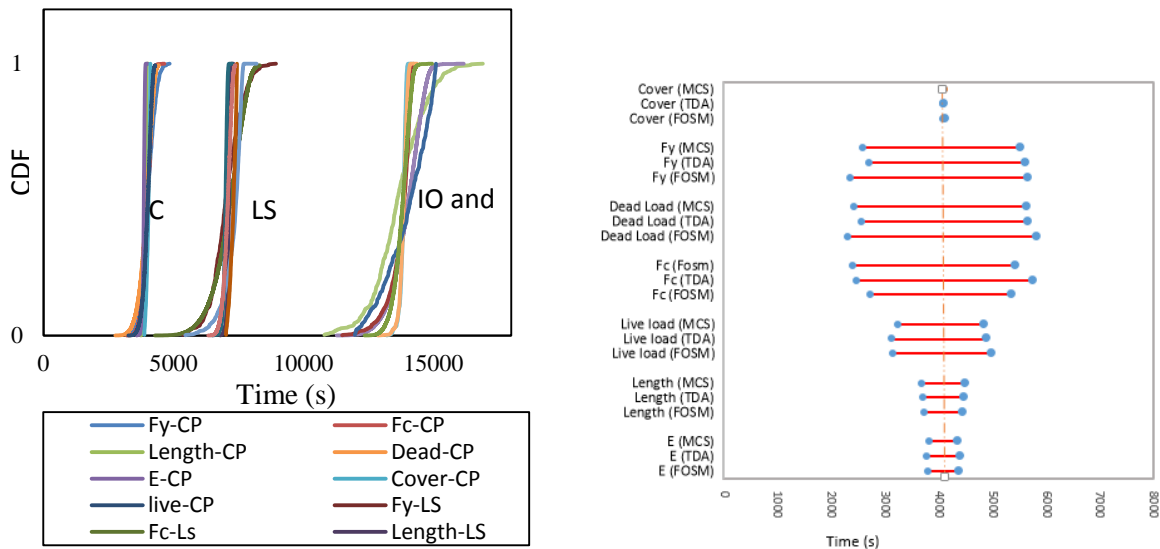


Fig. 4. CDF and Sensitivity result in CP performance level

5. Result

The failure time of a concrete frame decreases in post-earthquake fire loading by increasing the level of performance. This reduction is 51% for the LS level and 29% for the CP level. It shows that rupture time has the highest sensitivity to seismic load. At all performance levels, among the design parameters, the yield stress of the armature has the highest sensitivity among other variables. The modulus of elasticity of the armature and the length of the span have the least sensitivity among different parameters.

6. References

- Guo Q, Jeffers AE, "Finite-element reliability analysis of structures subjected to fire", Struct Engineering ASCE, 2014, 49, 793-811.
- Kim J, Park JH, Lee TH, "Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss", Engineering Structures, 2011, 33, 421-432.