

بررسی اثر همزمانی بارهای لرزه‌ای و انفجاری در قاب‌های بتن مسلح

غلامرضا استادی اصل^{۱*}، سمیه ملایی^۲، علی شاهمحمدی^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب

^۳ کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

چکیده

زلزله و انفجار از جمله نیروهای دینامیکی مهم می‌باشند که می‌توانند موجب ایجاد خرابی‌های شدید در سازه شوند. انفجار تاسیسات الکتریکی و مکانیکی موجود در ساختمان‌ها پس از وقوع زلزله و یا بالعکس، ایجاد زمین‌لرزه‌های القایی در پی انفجارهای مهیب زیرزمینی، اهمیت بررسی اثر همزمانی بارهای لرزه‌ای و انفجاری را نشان می‌دهد. با این وجود، توجه به تفاوت ماهیتی بارهای انفجار و زلزله و مشکلات مربوط به آزمایش‌های عملی و یا حتی مدل‌سازی همزمان این دو حالت، موجب شده تحقیقات در این زمینه بسیار اندک باشد. در این پژوهش با استفاده از حلگر صریح نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS یک قاب بتن مسلح تحت سناریوهای مختلف همزمانی بار زلزله و انفجار تحلیل گردید؛ این سناریوها شامل حالات مختلفی از انفجار قبل از و یا در حین زلزله، راستای اثر متعامد یا موازی زلزله و انفجار، و انفجار در وجه روبرو، جانبی و یا داخل قاب بود. مهم‌ترین یافته‌ها نشان داد که در هر سه حالت انفجار روبروی قاب، انفجار جانبی، و انفجار داخلی در شرایط بارگذاری زلزله و انفجار متعامد نسبت به بارگذاری هم‌راستا، آسیب بیشتری به سازه وارد گردید. تحت سناریوهای انفجار در مقابل سازه، جابجایی طبقات بیشتر به بار انفجار وابسته بوده و بار زلزله نقش تعیین‌کننده‌ای نداشته است. بطوری که حداکثر جابجایی در قابل حدود ۲۲ میلی‌متر در هر دو حالت انفجار قبل از زلزله و انفجار و زلزله همزمان یکسان بوده است. آسیب‌های ناشی از وقوع انفجار در وجه روبرویی قاب عمدتاً متوجه ستون‌ها و پای ستون، آسیب‌های ناشی از انفجار جانبی متوجه تیرها، و در نهایت، آسیب‌های ناشی از انفجار داخلی متوجه تیرها و ستون‌هایی بود که بر محل قرارگیری ماده منفجره محیط بودند. سناریوهایی که در آنها انفجار در طی جنبش نیرومند زمین‌لرزه اتفاق می‌افتاد، نسبت به حالت انفجار قبل از زلزله، بحرانی‌تر بوده و آسیب بیشتری به سازه وارد می‌کرد. همچنین، در حالت انفجار داخلی، با وجود مقدار بسیار کمتر وزن خرج انفجاری (۱۳ کیلوگرم) در قیاس با دو حالت انفجار روبرویی و جانبی، آسیب‌های شدید و گسترده در دهانه میانی طبقه اول و همچنین سایر قسمت‌های سازه مشاهده می‌شود. در نتیجه، بحرانی‌ترین حالت بارگذاری مربوط به انفجار داخلی باشد.

کلیدواژه‌ها: قاب بتن مسلح، زلزله، انفجار، همزمانی زلزله و انفجار، ABAQUS

۱- مقدمه

در اثر تکان‌های ناشی از زمین لرزه می‌تواند موجب آتش‌سوزی‌های وسیع و انفجارهای مهیبی گردد (حسینی و محمودآبادی، ۱۳۹۵). آسیب دیدن تاسیسات مکانیکی و الکترونیکی موجود در ساختمان در اثر زمین لرزه می‌تواند پیامد انفجاری در پی داشته باشد و این انفجار می‌تواند به خود ساختمان و یا ساختمان‌های مجاور آسیب‌های جدی وارد کند. ویا بالعکس وقوع انفجارهای مهیب در مجاورت سازه‌ها و یا زیر زمین می‌تواند علاوه بر انتقال بار ضربه‌ای به سازه موجب بروز زمین‌لرزه‌ی القایی در آن شود.

از جمله مخاطرات طبیعی پراهیمت در کشور ما پدیده زلزله است، که همواره خسارات جانی و مالی فراوانی را به مناطق مستعد زلزله وارد می‌نماید. براساس ارزیابی‌های انجام شده در زلزله‌های مختلف مشخص گردیده است بعضاً، خسارات مالی و جانی ناشی از آسیب به اجزای غیرسازه‌ای از مقدار آسیب وارده بر اجزای سازه‌ای تجاوز می‌نماید. به عنوان مثال شکست لوله‌های گاز شهری

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۴۱۲۵۹۳۷

با وجود این که مطالعات متعددی در بررسی جداگانه اثرات زلزله و انفجار بر ساختمان‌ها انجام گرفته اما بدلیل ماهیت متفاوت این دو نوع بارگذاری، و پیچیدگی و هزینه‌بر بودن آزمایش‌های تجربی و حتی مدل‌سازی نرم افزاری، تعداد پژوهش‌هایی که به بررسی همزمانی اثر زلزله و انفجار پرداخته‌اند انگشت شمار می‌باشد. به‌ویژه سهم ساختمان‌های بتن‌آرمه از این پژوهش‌ها بسیار اندک است. در اینجا به تعدادی از معدود مطالعات انتشار یافته در این حوزه اشاره می‌شود.

Faghihmaleki و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی و مقایسه ریسک خطر احتمالاتی زلزله‌های حوزه نزدیک و دور در یک سازه فولادی به‌همراه انفجار گاز پرداختند. **Zhou** و **Haoa** (۲۰۱۱) پژوهشی با موضوع تحلیل پاسخ سازه‌های صلب به بارهای لرزه‌ای و انفجاری ناشی از زمین‌لرزه انجام دادند. **Abdollahzadeh** و **Faghihmaleki** در یک سری از مطالعات ارزیابی احتمالاتی فروریزش ساختمان تحت اثر همزمانی زمین‌لرزه و انفجار گاز، مقاومت سازه در برابر زلزله و انفجار، و نقش به‌سازی لرزه‌ای در جهت افزایش مقاومت در انفجار را بررسی کردند (**Abdollahzadeh** و **Faghihmaleki**، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷). در مطالعه‌ای دیگر، **Faghihmaleki** و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی خطر همزمانی زمین‌لرزه و انفجار در قاب‌های خمشی بتن مسلح با دیوار برشی را انجام دادند. **Xue** و همکاران (۲۰۲۲) یک ضریب خرابی برای ساختمان بتن مسلح دارای دیوار برشی تحت بارهای لرزه‌ای و انفجاری متوالی تعریف کردند. **Abdollahzadeh** و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تخریب پیشرونده در اثر توالی بارهای لرزه‌ای و انفجار گاز در ساختمان فولادی پرداختند.

بطور کلی، بررسی اثر همزمان انفجار و زلزله بر سازه جزء موضوعاتی است که مطالعات و تجربیات در این زمینه بسیار اندک است (**Wang** و همکاران، ۲۰۲۳؛ **Asming** و همکاران، ۲۰۲۲). بررسی مطالعات پیشین در این زمینه مشخص کرد که مطالعات اندکی در خصوص اثرات همزمان بارهای زلزله و انفجار انجام شده است. بنابراین در اینجا، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود **ABAQUS** یک قاب بتن مسلح دویبعی دارای سه طبقه و سه دهانه به مقیاس ۱/۳ ابعاد واقعی در معرض بارهای انفجار و زلزله مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. بررسی و مقایسه شدت و الگوی آسیب‌های وارده به سازه و رفتار دینامیکی سازه در حالت‌های مختلف همزمانی بارهای لرزه‌ای و انفجاری انجام می‌شود. همچنین، بحرانی‌ترین حالت سازه‌ی بتن‌آرمه در همزمانی بارهای لرزه‌ای و انفجاری ارزیابی می‌گردد. در این مطالعه، میزان خرابی ناشی از انفجارهای درون‌سازه‌ای و برون‌سازه‌ای و همچنین تاثیر راستای اعمال بارهای لرزه‌ای و انفجاری نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بنابراین، در این پژوهش تلاش بر این است که حالات مختلفی از همزمانی بارهای لرزه‌ای و انفجاری مورد مطالعه قرار گیرد.

با وجود پژوهش‌های متعدد در حوزه‌ی بررسی جداگانه اثرات انفجار و زمین‌لرزه بر سازه‌ها، اما تحقیقات در مورد بررسی اثر همزمانی این دو نوع بارگذاری بسیار اندک می‌باشد. زلزله و انفجار بارگذاری‌های مخربی در سازه‌ها هستند و دیدگاه‌های مختلفی برای تأثیر این بارها بر سازه‌ها وجود دارد. اما تلفیق موج انفجار با زلزله می‌تواند تأثیرات متفاوتی برای سازه داشته باشد که کمتر به این موضوع پرداخته شده است (مجیدی و عموشاهی، ۱۳۹۸).

