

تحلیل پایداری و دینامیکی سازه‌ها تحت انفجارهای درون و برون سازه‌های در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

نوراله مجیدی^۱، حسین عموشاهی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار دانشگاه اصفهان

(تاریخ وصول: ۹۹/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۸)

چکیده

زلزله و انفجار از جمله نیروهای دینامیکی مخرب هستند. این نیروها به دلیل وابسته بودن به زمان و از طرفی ماهیتی ضربه‌ای، می‌توانند در سازه خرابی‌های شدیدی ایجاد نمایند. یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی پایداری سازه‌ها، مطالعه بر روی مودهای کماتشی آن‌ها است. بررسی پایداری ارتباطی مستقیم با بار بحرانی ستون‌ها دارد. در این مقاله برای اولین بار به بررسی اثر هم‌زمان انفجار و زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر روی پایداری سازه‌ها پرداخته شده است. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی عددی حالتی است که ارتعاشات ناشی از زلزله موجب انفجار مواد منفجره نزدیک سازه می‌شود. از این رو به بررسی رفتار دینامیکی و کماتشی سازه تحت اثر هم‌زمان زلزله و انفجار پرداخته شده است. در این نوشتار انفجار در سه مرحله همراه با زلزله به‌طور هم‌زمان به سازه وارد می‌شود. این سه مرحله شامل قبل از شروع زلزله، در زمان وقوع زلزله و بعد از اتمام زلزله است. در این راستا در این مقاله سازه تحت اثر انفجارهای درون سازه‌ای و برون سازه‌ای و اثر توأمان زلزله قرار می‌گیرد. در این مقاله نشان داده شده است که بحرانی‌ترین حالت مربوط به زمانی است که ارتعاشات ناشی از زلزله در زمان جنبش نیرومند آن موجب وقوع انفجار شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که تلفیق انفجار و زلزله در حالتی که ماده منفجره بیش از ۵۰۰ کیلوگرم TNT باشد چندان اثرگذار نیست. در واقع زلزله در این حالت تأثیر چندانی بر پاسخ غیر خطی سازه ندارد. در این مقاله نشان داده می‌شود که اثرات در نظر گرفتن P-Delta چندان بر روی پاسخ سازه تأثیرگذار نیست. بر اساس نتایج ارائه شده برای انفجارهای مختلف و زلزله‌های مختلف می‌توان دریافت که تلفیق انفجار و زلزله بر روی تحلیل‌های دینامیکی اثر بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: انفجار، زلزله، پایداری، تحلیل غیر خطی، تحلیل دینامیکی.

Stability Analysis and Dynamic Analysis of Structures due to Internal and External Explosions in Far Field and Near Field Earthquakes

N. Majidi, H. Amoushahi*

University of Isfahan

(Received: 06/07/2020, Accepted: 07/08/2020)

Abstract

Earthquake and explosion are destructive dynamic forces. These forces can cause severe damage to the structure due to the time-dependent nature of the impact. One of the most important parameters for checking the stability of structures is the study of their buckling modes. The stability check has a direct relationship with the critical load of the columns. In this paper, the effects of simultaneous explosions and near-earthquake earthquakes on the stability of structures are investigated. The purpose of this research is to numerically simulate the state that earthquake-induced vibrations cause explosives to explode near structures. Therefore, the dynamic and buckling behavior of structures under the effects of earthquake and explosion have been investigated. In this article, the explosion enters the structure in three phases with the earthquake simultaneously. These three stages include before the earthquake, at the time of the earthquake and after the earthquake. In this regard, in this paper, structures are affected by internal and external structural explosions and the simultaneous effects of earthquakes. This article has shown that the most critical situation is when the vibrations caused by an earthquake trigger an explosion during its strong movement. The results of this paper show that the combination of explosion and earthquake is not very effective if the explosive is more than 500 kg TNT. In fact, earthquakes in this case have little effect on the nonlinear response of the structure. In this paper, it is shown that the effects of P-Delta consideration do not have much effect on the structure response. Based on the results provided for different explosions and earthquakes, it can be seen that the combination of explosion and earthquake has a greater effect on dynamic analysis.

Keywords: Blast, Explosion, Earthquake, Stability, Nonlinear Analysis, Dynamic Analysis.

۱- مقدمه

تحلیل پایداری و تعیین نیروی بحرانی ستون‌ها سابقه‌ای دیرینه دارد. که می‌توان اوایل را یکی از پیشگامان این زمینه دانست. محققین روش‌های مختلفی برای بررسی پایداری سازه‌ها ارائه داده‌اند. یکی از دقیق‌ترین این روش‌ها استفاده از حل معادلات دیفرانسیل به صورت دقیق است. در این زمینه تیموشنکو [۱]، چن [۲] و کدولین [۳] روش‌هایی را ارائه داده‌اند. همچنین مسئله کمانش و تعیین نیروی کمانشی از روش تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته و بار بحرانی از انتگرال بسل به دست آمده است [۴]. امپولوس [۵]، بر روی رفتار کمانشی ستون‌های غیر منشوری با استفاده از روش شیب-افت نیز مطالعه انجام داده است. از طرفی وجود پیچیدگی زیاد در روش‌های تحلیلی دقیق، محققین را بر آن داشت تا از روش‌های عددی برای به دست آوردن نیروی بحرانی ستون‌ها و تحلیل‌های پایداری استفاده نمایند. کارابالیس و بسکوس [۶]، با استفاده از روش‌های عددی و ضرایب ماتریس سختی و شرایط هندسی حاکم بر مسئله، تابع شکل ستون مورد نظر تعیین کرده‌اند. سیگتر [۷]، نشان داد که می‌توان رفتار کمانشی ستون‌های مخروطی را با استفاده از روش‌های عددی محاسبه نمود. ارکمن [۸ و ۹]، یک روش عددی اجزای محدود بر مبنای اصل ایستایی انرژی مکمل برای تحلیل پایداری سازه‌ها ارائه داده است. از روش اجزاء محدود نیز برای بررسی پایداری سازه‌های فولادی استفاده می‌شود. در پژوهش‌های انجام شده توسط کورنیواو [۱۰]، نشان داده شده که می‌توان برای بررسی پایداری سازه از روش اجزای محدود استفاده کرد.

بارهای وارد بر سازه‌ها در حالت‌هایی مانند زلزله، انفجار و باد نسبت به زمان متغیر هستند. از این رو برای بررسی پاسخ سازه نیاز به تحلیل دینامیکی سازه‌ها است. در مهندسی عمران اکثر سازه‌ها تحت اثر نیروهای دینامیکی هستند. نیروهایی که شدت، جهت و نقطه اثر آن‌ها با گذشت زمان تغییر می‌نماید. در روش‌های تحلیل دینامیکی نیروی جانبی زلزله با استفاده از بازتاب پاسخ دینامیکی سازه که بر اثر زلزله، از خود نشان می‌دهد، به دست می‌آید. این روش‌ها شامل روش "تحلیل طیفی" و روش "تحلیل تاریخچه زمانی" است [۱۱-۱۵]. امروزه با توجه به مزایای تحلیل تاریخچه زمانی، این تحلیل بیش از پیش گسترش یافته است. یک گام مهم برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی انتخاب و مقیاس شتاب نگاشت‌های متناسب با پارامترهای لرزه‌ای ساختگاه مورد نظر است. روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه ساختمان، واقعی‌ترین رفتار را از وقوع زلزله شبیه‌سازی می‌کند. در این روش شتاب نگاشت زلزله اصلاح شده به سازه وارد و سازه تحلیل می‌شود و پاسخ دینامیکی آن محاسبه می‌گردد [۱۶-۱۸]. همچنین تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به دو دسته خطی و غیر خطی تقسیم می‌شود. به دلیل اینکه تحلیل دینامیکی غیر خطی خصوصیات غیر خطی مصالح را نیز در نظر

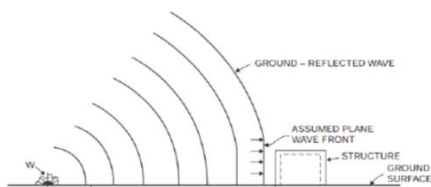
می‌گیرد، این تحلیل نتایج مطابق واقع‌تر ارائه می‌دهد [۲۱-۱۹]. از این رو در این مقاله سازه با استفاده از برنامه OpenSees، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی می‌شود. برای تحلیل سازه‌ها در برابر انفجار از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است [۲۲].

رکوردهای ثبت شده در زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که خصوصیات زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با یکدیگر متفاوت است [۲۳ و ۲۴]. حرکات لرزه‌ای در مناطق حوزه نزدیک با حرکات لرزه‌ای مناطق دور از گسل بسیار متفاوت است [۲۵-۲۷] معمولاً فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله را برای ثبت زلزله‌های نزدیک گسل و بیشتر از آن را برای ثبت زلزله‌های دور از گسل در نظر می‌گیرند. در این مقاله از ۴ زلزله حوزه دور و ۴ زلزله حوزه نزدیک استفاده شده است.

مدت دوام زلزله یکی از پارامترهای لرزه‌ای است، به کل مدتی که در طی آن زلزله رخ داده اطلاق می‌شود. مطالعات اولیه بر روی مدت زمان جنبش نیرومند زمین وابستگی این پارامتر را به بزرگای زلزله و فاصله کانونی نشان می‌دهد [۲۸ و ۲۹]. مدت زمان حرکت قوی زمین پارامتری است که در آن غالب انرژی زمین لرزه برای ارتعاش یک سازه وجود دارد. این پارامتر در تحلیل‌های غیر خطی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. اولین تعریف برای این پارامتر تحت عنوان مدت زمان انتخابی بود. زمان بین اولین و آخرین باری که شتاب بیشتر از $0.05g$ شود را مدت زمان انتخابی می‌نامند [۳۰ و ۳۱]. بریدی و تریفونس رابطه‌ای ارائه کردند که با داشتن هر یک از توابع شتاب، سرعت و یا جابه‌جایی می‌توان مدت زمان حرکت قوی زمین را استخراج کرد [۳۰]. مدت زمانی از شتاب نگاشت 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 ۴ روش برای تعیین مدت زمان زلزله وجود دارد که این چهار روش شامل مدت زمان یکنواخت، مدت زمان انتخابی، مدت زمان مؤثر و مدت زمان مهم هستند [۳۲]. در این مقاله از مفهوم مدت زمان مهم زلزله استفاده شده است که مجموع مدت زمان‌های بین شتاب آریاس که معمولاً بین ۵ تا ۹۵ درصد شدت آریاس است را مدت زمان مهم می‌نامند. از این مفهوم برای اعمال توأم انفجار و زلزله استفاده شده است. هدف از استفاده این مفهوم در مطالعات، در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت مسئله است.