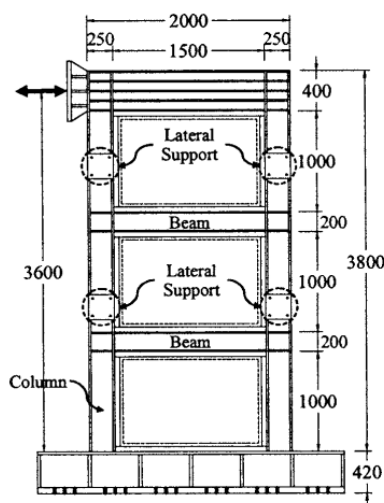
Kumar و همکاران (۲۰۲۱) به مرور تحلیل خرابی پیشرونده در سازه‌های قاب بتن مسلح در برابر بار انفجار پرداختند. **Ahmed** و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود با موضوع تاثیر فاصله بین ستون‌ها در پاسخ سازه بتن مسلح در برابر بار انفجار، به این نتیجه رسیدند فاصله بین مراکز جرم و سختی اعضای سازه بر پاسخ قاب تأثیر می‌گذارد. **Ibrahim** و همکاران (۲۰۱۹) به موضوع استفاده از پوشش کامپوزیت فولادی در مقاطع بتن مسلح در ستون‌های خارجی سازه‌ی بتن مسلح تحت انفجار پرداختند. **Jahami** و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر استفاده از الیاف پلیمر کربنی را به عنوان تقویت‌کننده در تیرهای بتن مسلح در برابر انفجار مطالعه کردند. همچنین، **Ibrahim** و همکاران (۲۰۱۷)، **Dasari Sudheer** و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی رفتار ساختمان بتن مسلح در مقابل انواع بارهای انفجار پرداختند. **Mollaee** و **Esameelnia** (۲۰۱۷) مقاومت‌سازی ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار را مطالعه کردند. محمدی زاده و علیخان محمدی (۱۴۰۲) اتاق‌های بتن مسلح ضد انفجار را به روش اویلر-لاگرانژ کوپل مورد تحلیل قرار دادند و آسیب‌پذیری این سازه‌ها را تحت اثرات ضربه و انفجار ارزیابی کردند.

مطالعات متعددی به روی قاب‌های بتن مسلح تحت بار زلزله انجام گرفته است که از آن میان می‌توان به مطالعه‌ی **Du** و همکاران (۲۰۲۱) بر عملکرد لرزه‌ای قاب بتنی با و بدون جداسازی از پایه، **Smirildo** و همکاران (۲۰۲۱) بر تاثیر استفاده از صفحات چوبی برای کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های بتنی، **Trapani** و همکاران (۲۰۲۰) بر پاسخ سازه قاب‌بتن مسلح با میانقاب‌های بنایی به خرابی پیشرونده تحت بار زلزله **Harrington** و همکاران (۲۰۲۰) بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح با ستون‌های مقاوم‌سازی‌شده اشاره نمود. همچنین، طهرانی و سالاری (۱۴۰۱) عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح دارای نامنظمی در پلان را در حالت تقویت‌شده با انواع مهاربندهای فولادی ارزیابی کردند. در مطالعه‌ای دیگر، بیرقی (۱۳۹۸) ترکیب دیوار برشی بتن مسلح با مهاربندهای کمانش‌تاب را در قاب‌های بلند ساختمانی تحت زلزله‌های دور از و نزدیک به گسل بررسی کردند.

۲- مواد و روش‌ها

جهت نیل به هدف پژوهش که یافتن بحرانی‌ترین سناریوی هم‌زمانی بارهای انفجار و زلزله برای سازه بتن مسلح می‌باشد ابتدا در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی قاب ۲ بعدی انجام شد. انتخاب مدل مرجع بصورت ۲ بعدی براین اساس صورت گرفت که در مطالعه آزمایشگاهی مرجع مورد استفاده در اینجا، قاب مورد آزمایش بصورت ۲ بعدی ساخته و تست شده است. همچنین، مدل‌سازی و تحلیل قاب‌های بتن مسلح ۳ بعدی در حلگر صریح نرم‌افزار ABAQUS بسیار زمان‌بر است و تعداد مدل‌های قابل بررسی را محدود می‌کند.

قاب مورد مطالعه در گذشته توسط Choi و Park (۲۰۱۱) مورد آزمایش بارگذاری چرخه‌ای قرار داده شده بود که صحت‌سنجی مدل ایجاد شده در اینجا نیز تحت شرایط بار چرخه‌ای مطابق با همان تحقیق انجام گرفت. در این قاب بتن مسلح، مقاومت فشاری بتن ۲۶.۴ مگاپاسکال، فولاد طولی ستون‌ها و تیرها به ترتیب ۶ عدد میلگرد نمره ۲۲ و ۴ عدد میلگرد نمره ۱۶ است. مقطع ستون‌ها $300 \times 300 \text{ mm}$ و تیرها $300 \times 200 \text{ mm}$ است. سایر جزئیات سازه مرجع در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مشخصات قاب ساختمانی مرجع (Choi و Park،

(۲۰۱۱)

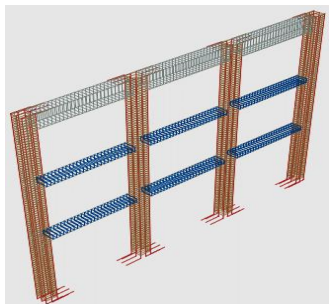
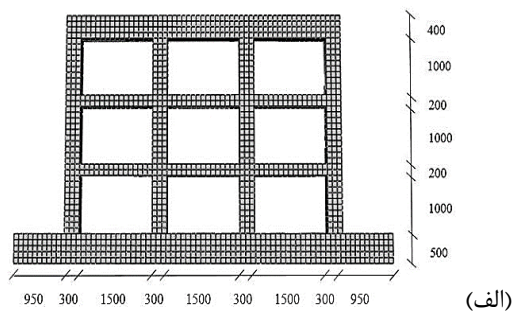
در ادامه، بعد از تعریف دوازده سناریوی مختلف هم‌زمانی بار انفجار و زلزله، تحلیل مدل‌ها به روش تاریخچه زمانی غیرخطی انجام گردید. نرم‌افزار ABAQUS مجموعه‌ای بسیار توانمند از برنامه‌های مدل‌سازی و تحلیل است که بر پایه روش اجزای محدود شکل گرفته است. این نرم‌افزار توانایی حل طیف گسترده‌ای از مسائل علمی و صنعتی شامل مباحث پیچیده دینامیکی غیرخطی را دارا می‌باشد. موتور حلگر صریح (Explicit) یکی از حلگرهای چند منظوره ABAQUS با هدف‌های خاص است که از روش‌های

انتگرال‌گیری صریح برای حل مسائل با درجه غیرخطی بالا که دارای اندرکنش‌های تماسی پیچیده و بارهای گذرا هستند، استفاده می‌کند.

چالش اساسی در این مطالعه، روش مدل‌سازی سازه تحت اثر هم‌زمان این دو نوع بارگذاری دینامیکی است که ماهیت متفاوت دارند. زمان بر بودن تحلیل‌های عددی در حلگر صریح ABAQUS و همچنین پیچیدگی استفاده از مدل‌های بزرگتر و سه بعدی بدلیل ارتباط مستقیم پیچیدگی مدل با مدت زمان انجام تحلیل از دیگر محدودیت‌های موجود بر سر راه این مطالعه است.

۲-۱- سازه مورد مطالعه

سازه مورد بررسی یک قاب بتن مسلح دوبعدی است که از سه طبقه و سه دهانه تشکیل شده است (شکل ۲) این ساختمان در سه طبقه که ارتفاع طبقات اول و دوم هر کدام ۱۲۰۰ میلیمتر و ارتفاع طبقه سوم ۱۴۰۰ میلیمتر (ارتفاع کل قاب از روی فونداسیون ۳۸۰۰ میلیمتر) است. طول دهانه ۱۵۰۰ میلیمتر بوده و روی فونداسیون بتن مسلحی به ابعاد 7600×1000 و ارتفاع ۵۰۰ میلیمتر قرار دارد. سیستم باربر ثقلی و جانبی آن، قاب خمشی بتن مسلح می‌باشد. ابعاد کلیه ستون‌ها 300×300 میلیمتر و ابعاد تیرهای طبقات یک و دو 300×200 میلیمتر و طبقه سه 300×400 میلیمتر می‌باشد. لازم ذکر است در مدل‌سازی سازه، بار مرده ثقلی نیز در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- مشخصات قاب ساختمانی مورد مطالعه در اینجا: (الف)

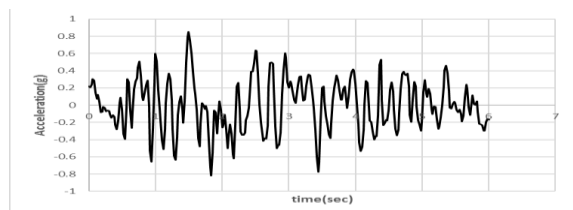
ابعاد هندسی؛ (ب) آرما توری

۲-۲- بارگذاری و تحلیل

در رکورد زلزله طبس در بازه زمانی ۹-۱۵ ثانیه اتفاق افتاده است (شکل ۳).

جدول ۱- مشخصات رکورد زلزله طبس (PEER، ۲۰۲۴)

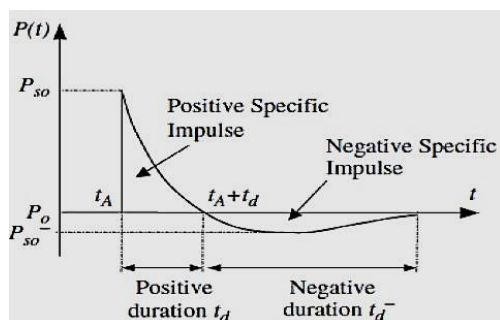
E.Q.	Acc. Name	Year	Station	Magnitude	PGA (g)
Tabas/Iran	RSN143_TABAS_TAB-L1	1978	Tabas	7.35	0.853



شکل ۳- جنبش نیرومند شتاب نگاشت زلزله طبس

۲-۲-۲- بارگذاری انفجار

در تعریف، انفجار آزاد شدن ناگهانی و در مقیاس بالای انرژی است (Habibi و Sahabi، ۲۰۱۶؛ Khaledy و همکاران، ۲۰۱۸). موج هوای فشرده ناشی از انفجار (موج اضافه فشار) به سمت خارج از مرکز انفجار توسعه یافته و با گذر زمان از شدت آن کاسته می‌شود. موج انفجاری دارای دو فاز است شامل فاز مثبت (فشار) و فاز منفی (مکش) است. در هر پدیده انفجار دو پارامتر مهم وجود دارد که عبارتند از اندازه وزن خرج (وزن مواد منفجره) W و فاصله‌ی بین منبع انفجار و هدف (فاصله رویارویی) R (Acosta، ۲۰۱۱؛ کورمی و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل ۴ تغییرات زمانی فشار ناشی از انفجار بطور شماتیک ترسیم شده است. t_A زمان رسیدن انفجار به سازه، P_{SO} بیشینه فشار مثبت بار انفجار، P_0 فشار محیط، P_{SO-} بیشینه فشار منفی، t_d^- زمان تداوم فاز منفی انفجار، و t_d^+ زمان تداوم فاز مثبت آن را نشان می‌دهد (Dusenberry، ۲۰۱۰).



شکل ۴- نمودار معمول فشار-زمان در انفجار (UFC، ۲۰۰۸)

یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه دستی پارامترهای بار انفجار روش ریشه سوم فاصله است (قانون ریشه سوم) و یا روش

روش‌های تحلیل دینامیکی شامل تحلیل طیفی و تاریخچه-زمانی است (Heidari و Majidi، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱؛ Kamgar و همکاران، ۲۰۲۱) که با توجه به مزایای تحلیل تاریخچه زمانی، در این پژوهش نیز برای بررسی پاسخ سازه تحت بار دینامیکی انفجار و زلزله از روش تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده گردید تا روند تغییر پارامترهای پاسخ دینامیکی بررسی گردد. روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی واقعی‌ترین رفتار سازه را تحت بار شرایط بار دینامیکی مدل‌سازی می‌کند (و همکاران، ۲۰۲۲). به منظور در نظر گرفتن بار ثقلی (وزن سازه) در نرم‌افزار ABAQUS بعد از استپ initial یک گام بارگذاری از نوع general static تعریف می‌گردد که در آن شتاب گرانش در جهت رو به پایین وارد می‌شود. استپ‌های بعدی مربوط به بارهای زلزله و انفجار بعد از این مرحله ایجاد می‌شود.

۲-۲-۱- بارگذاری زلزله

در اینجا، جهت کاهش زمان تحلیل صریح، تنها مدت زمان جنبش نیرومند زمین در رکورد زلزله در نظر گرفته شد. معمولاً چنانچه شتاب نگاشتی توسط ایستگاهی ثبت شود که فاصله آن ایستگاه از گسل کمتر از ۲۰ کیلومتر باشد به آن شتاب نگاشت نزدیک به گسل می‌گویند (Moustafa و Takewaki، ۲۰۱۰). مدت زمان حرکت قوی زمین پارامتری است که در آن غالب انرژی زمین‌لرزه برای ارتعاش یک سازه وجود داشته است. مدت زمانی از شتابنگاشت زلزله که به عنوان مدت زمان جنبش نیرومند زمین انتخاب می‌شود، باید حجم عمده‌ای از انرژی زلزله را دارا باشد. با در نظر گرفتن موارد فوق چهار روش برای تعیین مدت زمان زلزله وجود دارد که شامل مدت زمان یکنواخت، مدت زمان انتخابی، مدت زمان مؤثر و مدت زمان مهم می‌باشند (Bommer و Martinez-Pereira، ۱۹۹۹). در این مطالعه، از مفهوم مدت زمان مهم زلزله استفاده شده است. که مجموع مدت زمان‌های بین شتاب آریاس ۵ تا ۹۵ درصد است. از این مفهوم برای اعمال توأم انفجار و زلزله نیز استفاده شده است. هدف از استفاده این مفهوم در مطالعات، در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت مسئله بوده و از طرفی برای کاهش حجم محاسبات اجزای محدود صریح ضروری است.

در این پژوهش برای بررسی اثر همزمانی بارهای انفجار و زلزله، از مولفه افقی شتاب نگاشت زلزله نزدیک گسل طبس با مشخصات جدول ۱ که از سایت peer استخراج گردیده استفاده شد. برای لحاظ کردن بحرانی‌ترین بازه‌ی زلزله که بیشترین اثر را بر سازه دارد، شتاب نگاشت استخراج شده از سایت peer به نرم افزار Seismo Signal معرفی شده و شتاب‌های مربوط به مدت زمان جنبش نیرومند زمین استخراج گردید. جنبش نیرومند زمین

تاریخچه شتاب یا جابجایی و با عنوان قید تکیه‌گاهی متغیر به گره‌های پای سازه اعمال می‌گردد. به این ترتیب، شرایط مرزی در مرحله‌ی بارگذاری زلزله نسبت به سایر مراحل (STEPS) تغییر می‌کند. نحوه تعریف بار انفجار در این نرم‌افزار با استفاده از یک قابلیت از پیش تعریف شده می‌باشد که بصورت یک ابزار آماده شده است. در این ابزار (CONWEP) مقدار وزن خرج، فاصله رویارویی و نوع انتشار موج سطحی یا کروی بصورت ورودی معرفی شده و بطور خودکار تاریخچه فشار به روی سطوح اندرکنش محاسبه می‌گردد.

۲-۳-۳- سناریوهای بارگذاری

در این پژوهش از دوازده سناریوی بارگذاری متفاوت استفاده شده که وجه تمایز آنها عبارتند از زمان وقوع انفجار که شامل انفجار در قبل و حین زمین‌لرزه می‌باشد؛ راستای بار زلزله و انفجار که شامل راستای متعامد و یا موازی می‌باشد؛ و محل وقوع انفجار که شامل انفجار در وجه روبرویی، جانبی و یا داخل قاب می‌باشد. همچنین، معیارهای مقایسه این سناریوها عبارتند از شدت آسیب‌های وارد برسازه، میزان و محل آسیب‌های عمده، جابجایی بیشینه‌ی بام و دریافت طبقات.

در حالت انفجار روبروی قاب، مرکز انفجار در فاصله‌ی ۳/۸ متری از وجه مقابل قاب و در تراز روی پی قرار گرفته است. وزن خرج انفجار ۱۰۰ کیلوگرم معادل TNT تعریف شده است. در حالت انفجار جانبی، خرج انفجار در فاصله‌ی ۳/۸ متری از وجه جانبی قاب و در تراز روی پی قرار گرفته و مقدار آن ۲۰۰ کیلوگرم معادل TNT انتخاب شده است. در حالت انفجار داخلی نیز، خرج انفجار در دهانه‌ی میانی قاب به فاصله‌ی یکسان از ستون‌های اطراف و روی پی قرار گرفته و مقدار ماده‌ی منفجره ۱۳ کیلوگرم معادل TNT برای انتخاب شده است. علت انتخاب وزن خرج‌های انفجار در این مطالعه توصیه‌های مراجع معتبر درخصوص مشخصات انواع محتمل بارهای انفجار در ساختمان بوده است (National Research Council، ۲۰۰۳؛ FEMA 428، ۲۰۰۳).

سطح اندرکنش تعریف شده برای برخورد موج انفجار در هر حالت در شکل ۵ شده است.

Hopkinson-Cranz است (کورمی و همکاران، ۱۳۹۵). در این رابطه از پارامتر فاصله‌ی مقیاس شده Scaled Distance (Z) (رابطه ۱) جهت محاسبه‌ی ویژگی‌های انفجار استفاده می‌شود.

$$Z = \frac{W}{R^{1/3}} \quad (1)$$

رابطه‌های متفاوتی نیز پیشینی فشار ناشی از انفجار وجود دارد. برای مثال می‌توان از رابطه پیشنهادشده توسط میلز (رابطه ۲) جهت تخمین بیشینه فشار ناشی از بار انفجار استفاده کرد (UFC، ۲۰۰۸).

$$P_{s0} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (2)$$

جهت ساده‌سازی توزیع بار انفجار بر وجه قاب ساختمانی می‌توان از مدل تئوری بر پایه‌ی داده‌های تجربه استفاده کرد. بدین منظور فاصله ماده منفجره از وسط ارتفاع هر طبقه R_h و سپس با جاگذاری در رابطه ۳، زمان تداوم فشار ناشی از انفجار برای هر طبقه بدست می‌آید. همچنین، سرعت موج انفجار را می‌توان از رابطه ۴ محاسبه نمود.

$$t_0 = W^{1/3} 10^{[-2.75 + 0.27 \log R_h]} \quad (3)$$

$$U = a_0 \sqrt{\frac{6P_{s0} + 7P_0}{7P_0}} \quad (4)$$

P_0 فشار هوای محیط (فشار اتمسفر) و معادل ۱۰۱ کیلو-پاسکال است و a_0 نیز سرعت موج صوت در هوا و برابر با ۳۳۵ متربرثانیه فرض می‌شود.