زلزله و انفجار نیروهایی مخرب در سازه‌ها هستند. دیدگاه‌های مختلفی برای تأثیر نیروی زلزله و نیروی انفجار بر روی سازه‌ها وجود دارد. از این رو محققین پارامترهای کنترلی متفاوتی برای پایداری سازه‌ها ارائه کرده‌اند. کنترل کمانشی سازه‌های فولادی یکی از پارامترهای کنترلی دیرینه است. با توجه به اینکه انفجار و زلزله ماهیتی دینامیکی دارند. بنابراین تلفیق موج انفجار با زلزله می‌تواند تأثیری متفاوت داشته باشد نسبت به وقتی که این نیروها جداگانه به سازه وارد شوند. در این مقاله برای اولین بار به بررسی پایداری سازه‌ها تحت اثر توأم نیروی انفجار و زلزله‌های حوزه دور و نزدیک پرداخته می‌شود. هدف از این بررسی

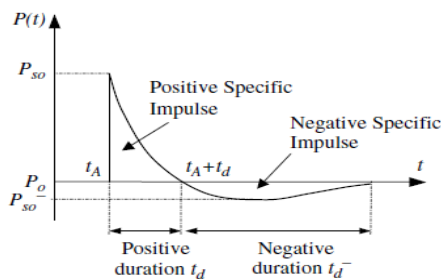
بار انفجار و ضربه ترکش را بر روی سازه‌های بتنی بررسی نمود و نشان داد که مقاومت ضربه در زمان اضافه کردن رشته آهنی به بتن که نتیجه آن تغییر عمق نفوذ در هدف بوده سبب کاهش مقدار پوسته شدن و کنده شدن بتن شده است. شی و همکاران، مدل‌سازی دقیق موج انفجار را در تعامل با ستون بتنی آرمه با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN انجام دادند و نشان دادند که ابعاد و شکل هندسی ستون تأثیر قابل توجهی در نحوه انتشار موج انفجار و بار وارده بر ستون دارد. هاو و همکاران [۴۵]، نیز شبیه‌سازی عددی فروپاشی تدریجی یک سازه بتنی مسلح را تحت بار انفجاری با استفاده از LS-DYNA مورد بررسی قرار دادند. در شکل (۲) نحوه گسترش موج انفجار نشان داده شده است.



شکل ۲- گسترش امواج انفجار [۴۶].

۲-۲- پارامترهای انفجار

در انفجار دو جز مهم وجود دارد که عبارتند از اندازه بمب یا وزن خرج (W) و فاصله بین منبع انفجار و هدف (R). نمودار فشار زمان بار انفجار در شکل (۳) نشان داده شده است [۴۷].



شکل ۳- نمودار فشار زمان انفجار [۴۶].

در نمودار شکل (۳)، t_A زمان رسیدن بار انفجار به سازه، P_{so} بیشینه فشار مثبت بار انفجار، P_o فشار محیط، P_{so}^- بیشینه فشار منفی بار انفجار، t_d^- زمان فاز منفی انفجار و t_d^+ زمان فاز مثبت انفجار را نشان می‌دهد.

یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه بار انفجار ناشی از ماده منفجره روش ریشه سوم فاصله است. بنیان‌گذار این روش Hopkinson است و بعداً توسط Cranz [۴۸]، این روش اصلاح شد. در این رابطه از پارامتر مقیاس (Z) جهت محاسبه پارامترهای انفجار استفاده می‌شود.

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

رابطه‌های متفاوتی نیز جهت پیش‌بینی بار انفجار وجود دارد. در این مقاله از رابطه پیشنهاد شده توسط میلز (مطابق رابطه (۲)) جهت تخمین بیشینه فشار ناشی از بار انفجار استفاده می‌شود [۴۴].

کنترل پارامترهای دینامیکی و پایداری سازه‌های فولادی تحت اثر توأمان زلزله و انفجار است. در این راستا یک سازه فولادی ۵ طبقه با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 توسط آیین‌نامه ۲۸۰۰ طراحی می‌شود. پس از آن سازه مورد نظر تحت اثر ۴ زلزله حوزه دور و ۴ زلزله حوزه نزدیک قرار می‌گیرد. با انجام این کار بررسی می‌شود بحرانی‌ترین حالت وقوع انفجار در هنگام زلزله در چه زمانی است. گام‌های اصلی این مقاله مطابق شکل (۱) است.



شکل ۱- گام‌های اصلی این مقاله.

۲- انفجار

انفجار آزاد شدن ناگهانی و در مقیاس بالای انرژی است [۳۳-۳۵]. موج حاصل از انفجار به صورت فشاری بیشتر از فشار محیط اطراف (وجه پرفشار) به سمت خارج از منبع انفجار توسعه یافته و با گذر زمان از شدت آن کاسته می‌شود. موج انفجاری دارای دو فاز است که یکی فاز مثبت یا فاز فشاری و دیگری فاز منفی یا فاز مکند است.

در مورد اثر هم‌زمان زلزله و انفجار مطالعاتی انجام شده است. در این خصوص تعدادی از آن‌ها در ادامه ارائه می‌شود. عبدالله زاده و همکاران [۳۶]، خطر خرابی پیش‌رونده تحت انفجار لوله‌های گاز در اثر زلزله‌های متوسط را ارزیابی کرده‌اند. ونگ و ژو [۳۷]، بر روی پاسخ سازه‌های صلب در اثر زلزله و انفجار مطالعاتی انجام داده‌اند. عبدالله زاده و فقیه ملکی [۳۸]، احتمال وقوع اثر هم‌زمان زلزله و انفجار لوله‌های گاز را بررسی کرده‌اند. آن‌ها در مطالعاتی دیگر شاخص مقاومت سازه‌ها در اثر زلزله و انفجار را به دست آورده‌اند [۳۹]. همچنین در پژوهشی دیگر بر روی روش‌های بهسازی برای ساختمان‌های در معرض زلزله و انفجار مطالعاتی انجام داده‌اند [۴۰]. فقیه‌ملکی و همکاران [۴۱]، مطالعاتی در خصوص ارزیابی ریسک در سازه‌های بتنی تحت اثر هم‌زمان زلزله و انفجار مطالعاتی انجام داده‌اند.

در گزارشی [۴۲]، تعدادی مدل را به منظور محاسبه ضربه ناشی از انفجار مطرح شد و مدل معادل TNT آن شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از منحنی‌های داده شده با مدل معادل TNT می‌توان رابطه مابین اضافه فشار، فاصله و ضربه ایجاد شده را بررسی نمود. در گزارش دیگری [۴۳]، رفتار ستون‌های با مقاومت بالا تحت بار انفجار را بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که خرابی برشی حاکم بر مد شکست برای انفجار در نزدیک ستون رخ می‌دهد و ستون‌های با مقاومت بالا نسبت به ستون‌های معمولی در مواقع قرارگیری در مقابل بارهای شدید عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. میلز [۴۴]، تأثیر ترکیب

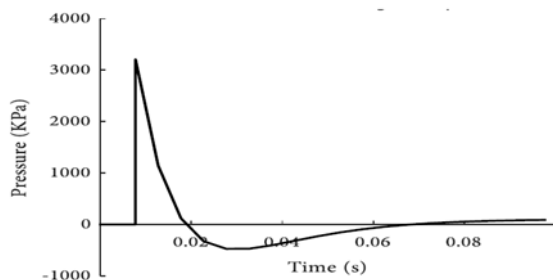
هر طبقه مطابق پارامترهای انفجار از رابطه (۹) به دست می آید [۲۲].

$$P(t) = P_{so} + P_r (1 - t/t_0) \exp^{-\gamma t/t_0} \quad (9)$$

به گونه ای که در رابطه (۹) γ پارامتری است که برای کنترل نسبت دامنه موج استفاده می شود و مطابق رابطه (۱۰) به دست می آید [۲۲].

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

لازم به ذکر است که مطابق روابط ارائه شده، شکل (۵) نمودار تاریخچه زمانی فشار انفجار وارد بر طبقه اول سازه را نشان می دهد. باید توجه شود که بار انفجار به صورت یک بار خطی تاریخچه زمانی بر روی ستون هایی که در مقابل جبهه انفجار هستند، وارد می شود (شکل (۵)).



شکل ۵- نمونه ای از نمودار تاریخچه زمانی فشار انفجار وارد بر طبقه اول سازه مورد مطالعه.

۳- زلزله

در این قسمت زلزله هایی که برای تحلیل دینامیکی و پایداری سازه طبق دسته بندی چندلر انتخاب شده است بررسی می شود [۵۱]. در این دسته بندی زلزله ها بر اساس پارامتر (PGA/PGV) یا نسبت شتاب بیشینه به جابه جایی بیشینه به سه دسته تقسیم می شوند. در این دسته بندی زلزله های دارای $PGA/PGV < 0.8$ را جزو دسته پایین یا ضعیف، زلزله های دارای $PGA/PGV > 1.2$ را جزو دسته بالا یا قوی و زلزله های دارای PGA/PGV بین 0.8 و 1.2 را جزو دسته متوسط تقسیم می شود. در این اساس این دسته بندی ۴ زلزله حوزه دور و نزدیک مطابق جدول (۱) انتخاب شده است. در شکل (۶) نمودار شتاب نگاشت های استفاده شده نشان داده شده است.

جدول ۱- زلزله های انتخاب شده.

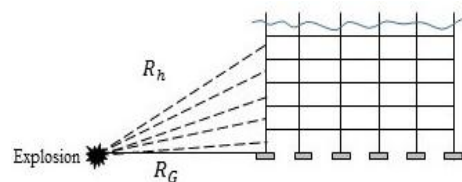
نوع	زلزله	PGA (m/s ²)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
نزدیک گسل	Duzce	۳/۹۶	۷۱/۱۵	۴۹/۶۹
	Gazli	۸/۴۷	۶۷/۶۵	۲۰/۷۱
	Imperial Valley	۲/۶۴	۲۴/۸۰	۹/۲۹
	Irpinia	۲/۲۲	۳۶/۹۸	۱۳/۱۲
دور از گسل	Landers	۲/۷۸	۳۵/۴۰	۲۹/۹۲
	Chi-Chi	۳/۳۳	۶۵/۰۰	۳۴/۹۳
	Superstition	۳/۵۰	۴۸/۰۷	۱۹/۲۷
	Northridge	۴/۳۴	۵۹/۲۹	۱۵/۴۸

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

۲-۲- محاسبه بار انفجار وارد بر سازه

در این مقاله جهت بررسی تأثیر توأمان بار زلزله و بار انفجار بر پاسخ دینامیکی سازه پنج طبقه فولادی، سه حالت بارگذاری در هنگام زلزله در نظر گرفته می شود. ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری از سازه و به میزان ۱۰۰۰ کیلوگرم است. با توجه به این نکته که ارتفاع ساختمان بر توزیع بار انفجار تأثیر دارد، به منظور توسعه بار انفجار بر روی سازه از مدل تئوری بر پایه ای تجربی استفاده شده است. این رویکرد، روش عددی ساده برای اعمال بار انفجار بر سازه را ایجاد می نماید. بدین منظور لازم است تا فاصله ماده منفجره از وسط ارتفاع هر طبقه مطابق شکل (۴) محاسبه شود. همچنین در همه معادلات به کار رفته واحدهای طول، جرم، فشار و زمان به ترتیب متر، کیلوگرم، کیلو پاسکال و ثانیه هستند.

$$R_h = \sqrt{R_G^2 + h^2} \quad (3)$$



شکل ۴- هندسه استفاده شده جهت محاسبه R_h [۲۲].

پس از به دست آمدن R_h از رابطه (۳)، بقیه پارامترها را بر حسب R_h می توان محاسبه نمود. بر این اساس، مدت زمان فشار مثبت انفجار از رابطه (۴) استفاده می شود [۲۲].

$$t_0 = w^{1/3} 10^{[-2.75 + 0.27 \log(R_h)]} \quad (4)$$

همچنین سرعت موج انفجار را می توان از رابطه (۵) محاسبه نمود [۴۹].

$$U = a_0 \sqrt{\frac{6P_{so} + 7P_o}{7P_o}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، P_o فشار هوای محیط و معادل ۱۰۱ کیلو پاسکال است و a_0 نیز سرعت صوت در هوا و برابر با ۳۳۵ متر بر ثانیه است. زمان رسیدن موج انفجار به سازه را می توان از رابطه (۶) محاسبه نمود.

$$t_A = \frac{R_h}{U} \quad (6)$$

جهت محاسبه مقدار فشار منعکس شده نیز می بایست ثابت C_r را مطابق رابطه (۷) محاسبه نمود [۵۰].

$$C_r = 34 \sqrt{\frac{P_{so}}{101}} \quad (7)$$

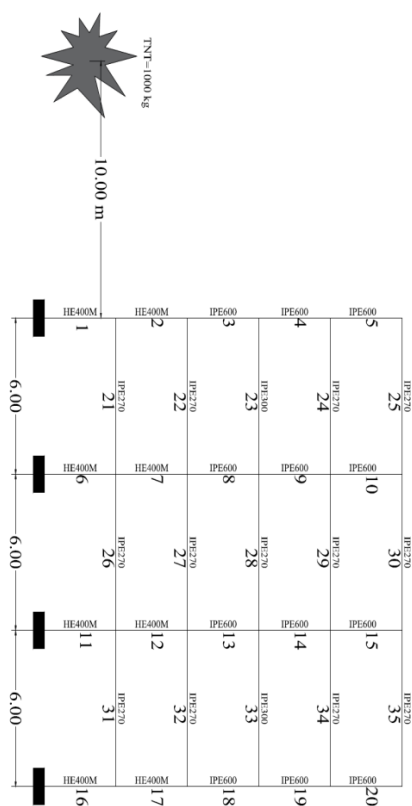
و بنابراین مقدار فشار منعکس شده نیز از رابطه (۸) به دست می آید.

$$P_r = C_r \times P_{so} \quad (8)$$

در انتها رابطه مربوط به فشار ناشی از موج انفجار در بستر زمان برای

می‌شود. همچنین در این مقاله تمام شتاب نگاشت‌ها به شتاب g مقیاس شده‌اند. هدف از این مثال بررسی تأثیر زمان وقوع انفجار بر پاسخ سازه است. در این راستا هر زلزله به سه حالت با انفجار تلفیق و به صورت هم‌زمان به سازه وارد شده است. این سه حالت شامل موارد زیر است:

- ۱- حالتی قبل از شروع زلزله انفجار حادث شود و به محض اتمام انفجار، زلزله شروع شود (حالت Before EQ).
 - ۲- حالتی که انفجار در زمانی که زلزله به بحرانی‌ترین حالت خود می‌رسد (زمان جنبش نیرومند زمین) حادث شود (حالت During EQ).
 - ۳- حالتی که به محض اتمام زلزله، انفجار شروع شود (حالت After EQ).
- حالت‌های مذکور درون شکل‌ها به ترتیب با نمادهای A، B و C نمایش داده شده است.



شکل ۷- نمای سازه مورد نظر در برابر انفجار.

دریفت طبقات برای مثال عددی اول: در شکل‌های (۸) دریفت طبقات مختلف برای سه حالت انفجار قبل از شروع زلزله، هم‌زمان با زلزله و بعد از اتمام زلزله نشان داده شده است. که برای حالات مختلف به ترتیب با Before EQ، During EQ و After EQ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ارائه شده برای دریفت طبقات در این مثال (شکل ۸)، مشاهده می‌شود که دریفت بیشینه طبقات برای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک برای اغلب موارد در حالتی که انفجار در زمان جنبش نیرومند زمین رخ می‌دهد بیشتر است (حالت During EQ). همچنین

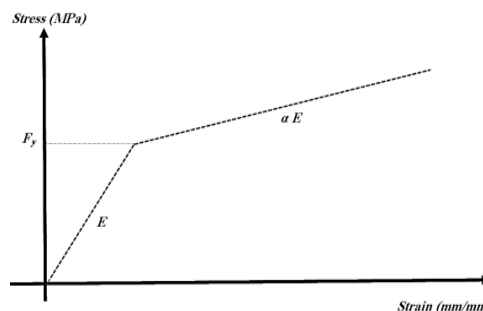
در جدول (۲) مدت زمان جنبش نیرومند زمین برای زلزله‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲- زمان جنبش نیرومند زمین [۳۱].

نوع	زلزله	شروع (m/s ²)	پایان (cm/s)	کل زمان (sec)
بخش شمال	Duzce	۲/۹۶	۱۴/۰۲	۱۱/۰۶
	Gazli	۴/۴۰	۱۱/۳۵	۶/۹۵
	Imperial Valley	۵/۳۴	۲۵/۹۱	۲۰/۵۷
	Irpinia	۴/۳۱	۱۹/۳۳	۱۵/۰۲۴
دور از گسل	Landers	۱۳/۵۸	۲۷/۱۴	۱۳/۵۶
	Chi-Chi	۲۷/۹۹	۵۸/۳۷	۳۰/۳۸
	Superstition	۶/۹۹	۳۴/۹۸	۲۷/۹۹
	Northridge	۳/۳۹	۵/۶۵	۹/۲۶

۴- رفتار غیر خطی مصالح

در این مقاله برای تحلیل دینامیکی غیر خطی از برنامه OpenSees که یک نرم‌افزار قدرتمند در زمینه تحلیل غیر خطی مصالح است، استفاده شده است. جهت مدل‌سازی مصالح تیر و ستون در قاب مورد مطالعه از مصالح Steel 01 در نرم‌افزار OpenSees استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد مصرفی برای قاب به ترتیب $F_y = 2.5 \times 10^7$ و $E = 2.04 \times 10^{10}$ کیلوگرم بر متر مربع هستند (شکل ۶). لازم به ذکر است که نسبت سختی پس از تسلیم به سختی قبل از تسلیم شدن مصالح (α) برابر با ۰/۰۲ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۶- مدل رفتاری انتخاب شده.

۵- مثال عددی اول: انفجار بیرون سازه برای بررسی اثر زمان وقوع انفجار با مقدار ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم

در ادامه به بررسی یک قاب ۵ طبقه فولادی با دهانه‌هایی به طول ۶ متر و ارتفاع طبقات معادل ۳/۲۰ متر، با سامانه قاب خمشی پرداخته می‌شود. قاب ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 طراحی شده است. مقاطع طراحی شده، شماره المان‌ها و همچنین فاصله انفجار و مقدار ماده منفجره به صورت شکل (۷) است. در ادامه این سازه تحت مدل بارگذاری مختلف در برابر اثر هم‌زمان انفجار و زلزله تحلیل

تأثیر زمان انفجار بر پایداری سازه است. با بررسی‌های انجام شده در مورد نیروی محوری ستون‌های سازه برای ۸ زلزله و ۳ مدل بارگذاری می‌توان نتیجه گرفت که بارمحوری ستون‌ها در هر سه حالت Before EQ، During EQ و After EQ تقریباً با هم برابر است. بنابراین زمان وقوع انفجار در زلزله بر پایداری سازه تأثیر نمی‌گذارد. در شکل (۱۰) به‌طور نمونه بارمحوری ستون‌ها برای زلزله‌ی Landers Fema نشان داده شده است. از این قسمت می‌توان نتیجه گرفت که زمان وقوع انفجار در طول زلزله چندان بر روی پارامترهای پایداری سازه که شامل فاکتور کماتش می‌شود، تأثیر ندارد.

۶- مثال عددی دوم: برای انفجارهای مختلف و در نظر گرفتن اثرات پایداری

با توجه به اینکه در مثال عددی قبل نشان داده شد که رفتار سازه در حالتی که زلزله و انفجار با هم تلفیق شود در همه زلزله‌ها تقریباً مشابه هم است. در این قسمت به‌صورت متمرکز یک سازه تحت سه مدل انفجار و یک زلزله (زلزله Chi-Chi) با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta بررسی می‌شود. هدف از ارائه این مثال بررسی رفتار یک سازه معمولی که مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ طراحی شده، است. این مثال برای ۴ نوع بار انفجار که در شکل (۱۳) با ۱ تا ۴ نشان داده شده است، ارزیابی می‌شود. مقاطع و شماره المان‌ها مطابق شکل (۱۱) در نظر گرفته شده است. بار ثقلی در نظر گرفته شده برای این سازه ۲۸۰۰ کیلوگرم بر متر است. در این مثال فرض شده است که انفجار در زمان جنبش نیرومند زلزله حادث شده است. در ادامه نتایج درون شکل با نمادهای جدول (۴) بیان شده است.

زمان وقوع انفجار می‌تواند بر رفتار طبقات در سازه تأثیر داشته باشد، این جمله بدان معنی است که مثلاً در شکل (۹-۵) در حالتی که انفجار بعد از اتمام زلزله رخ می‌دهد، طبقه ۲ از همه کمتر است و در حالی که انفجار و زلزله با هم رخ می‌دهد، دریافت طبقه دوم نزدیک به حالت پیشینه است.

جابه‌جایی بام برای مثال عددی اول: در شکل‌های (۹) جابه‌جایی بام برای سه حالت انفجار قبل از شروع زلزله، هم‌زمان با زلزله و بعد از اتمام زلزله نشان داده شده است که برای حالات مختلف به ترتیب با A، B و C نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تلفیق انفجار و زلزله در همه حالات موجب ایجاد جابه‌جایی پسماند شده است.

جابه‌جایی پیشینه بام برای مثال عددی اول: در جدول (۳) جابه‌جایی پیشینه بام برای سه حالت انفجار قبل از شروع زلزله، هم‌زمان با زلزله و بعد از اتمام زلزله نشان داده شده است. که برای حالات مختلف به ترتیب با Before EQ، During EQ و After EQ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه در این قسمت، می‌توان استنباط کرد که در حالتی که انفجار و زلزله هم‌زمان حادث می‌شود، تقریباً در همه زلزله‌ها حالت During EQ بحرانی‌تر بوده است و دلیل آن این است که در واقع در حالتی که انفجار در During EQ رخ می‌دهد، زلزله در بالاترین سطح انرژی خود (زمان جنبش نیرومند زمین) قرار دارد، بنابراین بیشترین اثر را بر روی سازه این حالت می‌گذارد. به‌طوری که جابه‌جایی پیشینه در این حالت نسبت به حالت After EQ یا Before EQ تا ۳۰ درصد در برخی از زلزله‌ها افزایش داشته است.