زمان رسیدن موج انفجار به سازه را می‌توان از رابطه‌ی ۵ محاسبه نمود و ضریب بازتاب C_r از رابطه ۶ بدست می‌آید (UFC، ۲۰۰۸).

$$t_A = \frac{R_h}{U} \quad (5)$$

$$C_r = 3^4 \sqrt{\frac{P_{s0}}{101}} \quad (6)$$

با معلوم بودن ثابت C_r مقدار فشار منعکس شده (بازتابی) نیز از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$P_r = C_r \times P_{s0} \quad (7)$$

در نهایت فشار ناشی از موج انفجار در زمان $P(t)$ برای هر طبقه با استفاده از پارامترهای انفجار از رابطه ۸ به دست می‌آید (UFC، ۲۰۰۸).

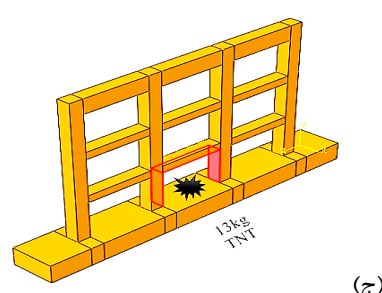
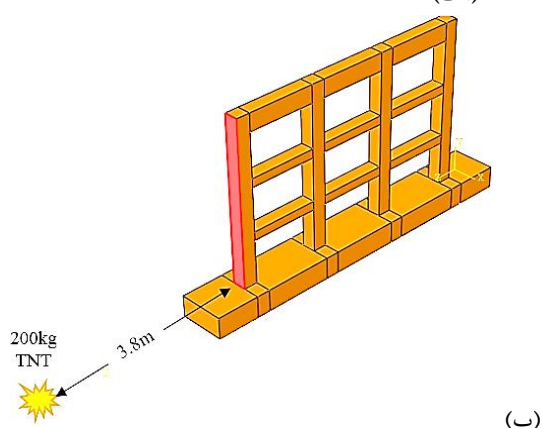
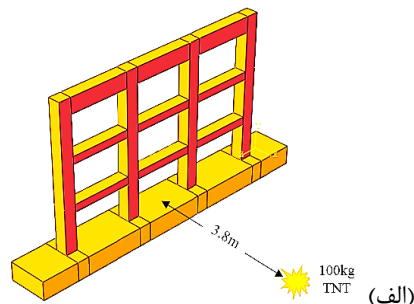
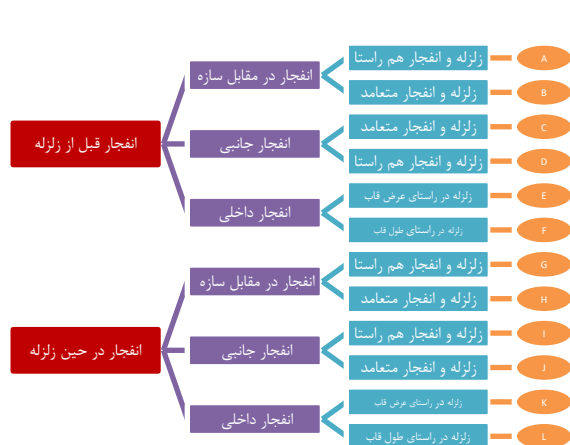
$$P(t) = P_{s0} + P_r(1 - t/t_0) \exp^{-\gamma t/t_0} \quad (8)$$

که در آن γ پارامتری است که برای کنترل نسبت دامنه‌ی موج استفاده می‌شود و مطابق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید.

$$\gamma = Z^2 - 3.7Z + 4.2 \quad (10)$$

مدول کانوپ CONWEP در نرم‌افزار ABAQUS با استفاده از روابط تجربی مشابه مشخصات بار انفجار بر وجوه موردنظر را تخمین می‌زند (وو، ۱۴۰۲). در اینجا، بار انفجار بصورت سطحی (مؤثر بر وجه سازه) در نرم‌افزار تعریف شده است.

نحوه تعریف بار زلزله و انفجار در نرم‌افزار ABAQUS با یکدیگر اختلاف اساسی دارد. رکورد زلزله انتخابی به صورت



شکل ۵- تعریف انفجار و سطح اندرکنش موج فشار در حالت: (الف) انفجار روبروی قاب؛ (ب) انفجار جانبی؛ (ج) انفجار داخلی

شکل ۶- نمودار درختی سناریوهای بارگذاری در این مطالعه شرایط مرزی در این مدل سازی شامل تعریف قیود تکیه گاهی و بارگذاری ها می باشد. در اینجا، در step مربوط به حالت اولیه سازه (Initial) و انفجار، گره های کف فونداسیون در هر سه راستای X، Y و Z در برابر هرگونه جابجایی و چرخش بصورت کامل گیردار شده است. در استپ های بعدی، اثر بارگذاری زلزله بصورت شرایط مرزی جابجایی در راستای موردنظر به پای سازه اعمال می شود در حالی که دو راستای دیگر همچنان قیود تکیه-گاهی گیردار دارند.

۳-۲- مدل مصالح

خلاصه ای از مدل مصالح به کار رفته، مشخصات بتن و فولاد مصرفی در سازه مقاطع قاب به ترتیب در جداول ۲ و ۳ قابل مشاهده است. واحدهای بکار رفته برای تعریف کمیت ها در نرم افزار به شرح جدول ۴ می باشد.

جدول ۲- مشخصات بتن مصرفی

مدل رفتاری بتن در کشش	مدل رفتاری بتن در فشار	مدل رفتاری بتن در جرم مخصوص
ABAQUS	در فشار	جرم مخصوص
مدل شیمان	مدل پوپوویچ	مدل خسارت پلاستیک
25743 MPa	30 MPa	$2.4 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^2$

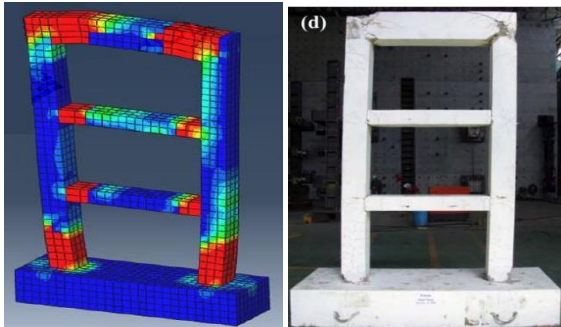
جدول ۳- مشخصات آرماتور مصرفی

جرم مخصوص	تنش تسلیم (MPa)	تعداد	قطر (mm)	محل آرماتورگذاری
$7.83 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^2$	430	6	22	ستون
	471	4	16	تیر
486 ton/mm^2	486	@50mm	10	ستون
		@60mm	10	تیر

سطوح اثر موج انفجار در وجه سازه به گونه ای انتخاب شده است که حداکثر سطح اندرکنش واقعی امواج انفجاری با سازه را شبیه سازی کند. در اینجا، فرض بر این است که اجزای سازه ای و غیرسازه ای ساختمان که بطور مستقیم با موج انفجار در تماس هستند، مقدار قابل توجهی از انرژی انفجار را جذب کرده و بنابراین اثرات موج انفجار در سایر وجوه سازه قابل نظر خواهد بود. تعریف سطح اندرکنش (شکل ۵) در مازول Interaction در نرم افزار انجام شده است.

مطابق دیگرام درختی نشان داده شده در شکل ۶ سناریوهای مختلف همزمانی بار انفجار و زلزله نام گذاری شده اند. برای پاسخ های تغییر مکان طبقات، جابجایی نسبی طبقات، جابجایی بیشینه در سازه، نحوه گسترش و شدت آسیب های وارد شده بر سازه به همراه تفسیرهای مربوطه به تفکیک هر سناریو ارائه شده است.

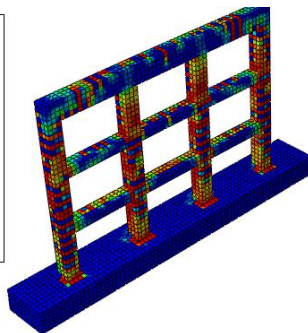
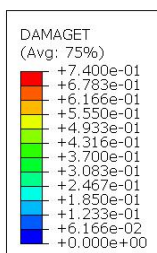
در ادامه، نتایج مربوط به شدت و مکان آسیب‌ها در مدل آزمایشگاهی با نتایج تحلیل مدل در نرم‌افزار ABAQUS مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از وقوع ترک و تخریب مشابه در بخش‌هایی از سازه مانند محل اتصال تیرها به ستون‌ها یا محل اتصال ستون‌ها به پی در هر دو مدل بود. طبق شکل ۷ قابل مشاهده است که شدت و سطح گسترش آسیب در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی مشابه است.



شکل ۷- مقایسه شدت و محل آسیب‌ها در مدل آزمایشگاهی (Park و Choi، ۲۰۱۱) و مدل‌سازی اجزای محدود در اینجا

۳-۲- اثر موقعیت مرکز انفجار

قاب ساختمانی مورد بررسی تحت بار انفجار تنها (بدون در نظر گرفتن زلزله) تحلیل گردید. در این مدل‌ها موقعیت مرکز انفجار تغییر داده شد تا اثر آن بر نحوه رفتار سازه بررسی گردد. در شکل ۸ آسیب‌های وارد بر قاب ساختمانی تحت بار انفجار روبروی قاب، در وجه جانبی آن، و همچنین در دهانه داخلی آن نشان داده شده است. تحت انفجار در وجه روبرویی قاب، طبق شکل ۸-الف، بیشتر تغییر شکل‌های پلاستیک در ستون‌ها و پای ستون‌ها می‌باشد. طبق شکل ۸-ب، تحت انفجار جانبی پای ستون‌ها در وجه رو به انفجار و اتصالات تیر به ستون در اولین طبقه دارای بیشترین آسیب است. در حالت انفجار در دهانه میانی قاب، بیشترین آسیب در تیر و ستون‌های همین دهانه مشاهده می‌شود؛ لنگر منفی ایجاد شده در تیر سقف دهانه میانی عامل اصلی آسیب در تیر است.