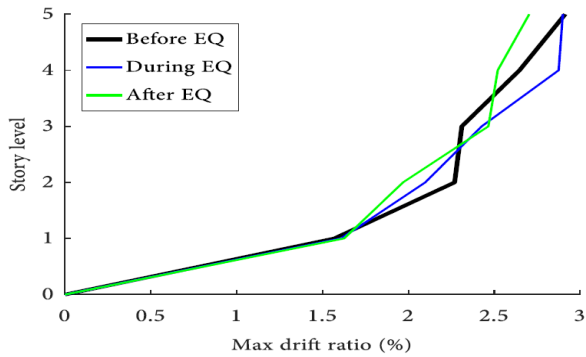
بررسی نیروی محوری ستون‌ها و بار بحرانی برای مثال عددی اول: هدف از این قسمت بررسی بارمحوری ستون‌ها در جهت ارزیابی

جدول ۳- جابه‌جایی پیشینه برای مثال ۱ با ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم.

نوع	زلزله	جابه‌جایی پیشینه بام (m)		
		Before EQ	During EQ	After EQ
نزدیک گسل	Duzce	۰/۰۹۰	۰/۰۹۸	۰/۰۹۶
	Gazli	۰/۰۴۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶۰
	Imperial Valley	۰/۰۸۰	۰/۱۱۲	۰/۰۹۲
	Irpinia	۰/۱۳۹	۰/۱۳۹	۰/۱۴۳
دور از گسل	Landers	۰/۰۹۵	۰/۰۹۷	۰/۱۰۰
	Chi-Chi	۰/۱۰۹	۰/۱۱۶	۰/۱۱۵
	Superstition	۰/۱۱۱	۰/۱۲۰	۰/۱۱۲
	Northridge	۰/۱۵۹	۰/۱۶۳	۰/۱۶۵

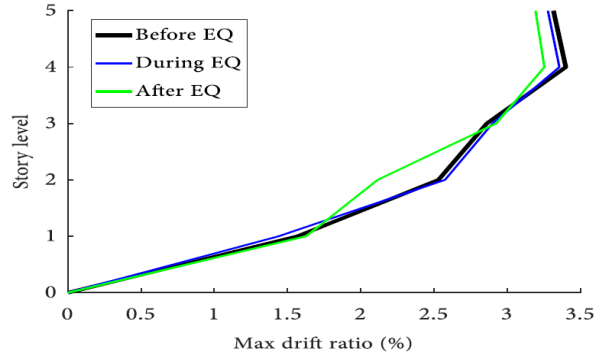
زلزله‌های حوزه نزدیک

ب- زلزله Duze

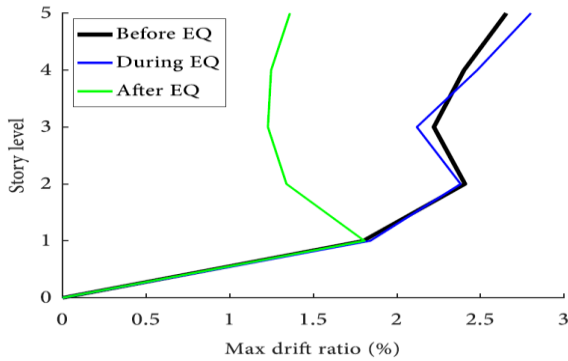


زلزله‌های حوزه دور

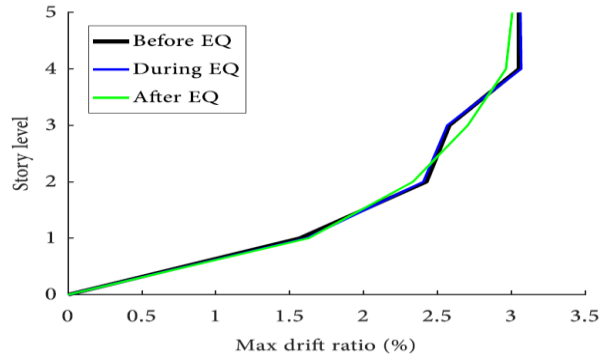
الف- زلزله Landers Fema



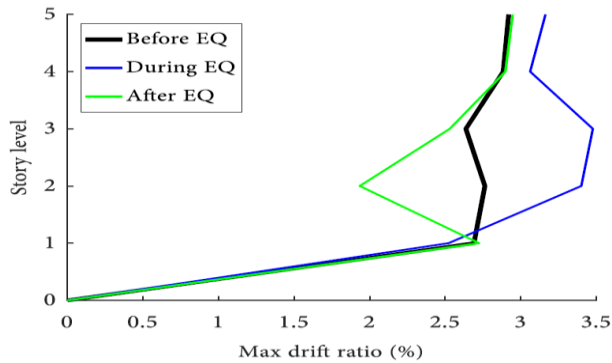
د- زلزله Gazli



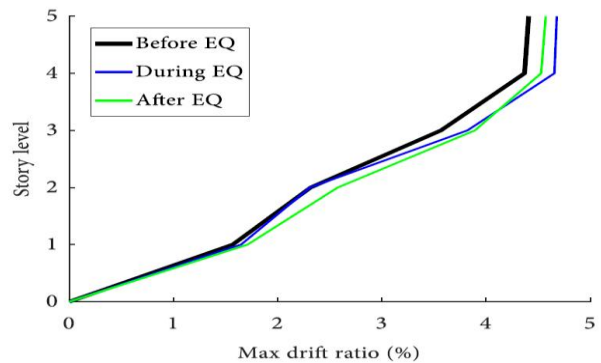
ج- زلزله Chi Chi



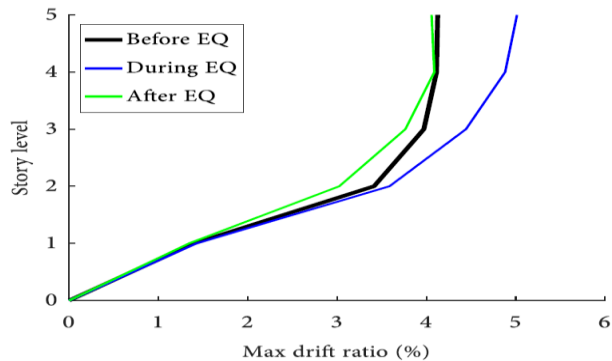
و- زلزله Imperial Valley



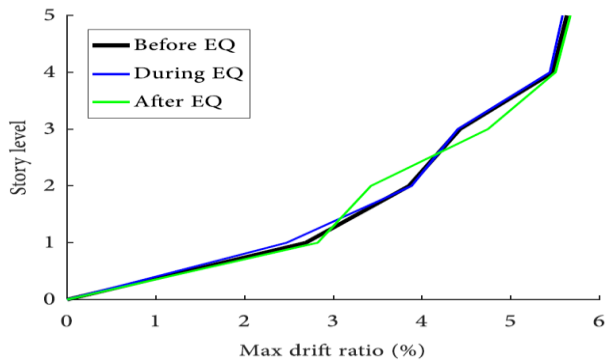
ه- زلزله Superstition



ح- زلزله Irpinia



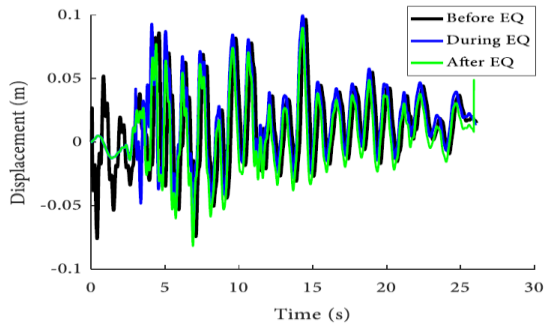
ز- زلزله Northridge



شکل ۸- منحنی دریفت زلزله‌های مختلف.

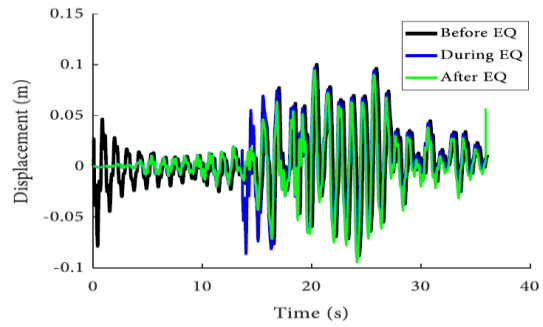
زلزله‌های حوزه نزدیک

ب- زلزله Duze

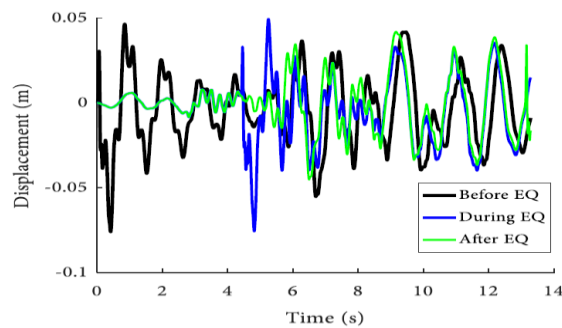


زلزله‌های حوزه دور

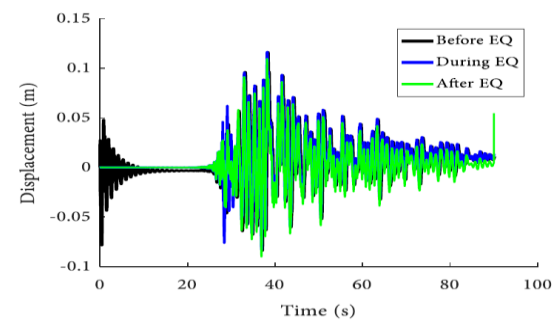
الف- زلزله Landers Fema



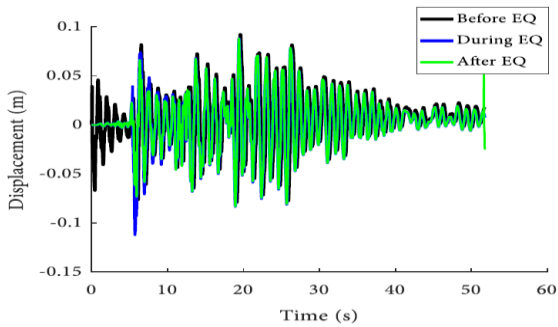
د- زلزله Gazli



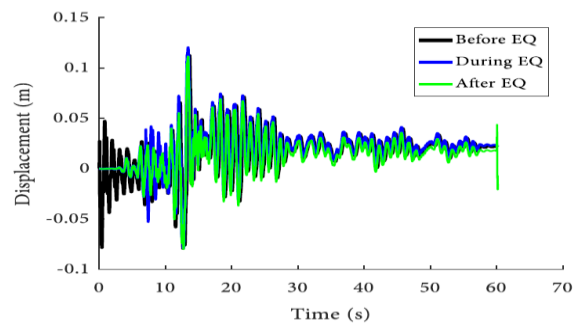
ج- زلزله Chi Chi



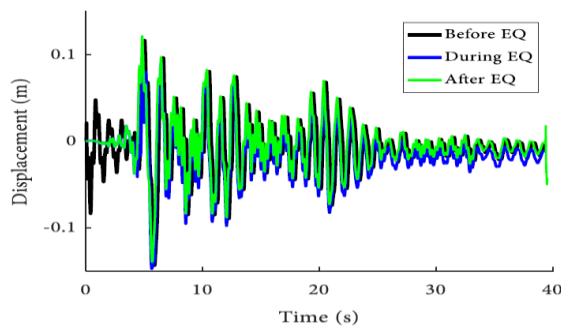
و- زلزله Imperial Valley



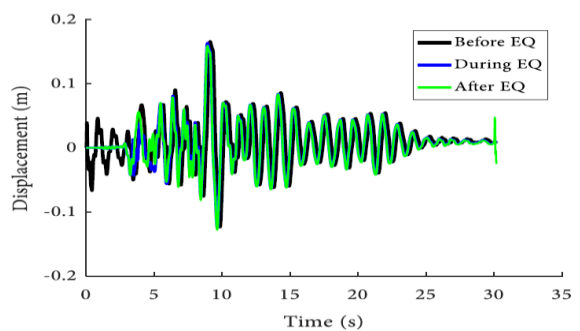
ه- زلزله Superstition



ح- زلزله Irpinia



ز- زلزله Northridge



شکل ۹- منحنی جابه‌جایی برای زلزله‌های مختلف.

نتایج دینامیکی برای انفجار بیرون سازه و با مقدار مواد منفجره

۵۰۰ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی نتایج برای انفجار بیرون سازه و با ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delata بررسی می‌شود. نتایج با نمادهای که در جدول قیل ذکر شد بیان شده است. در شکل (۱۲) نمودارهای مربوط به دریافت، جابه‌جایی بیشینه بام، برش پایه بیشینه، ممان پایه بیشینه، نیروی محوری بیشینه ستون و ممان بیشینه تیرها برای حالت مختلف نشان داده شده است. همچنین بر اساس آیین‌نامه FEMA-356، سطوح عملکردی سازه در نواحی IO، LS و CP در شکل (۱۲-الف) نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که برای انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم:

۱- با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۲-الف) می‌توان دریافت که تلفیق انفجار در این سطح از انرژی با زلزله، تأثیر چندانی بر پاسخ سازه ندارد. به عبارتی ارتعاشات ناشی از این انفجار مشابه یک زلزله عمل می‌کند.

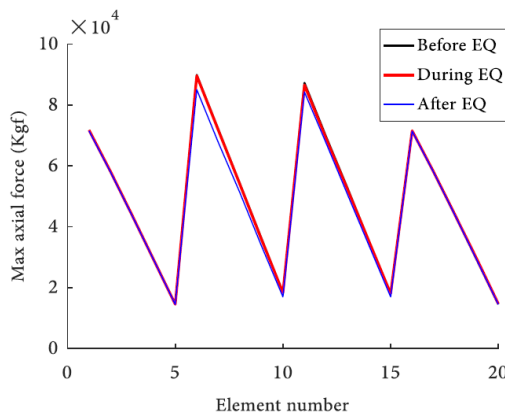
۲- با توجه به شکل (۱۲-ب) می‌توان نتیجه گرفت که انفجار به تنهایی جابه‌جایی آن کمتر از ۵۰ درصد حالت‌های دیگر است.

۳- با توجه به شکل‌های (۱۲-ه و ۱۲-و) می‌توان دریافت که نیروی محوری ستون‌ها در حالت زلزله تنها در اغلب ستون‌ها تفاوت چندانی ندارد با حالتی که با انفجار تلفیق می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انفجار نیروی محوری نسبتاً کمی به سازه وارد می‌کند. همچنین می‌توان دریافت که لنگر انتهای تیرها در حالتی زلزله به تنهایی باشد تقریباً برابر با حالتی است که زلزله و انفجار تلفیق شود.

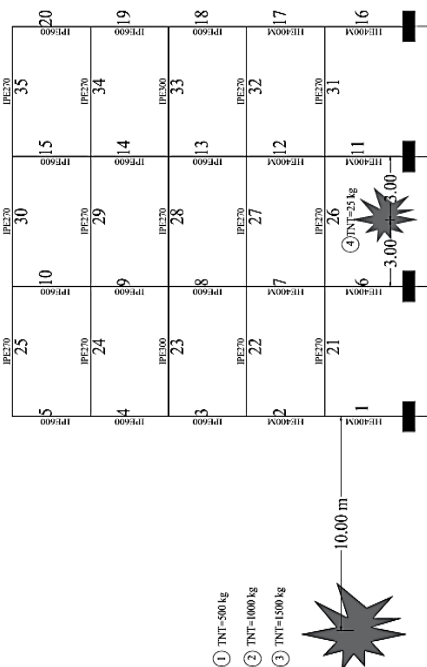
۴- با توجه به شکل (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر در نظر گرفتن P-Delta در محاسبات بسیار کم است.

نتایج پایداری با لحاظ اثرات P-Delta برای انفجار بیرون سازه و

با مقدار مواد منفجره ۵۰۰ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی و تحلیل پایداری سازه تحت شرایط انفجار بیرون از سازه با ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۳-الف) مشاهده می‌شود، فاکتور کمانشی برای ۶ مود کمانشی ارائه شده است. از این شکل می‌توان استنباط کرد که فاکتور کمانش که همان نسبت نیروی محوری بحرانی به نیروی محوری موجود است، در حالتی که انفجار تنها وارد می‌شود تقریباً برابر حالتی است که انفجار و زلزله هم‌زمان به سازه وارد می‌شود. بنابراین از این قسمت می‌توان استنباط کرد که پایداری سازه با تلفیق نیروی انفجار و زلزله، مطابق حالتی است که انفجار به تنهایی به سازه وارد شود. همچنین از شکل (۱۳-ب) می‌توان استنباط کرد که سازه تحت نیروی انفجار به تنهایی دارای پایداری بیشتری است.



شکل ۱۰- بارمحوری بیشینه ستون‌های زلزله Landers Fema.

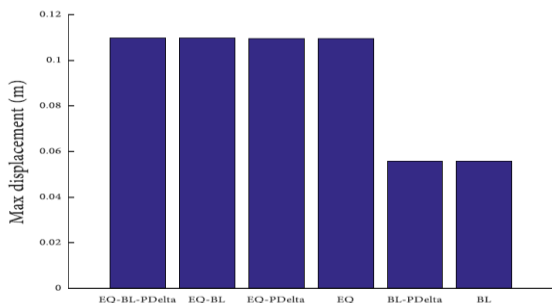


شکل ۱۱- سازه مربوط به مثال عددی دوم.

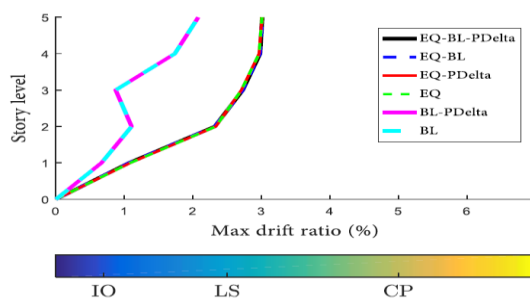
جدول ۴- نمادهای استفاده شده در شکل‌ها.

نماد بارگذاری	تعریف
EQ-BL-PDelta	تأثیر هم‌زمان انفجار و زلزله با در نظر گرفتن اثرات P-Delta
EQ-BL	تأثیر هم‌زمان انفجار و زلزله بدون نظر گرفتن اثرات P-Delta
EQ-PDelta	تأثیر زلزله به تنهایی با نظر گرفتن اثرات P-Delta
EQ	تأثیر زلزله به تنهایی بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta
BL-PDelta	تأثیر انفجار به تنهایی با در نظر گرفتن اثرات P-Delta
BL	تأثیر انفجار به تنهایی بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta

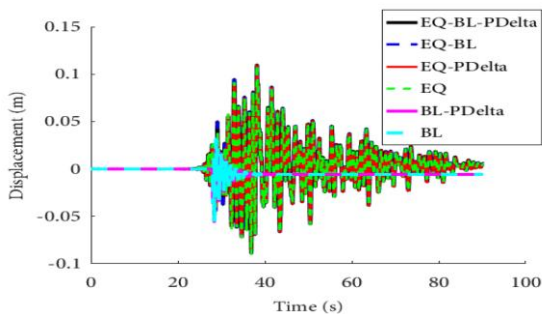
ب- جابه‌جایی بیشینه بام برای حالات مختلف



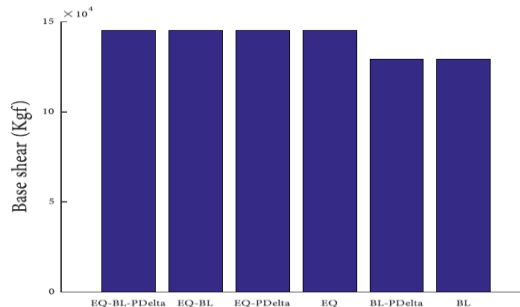
الف- دریفت طبقات برای حالات مختلف



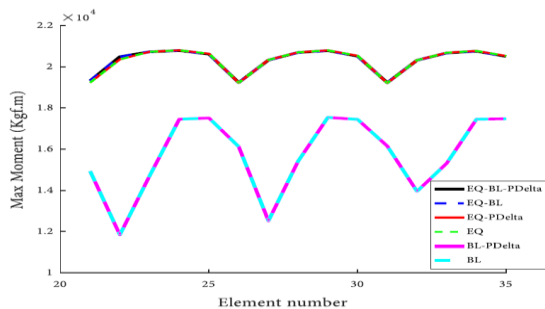
د- پاسخ تاریخیچه زمانی بام



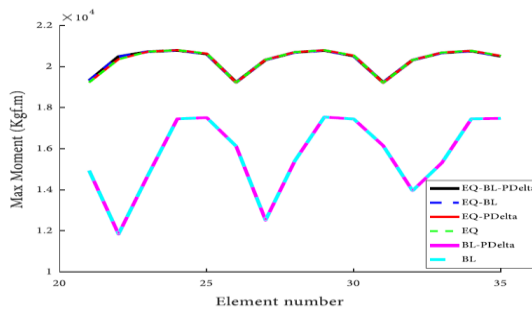
ج- برش پایه بیشینه



و- لنگر بیشینه تیرها



ه- نیروی محوری بیشینه ستون‌ها

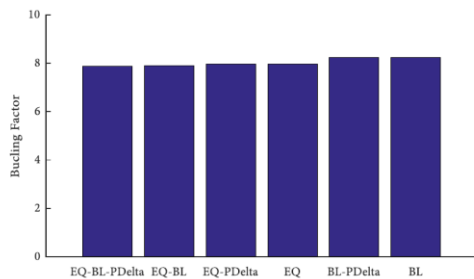


شکل ۱۲- نتایج تحلیل دینامیکی انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم.