(الف)

جدول ۴- یکای کمیت‌ها در مدل‌سازی

چگالی	فشار	نیرو	شتاب	سرعت	جرم	زمان	طول
ton/mm^3	MPa	N	mm/s^2	mm/s	ton	s	mm

با جهت تعریف رفتار بتن در ناحیه غیرخطی می‌توان از مدل خسارت پلاستیک بتن - Concrete Damage Plastic (CDP) که در کتابخانه مصالح نرم‌افزار ABAQUS توسعه داده شده استفاده کرد. در این پژوهش برای رفتار فشاری بتن در ناحیه غیرخطی از مدل پوپوویچ (Popovics)، و برای رفتار کششی آن از مدل شیما (Shima) استفاده گردید.

منحنی رفتاری بتن در فشار طبق مدل پوپوویچ (Popovics، ۱۹۷۳) در رابطه ۱۱ توصیف شده است. در این مدل، f'_c مقاومت مشخصه بتن، ϵ_c کرنش متناظر با f'_c ، σ_{ci} و ϵ_{ci} تنش و کرنش در نقطه دلخواه است. منحنی رفتاری بتن در کشش در مدل شیما (Oliver و همکاران، ۱۹۸۹) نیز طبق رابطه ۱۲ توصیف شده است. در این مدل، f_t مقاومت کششی بتن، ϵ_{tu} کرنش متناظر با f_t ، σ_{ti} ، ϵ_{ti} تنش و کرنش در نقطه دلخواه و E_c مدول الاستیسیته بتن است. C ضریب ثابتی است که برای آرماتورهای فولادی آجدار مقدار آن 0.4 در نظر گرفته می‌شود.

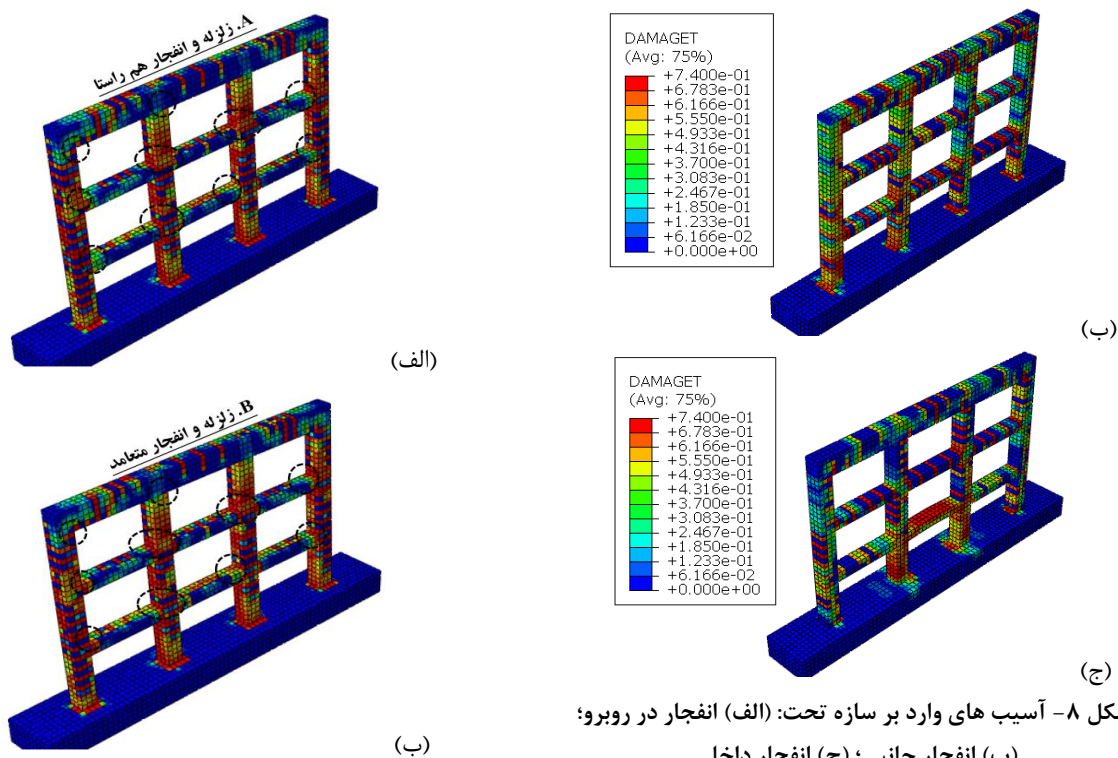
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ci} = \left(\frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_c} \right) f'_c \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_c} \right)^{nk}} \\ n = 0.80 + \frac{f'_c}{17} \quad (f'_c \text{ in MPa}) \\ k = \begin{cases} 1.0 & \text{for } 0 < \epsilon_{ci} < \epsilon_c \\ 0.67 + \frac{f'_c}{62} & \text{for } \epsilon_{ci} > \epsilon_c \end{cases} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ti} = f_t \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_{ti}} \right)^c \\ f_t = 0.2 (f'_c)^{\frac{2}{3}} \quad (MPa) \\ \text{Inelastic strain} = \frac{\epsilon_{ci} - \sigma_{ci}}{E_c} \\ E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \\ \text{Damage} = 1 - \frac{\sigma_{ci}}{f'_c} \end{array} \right. \quad (12)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی

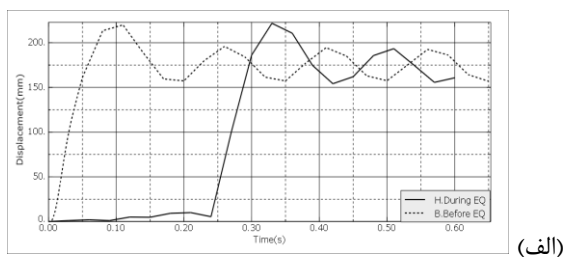
به منظور صحت‌سنجی مدل اجزای محدود ایجاد شده در این مطالعه، مدل آزمایش شده توسط Park و Choi (۲۰۱۱) مدل‌سازی شده و بار چرخه‌ای معادل با آزمایش تجربی به مدل اعمال گردید. بارگذاری چرخه‌ای بصورت ضرایبی از جابجایی هدف (جابجایی تسلیم δ_y) بود که بار مرود نظر در هر ضریب سه مرتبه تکرار می‌شود. این ضرایب شامل $0.4\delta_y$ ، $0.6\delta_y$ ، $\pm 0.2\delta_y$ ، $1.0\delta_y$ ، $0.8\delta_y$ ، $1.5\delta_y$ ، $3\delta_y$ ، $4\delta_y$ ، $6\delta_y$ ، $8\delta_y$ ، $2\delta_y$ است.



شکل ۸- آسیب های وارد بر سازه تحت: (الف) انفجار در روبرو؛ (ب) انفجار جانبی؛ (ج) انفجار داخلی

شکل ۹- آسیب های کششی در انفجار روبروی قاب تحت: (الف) زلزله هم راستا با انفجار؛ (ب) زلزله متعامد با انفجار

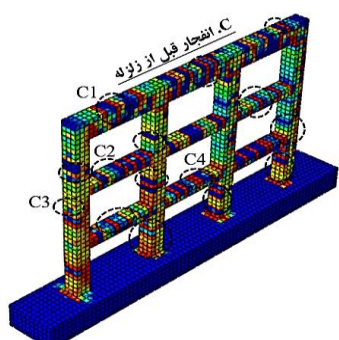
دریافت و جابجایی بیشینه بام و طبقات تحت انفجار قبل از زلزله و در زمان جنبش نیرومند زمین در نمودارهای شکل ۱۰ مقایسه شده است. در این حالات بارگذاری، مقادیر جابجایی ها و دریافت های طبقات بسیار بهم نزدیک است. این امر بیانگر آن است که تحت سناریوهای وقوع انفجار در وجه مقابل سازه، جابجایی طبقات بیشتر به بار انفجار وابسته بوده و بار زلزله نقش تعیین کننده ای نداشته است. اختلاف در مقدار جابجایی بیشینه بام در سناریوی انفجار در زمان جنبش نیرومند زلزله نسبت به سناریوی دیگر و مقایسه عددی جابجایی ها و دریافت ها در دو سناریو (شکل ۱۰-ب) نشان می دهد که وقوع انفجار در زمان جنبش نیرومند زمین لرزه، سناریوی بحرانی تری بوده و بجز طبقه اول در سایر طبقات سازه مقدار دریافت تحت این سناریو نسبت به سناریوی دیگر بیشتر است.



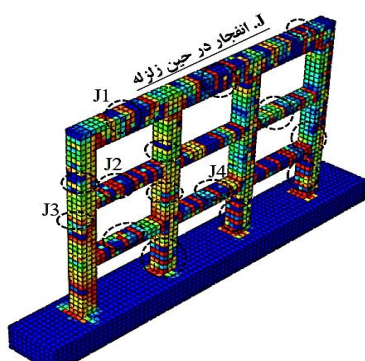
در ادامه، میزان و نحوه گسترش آسیب های کششی، جابجایی بیشینه بام و طبقات، دریافت طبقات، و همچنین اثر هم راستایی با تعامد بارهای انفجار و زلزله بر پاسخ سازه تحت سناریوهای مختلف بارگذاری مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد.