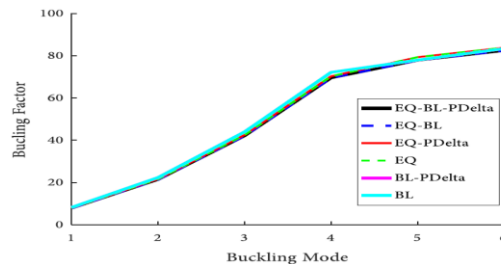
جابه‌جایی بیشینه بام، برش پایه بیشینه، ممان پایه بیشینه، نیروی محوری بیشینه ستون و ممان بیشینه تیرها برای حالت مختلف نشان داده شده است. همچنین بر اساس آیین‌نامه FEMA-356، سطوح عملکردی سازه در نواحی IO، LS و CP در شکل (۱۵-الف) نمایش داده شده است.

نتایج دینامیکی برای انفجار بیرون سازه و با مقدار مواد منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی نتایج برای انفجار بیرون سازه و با ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta بررسی می‌شود. نتایج با نمادهای که در جدول قیل ذکر شد بیان شده است. در شکل (۱۴) نمودارهای مربوط به دریفت،

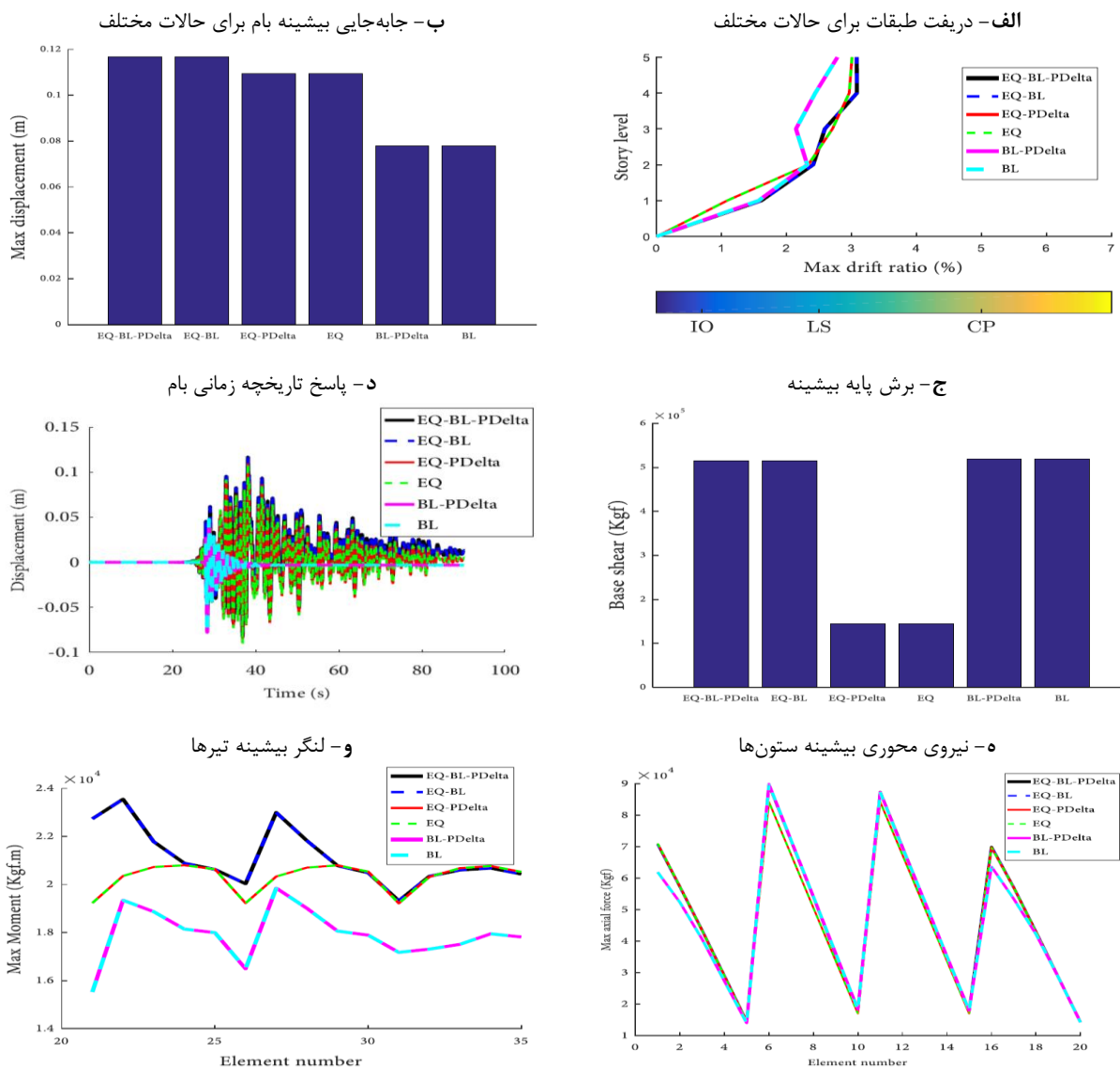
ب- مقایسه فاکتور کماتش اول برای حالت‌های مختلف



الف- نمودار فاکتور کماتش برای مدهای مختلف



شکل ۱۳- نتایج تحلیل پایداری انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم.



شکل ۱۴- نتایج تحلیل دینامیکی انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم.

گرفت که انفجار، نیروی محوری نسبتاً کمی به سازه وارد می‌کند. همچنین می‌توان دریافت که تلفیق زلزله و انفجار باعث تشدید لنگر قابل توجهی در انتهای تیرها شده است. ۴- با توجه به شکل (۱۴) می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر در نظر گرفتن P-Delta در محاسبات بسیار کم است.

نتایج پایداری با لحاظ اثرات P-Delta برای انفجار بیرون سازه و با مقدار مواد منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی پایداری سازه تحت شرایط قسمت قبل پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۵-الف) مشاهده می‌شود، فاکتور کمانشی برای ۶ مود کمانشی ارائه شده است. از این شکل می‌توان استنباط کرد که فاکتور کمانش که همان نسبت نیروی محوری بحرانی به نیروی محوری موجود است، در حالتی که انفجار تنها وارد می‌شود تقریباً در همه حالت‌ها باهم اختلاف کمی دارند. بنابراین در این قسمت می‌توان

با توجه به شکل (۱۴) می‌توان برای ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم نتیجه‌های زیر را گرفت:

۱- با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۴-الف) می‌توان دریافت که تلفیق انفجار در این سطح از انرژی با زلزله، بر روی سطح عملکرد سازه به مقدار خیلی کمی تأثیر دارد. بنابراین دررفت بیشینه به اندازه نزدیک به ۶ درصد افزایش یافته است.

۲- با توجه به شکل (۱۴-ب) می‌توان نتیجه گرفت، که تلفیق انفجار و زلزله در این حالت بر روی پاسخ سازه در مقایسه با حالتی که انفجار و زلزله به تنهایی وارد شود، تأثیر بیشتری داشته و جابه‌جایی بیشینه بام نزدیک به ۸ درصد نسبت به زلزله تنها و نزدیک به ۵۰ درصد افزایش یافته است.

۳- با توجه به شکل‌های (۱۴-ه و ۱۴-و) می‌توان دریافت که نیروی محوری ستون‌ها در حالت زلزله تنها در اغلب ستون‌ها تفاوت چندانی با حالتی که با انفجار تلفیق می‌شود را ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه

۲- با توجه به شکل (۱۶-ب) می‌توان نتیجه گرفت، که زلزله به تنهایی موجب جابه‌جایی بام بیشتری می‌شود. زیرا به دلیل غیر خطی شدن طبقات پایین دیگر سازه خراب شده است.

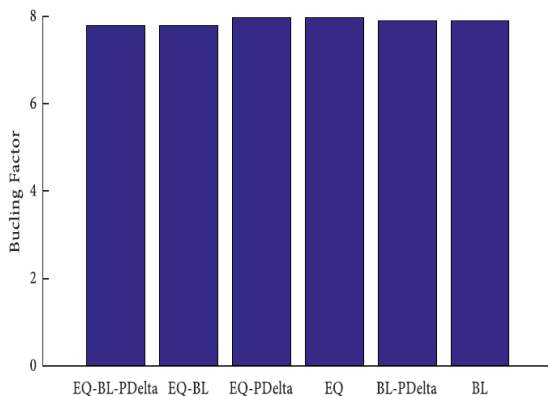
۳- با توجه به شکل‌های (۱۶-ه و ۱۶-و) می‌توان دریافت که نیروی محوری ستون‌ها در حالت زلزله تنها در اغلب ستون‌ها تفاوت چندانی با حالتی که با انفجار تلفیق می‌شود را ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انفجار، نیروی محوری نسبتاً کمی به سازه وارد می‌کند. همچنین می‌توان دریافت که تلفیق زلزله و انفجار باعث تشدید لنگر قابل توجهی در انتهای تیرها شده است.

۴- با توجه به شکل (۱۶) می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر در نظر گرفتن P-Delta در محاسبات بسیار کم است.

نتایج پایداری با لحاظ اثرات P-Delta برای انفجار بیرون سازه و

با مقدار مواد منفجره ۱۵۰۰ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی پایداری سازه تحت شرایط قسمت قبل پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۷-الف) مشاهده می‌شود، فاکتور کمانشی برای ۶ مود کمانشی ارائه شده است. از این شکل می‌توان استنباط کرد که فاکتور کمانش که همان نسبت نیروی محوری بحرانی به نیروی محوری موجود است، در حالتی که انفجار تنها وارد می‌شود با حالتی که زلزله و انفجار تلفیق می‌شود مشابه است. همچنین در این قسمت می‌توان دریافت که زلزله به تنهایی دارای پایداری بیشتری است.

ب- مقایسه فاکتور کمانش اول برای حالت‌های مختلف



استنباط کرد که برای انفجار با این سطح انرژی برای حالت‌های مختلف پایداری به میزان خیلی زیاد تغییر نیافته است. همچنین از شکل (۱۵-ب) می‌توان استنباط کرد که سازه تحت نیروی زلزله به تنهایی پایداری بیشتری است.