۳-۳- اثر همزمانی زلزله با انفجار در وجه روبرویی قاب

در این بخش به تحلیل و بررسی دو سناریوی همزمانی بار انفجار و زلزله در شرایط انفجار قبل از زلزله، و انفجار همزمان با جنبش نیرومند زمین لرزه پرداخته می شود. در شرایطی که ماده منفجره در وجه روبرویی قاب قرار گرفته، بارگذاری زلزله در راستای عمود بر قاب (هم راستا با انفجار) و به روی صفحه قاب (متعامد با انفجار) اعمال شده است. با توجه به شکل ۹، مقایسه کانتورهای رنگی که با کادرهای نقطه چین مشخص شده اند نشان می دهد که علی رغم میزان و محل آسیب های مشابه در دو سناریو، شدت آسیب در محل اتصال تیر به ستون (به روی تیرها) در حالتی که انفجار و زلزله متعامد هستند (شکل ۹-ب) نسبت به حالت هم راستا (شکل ۹-الف) کمی بیشتر است. بنابراین می توان نتیجه گرفت در حالت انفجار در وجه مقابل قاب، متعامد بودن راستای زلزله نسبت به انفجار بر شدت آسیب های کششی می افزاید.



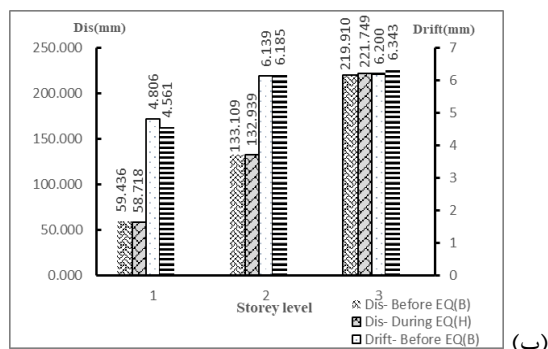
(ج)



(د)

شکل ۱۱- آسیب‌های کششی در انفجار جانبی تحت: (الف) زلزله هم‌راستا با انفجار؛ (ب) زلزله متعامد با انفجار؛ (ج) انفجار قبل از زلزله؛ (د) انفجار هم‌زمان با زلزله

با بررسی شکل ۱۱-ج و د مشخص می‌شود که تحت انفجار جانبی قبل و حین زلزله، برخلاف انفجار روبرویی، ضمن اینکه تفاوت در شدت آسیب‌ها قابل توجه است، این تفاوت به نفع هیچ‌یک از سناریوها نبوده و از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند. به عنوان نمونه با مقایسه بین نقاط C1 و J1 المان مربوطه تحت سناریوی انفجار در حین زلزله دچار آسیب بیشتری نسبت به سناریوی انفجار قبلا از زلزله شده است. در حالیکه درمقایسه بین C2 و J2 مشاهده می‌شود نتایج کاملا برعکس بوده و آسیب المان تحت سناریوی انفجار پیش از زلزله بیشتر از سناریوی انفجار در حین زلزله می‌باشد. بنابراین، در مورد انفجار جانبی نمی‌توان تنها با استفاده از خروجی آسیب قاب، بحرانی بودن هر یک از دو سناریو را به قطعیت بیان کرد. با توجه نمودارهای شکل ۱۲ می‌توان اختلاف میزان جابجایی نهایی در تعدادی از المان‌های قاب را تحت دو سناریو تشخیص داد. بطوریکه انفجار جانبی در حین زلزله، سناریوی بحرانی تری نسبت به انفجار جانبی پیش از زلزله می‌باشد. این امر در کانتورهای تغییرشکل نشان داده شده در شکل ۱۳ نیز تایید می‌شود.

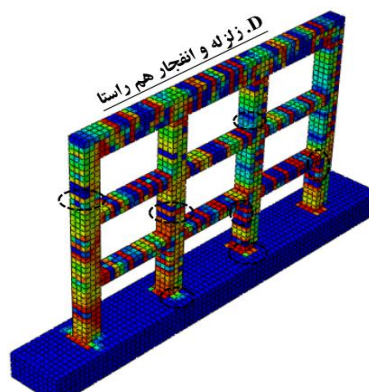


(ب)

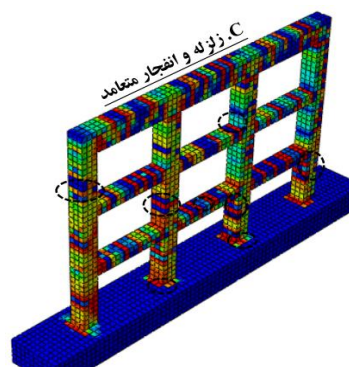
شکل ۱۰- جابجایی بیشینه تحت انفجار روبروی قاب قبل و در حین زلزله: (الف) جابجایی بیشینه بام؛ (ب) جابجایی بیشینه و دررفت طبقات

۳-۴- اثر همزمانی زلزله با انفجار در وجه جانبی قاب

آسیب وارد بر سازه تحت سناریوهای مختلف انفجار در وجه جانبی قاب در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در این حالات نیز مشابه با انفجار روبرویی، علی‌رغم وجود شباهت در میزان و محل آسیب تحت دو سناریو، تفاوت‌های جزئی در شدت آسیب‌ها در محل ستون‌ها و پای ستون‌ها مشاهده می‌گردد. به طوریکه شدت آسیب‌ها در سناریوی که راستای زلزله و انفجار متعامد هستند اندکی بیشتر از سناریوی دیگر است.

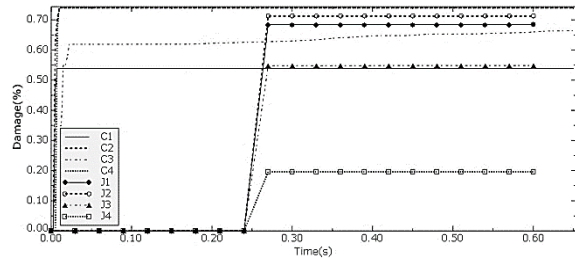


(الف)

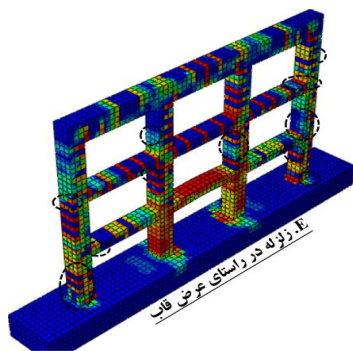


(ب)

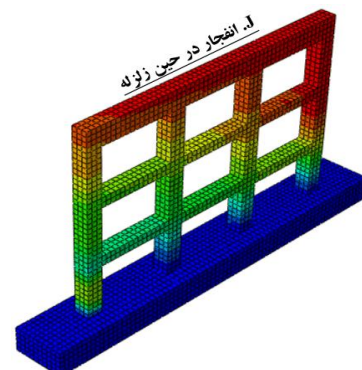
مشخص می‌شود که تحت انفجار در حین زلزله آسیب بیشتری نسبت به سناریوی انفجار قبل از زلزله وجود دارد. در حالیکه در مقایسه بین المان‌های E2 و E3 با K2 و K3 این امر کاملاً برعکس بوده و سناریوی انفجار پیش از زلزله آسیب بیشتری نسبت به سناریوی انفجار در حین زلزله داشته است. بنابراین در مورد انفجار داخلی نیز مانند انفجار جانبی نمی‌توان به تنهایی با استفاده از خروجی آسیب کششی، بحرانی بودن هریک از دو سناریو را به قطعیت بیان کرد و باید پارامترهای پاسخ دیگر بررسی گردد.



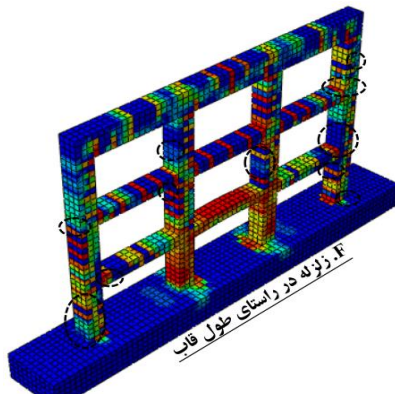
شکل ۱۲- شدت آسیب چهار المان مختلف تحت انفجار جانبی قبل و در حین زلزله



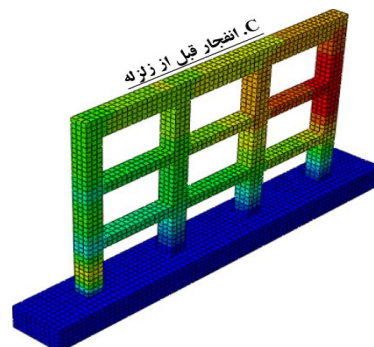
(الف)



(الف)

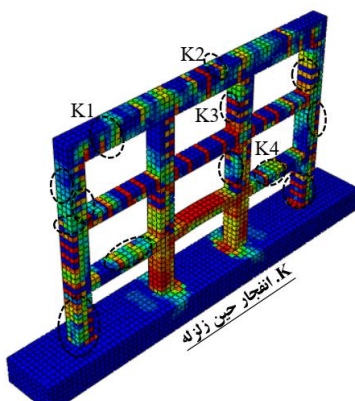


(ب)