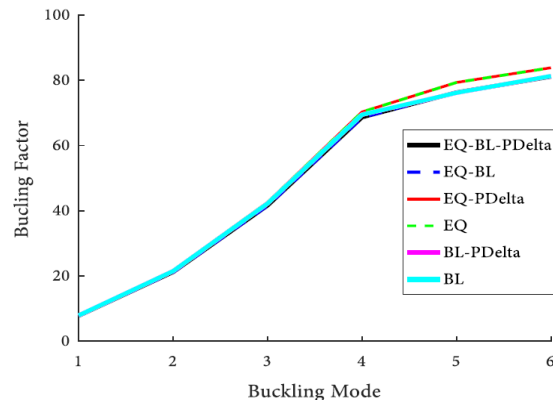
نتایج دینامیکی برای انفجار بیرون سازه و با مقدار مواد منفجره

۱۵۰۰ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی نتایج برای انفجار بیرون سازه و با ماده منفجره ۱۵۰۰ کیلوگرم با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta بررسی می‌شود. نتایج با نمادهای که در جدول قبل ذکر شد بیان شده است. در شکل (۱۶) نمودارهای مربوط به دریافت، جابه‌جایی بیشینه بام، برش پایه بیشینه، ممان پایه بیشینه، نیروی محوری بیشینه ستون و ممان بیشینه تیرها برای حالت مختلف نشان داده شده است. همچنین بر اساس آیین‌نامه FEMA-356، سطوح عملکردی سازه در نواحی IO، LS و CP در شکل (۱۶-الف) نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۱۶) می‌توان برای ماده منفجره ۱۵۰۰ کیلوگرم نتیجه زیر را گرفت:

۱- با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۶-الف) می‌توان دریافت که تلفیق انفجار در این سطح از انرژی با زلزله، بر روی سطح عملکرد سازه به مقدار قابل توجهی تأثیر دارد. در این حالت سازه تحت انفجار تنها رفتاری مشابه با حالت تلفیق شده انفجار و زلزله دارد. یعنی با وقوع انفجار سازه به مقدار قابل توجهی وارد مرحله غیر خطی می‌شود.

الف- نمودار فاکتور کمانش برای مدهای مختلف

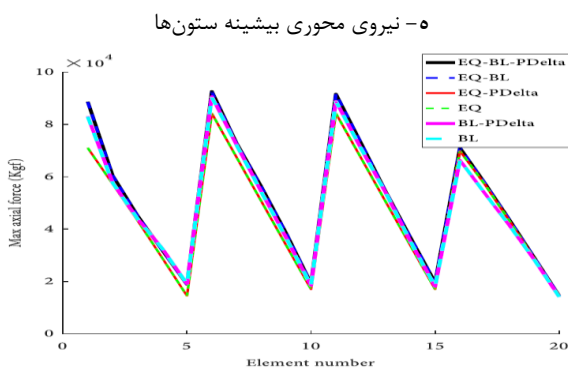
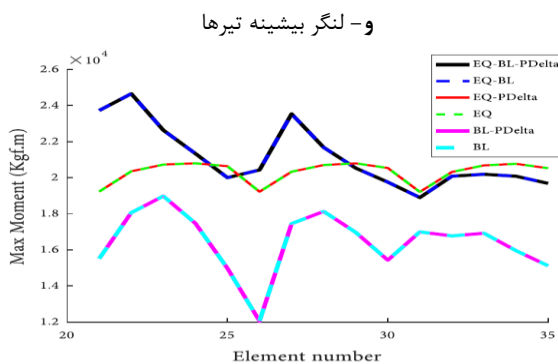
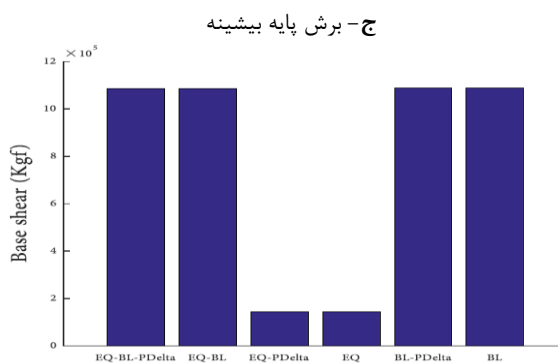
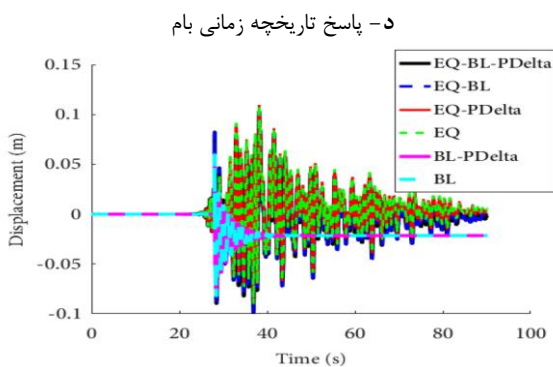
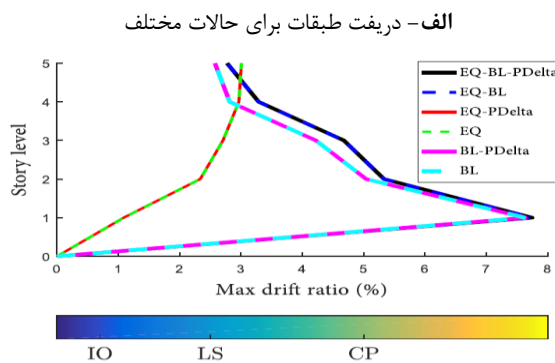
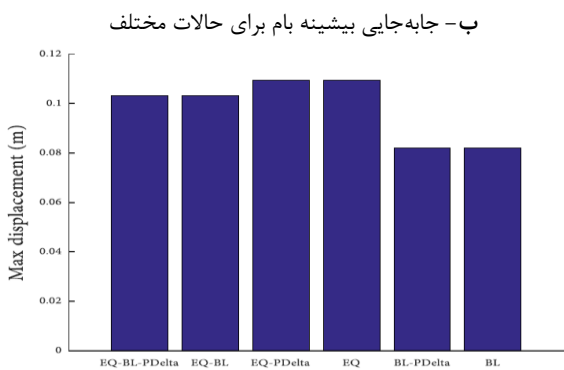


شکل ۱۵- نتایج تحلیل پایداری انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرم.

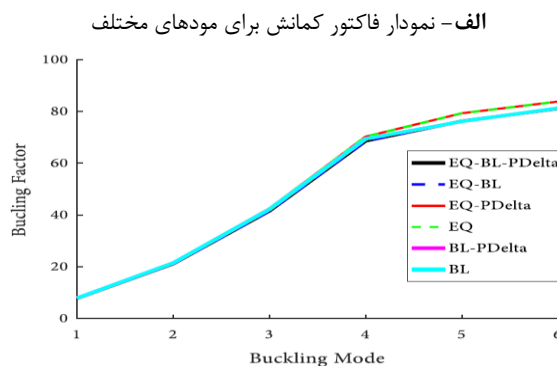
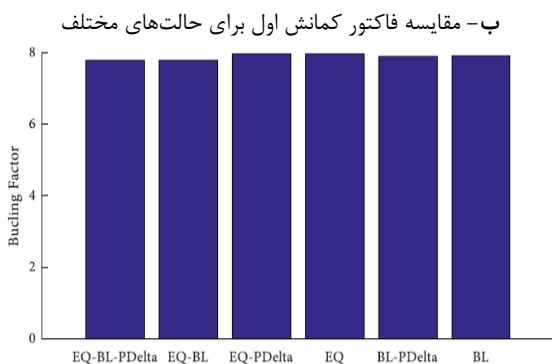
جابه‌جایی بیشینه بام، برش پایه بیشینه، ممان پایه بیشینه، نیروی محوری بیشینه ستون و ممان بیشینه تیرها برای حالت مختلف نشان داده شده است. همچنین بر اساس آیین‌نامه FEMA-35، سطوح عملکردی سازه در نواحی IO، LS و CP در شکل (۱۸-الف) نمایش داده شده است.

نتایج دینامیکی برای انفجار درون سازه و با مقدار مواد منفجره

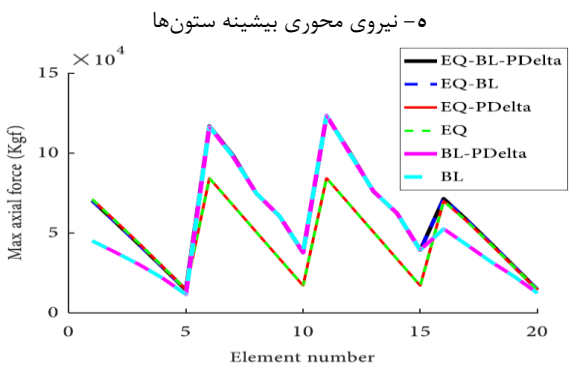
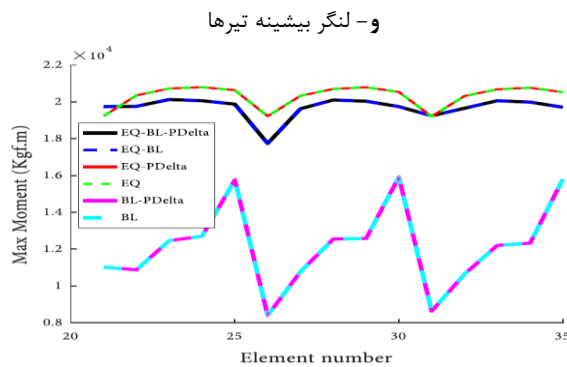
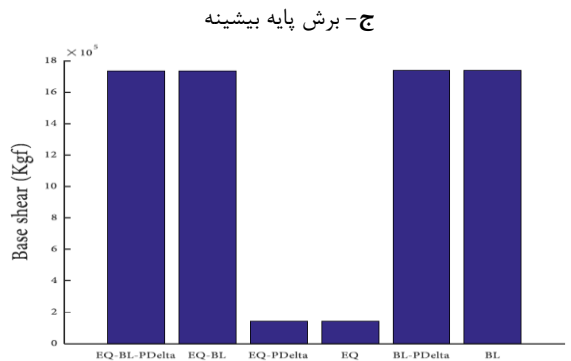
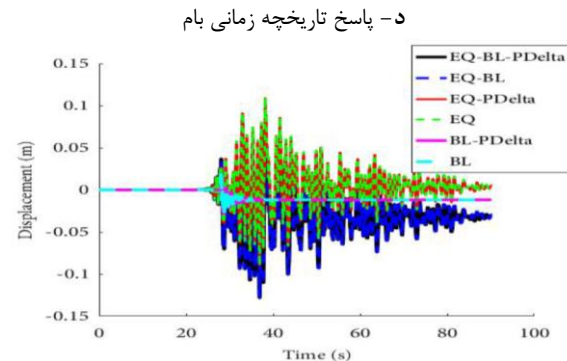
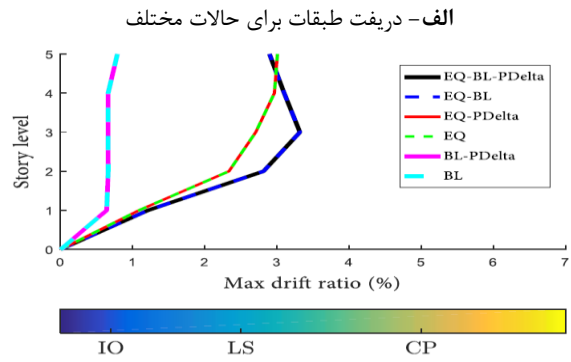
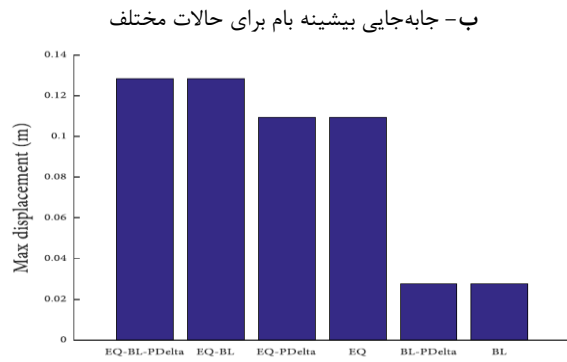
۲۵ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی نتایج برای انفجار بیرون سازه و با ماده منفجره ۲۵ کیلوگرم با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta بررسی می‌شود. نتایج با نمادهای که در جدول قبل ذکر شد بیان شده است. در شکل (۱۸) نمودارهای مربوط به دریافت،



شکل ۱۶- نتایج تحلیل دینامیکی انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۱۵۰۰ کیلوگرم.