(ب)

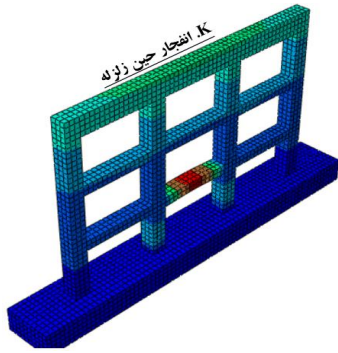
شکل ۱۳- جابجایی و تغییر مکان نهایی برای انفجار جانبی: (الف) قبل از زلزله؛ (ب) در حین زلزله



(ج)

۳-۵- اثر همزمانی زلزله با انفجار در داخل قاب

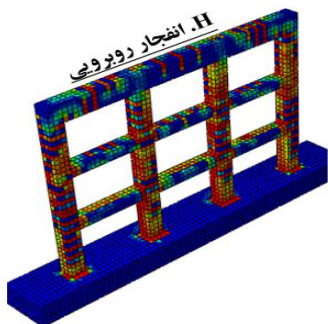
طبق شکل ۱۴، مشابه با انفجار روبرویی و جانبی، علی‌رغم وجود تشابه زیاد در میزان و محل آسیب‌ها در دو سناریو، تفاوت‌های جزئی شدت آسیب در محل ستون‌ها و پای‌ستون‌ها وجود دارد. به طوریکه شدت آسیب‌ها در سناریویی که زلزله در راستای عرض قاب اعمال می‌شود بمقدار جزئی بیشتر از سناریویی است که در آن زلزله در راستای طول قاب بوده و بدین ترتیب تحت انفجار داخلی سناریوی مذکور، سناریوی بحرانی خواهد بود. برای انفجار قبل از زلزله و در زمان جنبش نیرومند زلزله، شکل ۱۴-ج و د، مشاهده می‌شود که همانند انفجار جانبی، ضمن اینکه تفاوت در شدت آسیب‌ها قابل توجه می‌باشد این تفاوت از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند. مثلاً با مقایسه بین نقاط E1 و E4 با K1 و K4



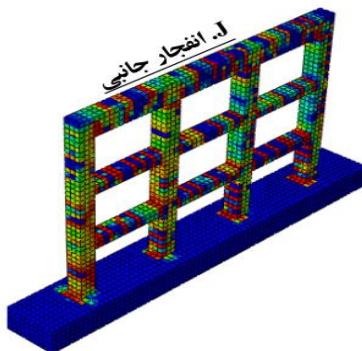
(ب)

شکل ۱۶- تغییر مکان نهایی سازه برای انفجار قبل از زلزله و حین زلزله- انفجار داخلی

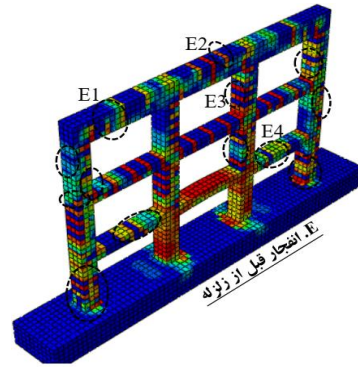
در اینجا، سه سناریوی بحرانی‌ای که در بخش‌های قبل از بین دوازده سناریو انتخاب شده‌اند بررسی و مقایسه می‌گردند. کانتورهای رنگی مربوط به آسیب‌های کششی در شکل ۱۷ نشان می‌دهد که در سناریوی وقوع انفجار در مقابل قاب ساختمانی، شدت و تمرکز آسیب‌ها در ستون‌های سازه و پای ستون‌ها می‌باشد. این در حالی است که در انفجار جانبی شدت آسیب‌ها در تیرها بیشتر از ستون‌ها بوده و آسیب قابل توجهی متوجه ستون‌ها نمی‌شود. در انفجار داخلی نیز آسیب عمده متوجه دهانه میانی در طبقه همکف، در محل قرارگیری ماده منفجره می‌باشد. علت اصلی بیشتر بودن شدت آسیب‌ها تحت انفجار روبرویی نسبت به انفجار جانبی، سطح وسیع‌تر برخورد موج انفجار به وجه سازه است.



(الف)



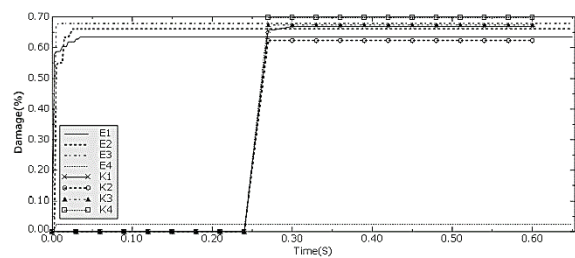
(ب)



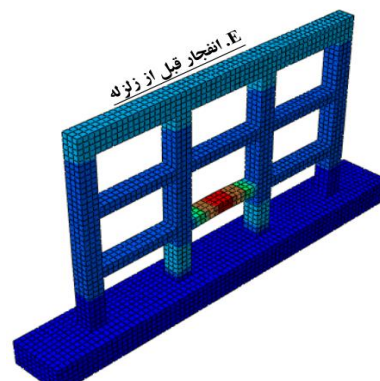
(د)

شکل ۱۴- آسیب‌های وارد بر قاب در انفجار داخلی تحت: (الف) زلزله عمود بر قاب؛ (ب) زلزله در راستای طول قاب؛ (ج) انفجار همزمان با زلزله؛ (ب) انفجار قبل از زلزله

باتوجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و مشاهده اختلاف میزان جابجایی نهایی در دو سناریو می‌توان اظهار کرد که تحت انفجار داخلی سناریوی انفجار در حین زلزله، سناریوی بحرانی‌تری نسبت به انفجار پیش از زلزله می‌باشد.



شکل ۱۴- شدت آسیب چهار المان مختلف تحت انفجار داخلی قبل و حین زلزله



(الف)

آسیب ناشی از انفجار داخلی نیز متوجه تیرها، ستون‌ها و اتصالاتی است که در دهانه محل قرارگیری ماده منفجره قرار دارند.

(ج) در هر سه انفجار روبرویی، جانبی و داخلی از نظر میزان و محل آسیب‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان سناریوهایی که در آن‌ها انفجار در زمان جنبش نیرومند زمین لرزه اتفاق می‌افتد با حالت انفجار قبل از زلزله وجود ندارد. بهر صورت، انفجار در زمان جنبش نیرومند زمین لرزه نسبت به سناریوهایی که در آن‌ها انفجار قبل از زلزله رخ می‌دهد اندکی بحرانی‌تر بوده و آسیب بیشتری به سازه وارد می‌آورد.

(د) در مقایسه میان سه حالت انفجار روبرویی، جانبی و داخلی این نتیجه حاصل می‌گردد که شدت آسیب‌ها نسبت به مقادیر ماده منفجره بترتیب در انفجار داخلی نسبت به انفجار روبرویی، و انفجار روبرویی نسبت به انفجار جانبی بیشتر است.

(ه) با توجه به بحرانی‌تر بودن انفجار داخلی نسبت به سایر انفجارها، روش‌هایی برای تقلیل میزان خسارت انفجار تاسیسات مکانیکی و الکترونیکی موجود در داخل ساختمان در اولویت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر انفجار قرار دارد.

در راستای ادامه مطالعات و تکمیل پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود تخمین مقادیر بحرانی ماده منفجره که به ازای مقادیر کمتر از آن، نیروی زلزله نسبت به انفجار تعیین کننده باشد انجام گردد. همچنین، حالتی از بارگذاری که در آن انفجار بعد از اتمام زمین لرزه اتفاق می‌افتد نیز بررسی گردد. وقوع چنین بارگذاری در سازه‌ها بسیار محتمل است زیرا ممکن است خطوط فشار قوی گاز یا برق در اثر تکان‌های زلزله آسیب دیده و سبب بروز انفجار شود.

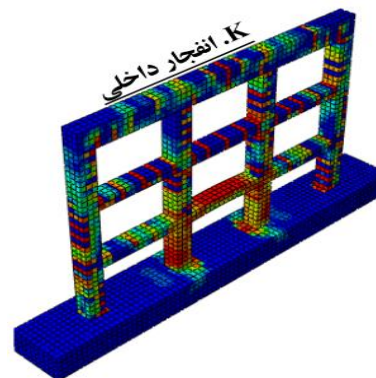
۵- مراجع

بیرقی ح، "اثر تقویت دیوار برشی بتنی با کمک مهاربند کماتش‌ناپذیر تحت نگاشت حوزه دور و نزدیک"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۸، ۴۹۱(۹۴)، ۲۳-۳۳.

حسینی مر، محمودآبادی م، "بررسی رفتار تأسیسات لوله‌کشی در اثر وقوع زلزله"، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۵، ۱۱۹(۱)، ۵۵-۶۱.

طهرانی پ، سالاری م، "ارزیابی روش‌های مختلف تحلیل در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح نامنظم در پلان و ارتفاع، تقویت‌شده با مهاربند فولادی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۱، ۵۲۲(۱۰۷)، ۱۲۰-۱۰۷.

فقیه‌ملکی ه، نجاتی ف، معصومی ح، "ارزیابی و مقایسه ریسک دوخطر احتمالاتی زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور در یک سازه به‌مراه انفجار گاز"، سومین کنفرانس ملی



(ج)

شکل ۱۷- بحرانی‌ترین سناریوهای مربوط به انفجارهای: (الف) روبرویی قاب؛ (ب) در وجه جانبی قاب؛ (ج) در داخل قاب.

در حالت انفجار داخلی، با وجود مقدار بسیار کمتر وزن خرج انفجاری (۱۳ کیلوگرم) در قیاس با دو حالت انفجار روبرویی و جانبی، آسیب‌های شدید و گسترده در دهانه میانی طبقه اول و همچنین سایر قسمت‌های سازه مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد بحرانی‌ترین حالت بارگذاری مربوط به انفجار داخلی باشد. همچنین، بعنوان یک نتیجه کلی می‌توان بیان کرد که صرف نظر از نیروی زلزله، آسیب‌های ناشی از وقوع انفجار در مقابل سازه بیشتر متوجه ستون‌ها و پای ستون، آسیب ناشی از انفجار جانبی متوجه تیرها و آسیب ناشی از انفجار داخلی متوجه تیرها و ستون‌هایی است که بر محل قرارگیری ماده منفجره محیط هستند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثرات همزمانی و توالی اثر بارهای لرزه‌ای و انفجاری به روی قاب‌های بتن مسلح پرداخته شده است. براساس هدف پژوهش دوازده سناریوی مختلف از همزمانی بارهای لرزه‌ای و انفجار با موقعیت‌های مختلف قرارگیری ماده منفجره لحاظ شده است. راستای موزی و متعامد اعمال بار لرزه‌ای نسبت به بار انفجار نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل می‌توان موارد زیر را بیان نمود.

(الف) در قاب تحت بررسی و با توجه به مقادیر مواد منفجره بکار رفته در این پژوهش، مشاهده گردید آسیب‌های سازه بیشتر بعلا نیروی انفجار بوده و نیروی زلزله در پاسخ نهایی سازه چندان تعیین‌کننده نبود. البته لازم ذکر است در صورت استفاده از مواد منفجره‌ای با جرم کمتر و یا رکوردهای زلزله‌های شدیدتر این حالت می‌تواند متفاوت باشد.

(ب) صرف نظر از اثر زلزله، آسیب‌های ناشی از وقوع انفجار در وجه روبرویی قاب عمدتاً متوجه ستون‌ها و پای ستون بوده و آسیب‌های ناشی از انفجار جانبی متوجه تیرها می‌باشد. همچنین،

- Choi IR, Park HG, "Cyclic loading test for reinforced concrete frame with thin steel infill plate", *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(6), 654-664.
- Du K, Bai W, Bai J, Yan D, Gong M, "Comparative Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Frame Structures with and without Structural Enhancements Using the FEMA P-58 Methodology", *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, 2021, 7(4), 04021047.
- Dusenberry DO, "Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings", John Wiley & Sons, USA, 2010.
- Esameelnia Omran M, Mollaei S, "Investigation of Axial Strengthened Reinforced Concrete Columns under Lateral Blast Loading," *Shock and Vibration*, 2017, 94-113.
- Faghihmaleki H, Nejati F, Roshan AM, Motlagh YB, "An evaluation of multi-hazard risk subjected to blast and earthquake loads in RC moment frame with shear wall", *Journal of Engineering Science and Technology*, 2017, 12(3), 636-647.
- FEMA 428, "Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks, Federal Emergency Management Agency", United States of America, 2003.
- Habibi AR, Sahabi E, "Development of a proper load pattern for nonlinear static analysis of composite girder bridges under blast", *The Scientific Journal of Passive Defense Science and Technology*, 2016, 6 (4), 235-244.
- Haoa H, Zhou Y, "Rigid Structure Response Analysis to Seismic and Blast Induced Ground Motions", *Procedia Engineering*, 2011, 14, 946-955.
- Harrington CC, Liel A, "Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Buildings with Retrofitted Columns", *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146 (11), 04020237.
- Heidari A, Majidi N, "Earthquake Mapping Acceleration Analysis Using Wavelet Method", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2021, 20, 113-126
- Heidari A, Majidi N, "Investigation of the natural frequency of the structure and earthquake frequencies in the frequency domain using a discrete wavelet", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2020, 36(2.2), 105-113.
- Ibrahim YE, Ismail MA, Nabil M, "Response of reinforced concrete frame structures under blast loading", *Procedia Engineering*, 2017, 171, 890 - 898.
- Ibrahim YE, Nabil M, "Assessment of structural response of an existing structure under blast load using finite element analysis", *Alexandria Engineering Journal*, 2019, 58(4), 1327-1338.
- Jahami A, Tamsah Y, Khatib J, "The efficiency of using CFRP as a strengthening technique for reinforced concrete beams subjected to blast loading", *Int J Adv Struct Eng*, 2019, 11, 411-420.
- Kamgar R, Majidi N, Heidari A, "Continuous Wavelet and Fourier Transform Methods for the Evaluation of the Properties of Critical Excitation", *Amirkabir Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2021, 52(12), 3125-3144.
- توسعه علوم مهندسی، مازندران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، ۱۳۹۵.
- کورمی د، میس ج، اسمیث پ، "اثرات انفجار بر سازه‌های ساختمانی"، ترجمه: ملایی س، اسماعیل‌نیاعمران م، تهران، انتشارات آرنا، ۱۳۹۵.
- مجیدی ن، عموشاهی ح، "تحلیل پایداری و دینامیکی سازه‌ها تحت انفجارهای درون و برون سازه‌ای در زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک"، نشریه علمی پژوهشی مواد پرانرژی، ۱۳۹۸، ۱۴(۴)، ۱۸۳-۱۹۹.
- محمدی زاده مر، علیخان محمدی م، "ارزیابی آسیب پذیری اتاق کنترل بتن مسلح ضد انفجار در تأسیسات پالایشگاهی به روش همبسته اویلری- لاگرانژی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۲، ۵۳(۱۱۳)، ۱۳۸-۱۵۱.
- وو ج، "روسازی چند لایه تحت بارگذاری انفجار"، ترجمه: ملایی س، استادی اصل غ، آذربایجان شرقی، انتشارات دانشگاه بناب، ۱۴۰۲.
- Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H, "Effect of seismic improvement techniques on a structure in seismic-explosive probabilistic two-hazard risk", *International Journal of Structural Engineering*, 2016, 7(3), 314-331.
- Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H, "Proposal of a probabilistic assessment of structural collapse concomitantly subject to earthquake and gas explosion", *Struct. Civ. Eng.*, 2018, 12, 425-437.
- Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H, "Seismic-explosion risk-based robustness index of structures", *International Journal of Damage Mechanics*, 2017, 26(4), 523-540.
- Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H, Avazeh M, "Progressive collapse risk and reliability of buildings encountering limited gas-pipe explosion after moderate earthquakes", *SN Appl. Sci.*, 2020, 2, 657.
- Acosta PF, Overview of UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", *Structural Engineering Institute of American Society of Civil Engineers*, Las Vegas, Nevada, 1454-1469, 2011.
- Ahmed Y, Malallah M, "Spacing Size Effect between Columns on the Blast Load Response of Reinforced Concrete Frames", *JUBES*, 2020, 28(1), 108-119.
- Asming VE, Asming SV, Fedorov AV, Yevtyugina ZA, Chigirev YN, Kremenetskaya EO, "System for automatic recognition of types of sources of regional seismic events", *Seismic Instruments*, 2022, 58(5), 509-520.
- Babaei M, Jalilkhani M, Ghasemi H, Mollaei S, "New Methods for Dynamic Analysis of Structural Systems under Earthquake Loads", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2022, 10 (3).
- Bommer JJ, Martinez-Pereira A, "The effective duration of earthquake strong motion", *Journal of earthquake engineering*, 1999, 3 (02), 127-172.

- Smiroldo F, Giongo I, Piazza M, "Use of timber panels to reduce the seismic vulnerability of concrete frame structures", *Engineering Structures*, 2021.
- Sudheer Kumar D, Rai P, Kumar R, Karmakar S, Saha S, "Behaviour of Reinforced Concrete Building Frame Subjected to Different Types of Blast Loading", *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, 9(23).
- Trapani FD, Giordano L, Mancini G, "Progressive Collapse Response of Reinforced Concrete Frame Structures with Masonry Infill", *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146 (3), 04020002.
- Unified Facilities Criteria (UFC), "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions- UFC 3-340-02", U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, 2008.
- Wang T, Bian Y, Zhang Y, Hou X, "Classification of earthquakes, explosions and mining-induced earthquakes based on XGBoost algorithm", *Computers & Geosciences*, 2023, 170, 105242.
- Xue Z, Huo L, Ying P, Li H, "Damage Assessment of Shear Wall Structures in an Earthquake-Blast Disaster Chain", *Applied Sciences*, 2022, 12(22), 11781.
- Khaledy N, Habibi A, Memarzadeh P, "Comparison between different techniques for optimum design of steel frames subjected to blast", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2018, 15 (9), 1-26.
- Kumar P, Lavendra S, Raghavendra T, "A Review on the Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*, 2021, 822(1).
- Moustafa A, Takewaki I, "Characterization and modeling of near-fault pulse-like strong ground motion via damage-based critical excitation method", *Structural engineering & mechanics*, 2010, 34 (6), 755.
- National Research Council, "ISC security design criteria for new federal office buildings and major modernization projects: A review and commentary", Washington, DC: The National Academies Press, 2003.
- Oliver J, Oller S, Oñate E, "A plastic-damage model for concrete", *International Journal of solids and structures*, 1989, 25(3), 299-326.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, Ground Motion Database. Available at: http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database
- Popovics S, "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete", *Cem. Concr. Res.*, 1973, 3, 583-599.