شکل ۱۷- نتایج تحلیل پایداری انفجار بیرون سازه با ماده منفجره ۱۵۰۰ کیلوگرم.



شکل ۱۸- نتایج تحلیل دینامیکی انفجار درون سازه با ماده منفجره ۲۵ کیلوگرم.

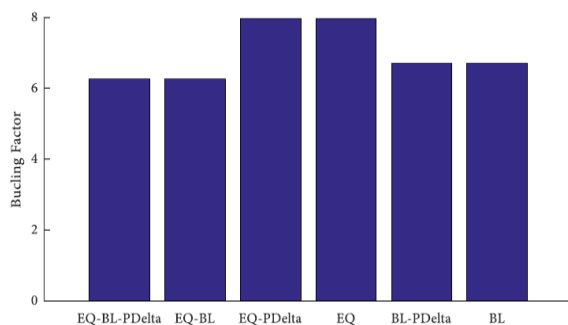
نتایج پایداری با لحاظ اثرات P-Delta برای انفجار درون سازه و با مقدار مواد منفجره ۲۵ کیلوگرم: در این قسمت به بررسی پایداری سازه تحت شرایط قسمت قبل پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۹-الف) مشاهده می‌شود، فاکتور کمانشی برای ۶ مود کمانشی ارائه شده است. از این شکل می‌توان استنباط کرد که فاکتور کمانشی که همان نسبت نیروی محوری بحرانی به نیروی محوری موجود است، در حالتی که انفجار وارد محاسبات می‌شود پایداری سازه کاهش یافته است. در این قسمت می‌توان استنباط کرد که وقوع انفجار به میزان قابل توجهی بر پایداری سازه تأثیرگذار است.

مقایسه نتایج هر ۴ سناریو: در شکل (۲۰) نتایج مربوط به برش پایه و جابه‌جایی بیشینه بام برای هر ۴ سناریوی بررسی شده در این مقاله ارائه شده است. بر اساس مطالعات انجام شده در این مقاله می‌توان دریافت که در Case4 که مربوط به انفجار درون سازه‌ای است، بیشترین جابه‌جایی را بام ایجاد می‌کند.

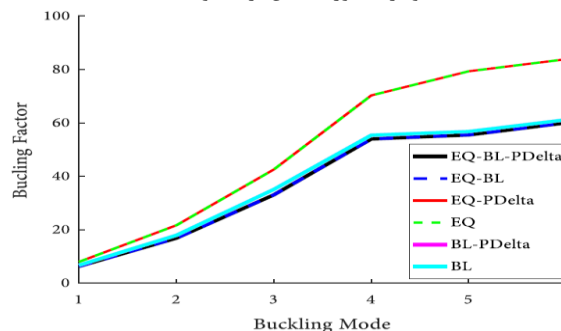
با توجه به شکل (۱۸) می‌توان برای ماده منفجره ۱۵۰۰ کیلوگرم نتیجه زیر گرفت:

- با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۸-الف) می‌توان دریافت که تلفیق انفجار در این سطح از انرژی با زلزله، بر روی سطح عملکرد سازه تأثیر دارد. در این حالت سازه تحت انفجار تنها رفتاری دارای سطح عملکردی IO است ولی وقتی با انفجار تلفیق می‌شود سطح عملکرد آن به سمت خراب شدن پیش می‌رود.
- با توجه به شکل (۱۸-ب) می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق انفجار و زلزله باعث تشدید در جابه‌جایی بیشینه بام می‌شود.
- با توجه به شکل‌های (۱۸-ه و ۱۸-و) می‌توان دریافت که در حالتی که انفجار وارد محاسبات می‌شود، نیروی محوری ستون‌ها تشدید یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انفجار در این حالت بر روی نیروی محوری ستون‌ها تأثیرگذار بوده است.
- با توجه به شکل (۱۸) می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر در نظر گرفتن P-Delta در محاسبات بسیار کم است.

ب- مقایسه فاکتور کمانش اول برای حالت‌های مختلف

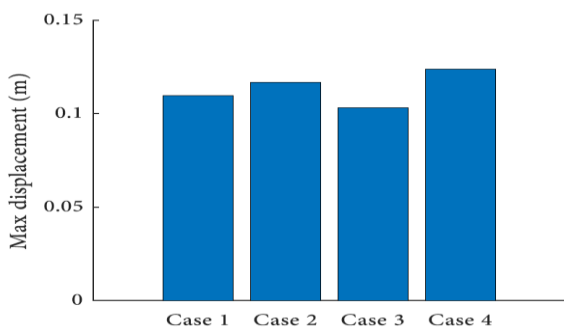


الف- نمودار فاکتور کمانش برای مدهای مختلف

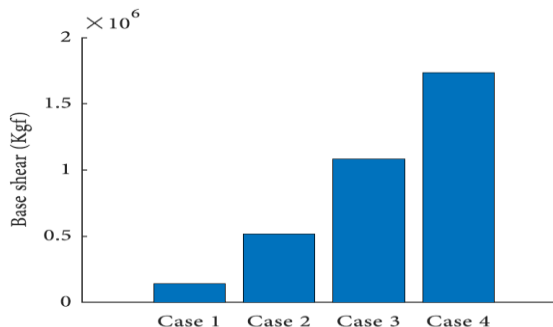


شکل ۱۹- نتایج تحلیل پایداری انفجار درون سازه سازه با ماده منفجره ۲۵ کیلوگرم.

ب- نمودار جابه‌جایی بام بیشینه برای ۴ سناریو



الف- نمودار برش پایه بیشینه برای ۴ سناریو



شکل ۲۰- نتایج جابه‌جایی بیشینه بام و برش پایه بیشینه برای سناریوهای مختلف.

رفتار سازه از زلزله پیروی می‌کند.

۳- در حالت انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم بیرون سازه نشان داده شد که پاسخ سازه در حالتی که انفجار و زلزله با هم رخ می‌دهد مشابه حالتی است که انفجار به تنهایی رخ می‌دهد. این بدان معنی است که انفجار در این سطح نیروی خیلی بالاتری از زلزله تنها وارد می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رفتار سازه تنها از انفجار پیروی می‌کند.

۴- در همه انفجارها نشان داده شد که اثرات در نظر گرفتن P-Delta تأثیری بر روی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و پایداری ندارد.

۵- برش پایه بیشینه در حالتی که انفجار وارد محاسبات می‌شود می‌تواند تا ۸ برابر افزایش داشته است.

۶- وارد شدن انفجار در محاسبات بر روی خصوصیات دینامیکی تأثیر بیشتری نسبت به خصوصیات پایداری می‌گذارد. دلیل این امر می‌تواند وجود نیروی زیاد انفجار بر سازه باشد که در اثر این نیرو سازه به مقدار زیادی وارد محدوده غیر خطی می‌شود.

۷- در حالتی که انفجار وارد محاسبات می‌شود، لنگر بیشینه تیرها تا ۲ برابر افزایش می‌یابد.

۸- بر اساس مطالعات انجام گرفته در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که زلزله‌های درون سازه‌ای در مقایسه با انفجارهای بیرون سازه‌ای، تأثیر بیشتری بر پایداری سازه دارند. دلیل این امر می‌تواند تأثیر بیشتر نیروی انفجار بر روی المان‌های سازه‌ای باشد.

۹- در شکل (۲۰) نمودار مربوط به جابه‌جایی بیشینه بام و برش پایه

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار به بررسی اثر توأمان زلزله‌های حوزه دور و نزدیک و انفجار بر روی سازه پرداخته شد. در این راستا ابتدا برای بررسی زمان وارد کردن انفجار در محاسبات یک سازه تحت سه مدل از بارگذاری انفجار برای هر زلزله قرار گرفت. این سه مدل انفجار شامل قبل از زلزله، در زمان جنبش نیرومند و بعد زلزله می‌شد. با بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که بحرانی‌ترین حالت مربوط به زمانی است که انفجار در زمان جنبش نیرومند زمین زلزله رخ دهد. بر این اساس برای بررسی متمرکز، در قسمت بعدی مقاله سازه تنها برای یک زلزله و در حالتی که انفجار در زمان جنبش نیرومند زمین رخ می‌دهد بررسی شد. این فرض محتمل‌ترین حالت مطابق با واقعیت است. در مثال دوم یک سازه تحت انفجارهای درون و بیرون سازه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- نتایج نشان داد که پاسخ سازه در حالت تلفیق انفجار و زلزله وابسته به مقدار ماده منفجره است. بدان معنا که هر چه مقدار ماده منفجره افزایش می‌یابد، پاسخ سازه بیشتر تحت تأثیر نیروی انفجار قرار می‌گیرد.

۲- در انفجار ۵۰۰ کیلوگرم بیرون از سازه، نشان داده شد تلفیق انفجار و زلزله تأثیر چندانی بر پاسخ سازه ندارد. این بدان معنا است که نیروی زلزله غالب‌تری نسبت به این سطح از انفجار دارد. در این حالت

- Directional Horizontal Seismic Actions”; In 2018 7th Int. Conf. on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018), Atlantis Press, 2018.
- [17] Kamgar, R.; Majidi, N.; Heidari, A. “Continuous Wavelet and Fourier Transform Methods for the Evaluation of the Properties of Critical Excitation”; Amirkabir J. of Civil & Environmental Engineering, 2019 (In Persian).
- [18] Heidari, A.; Majidi, N. “Investigation of the Natural Frequency of the Structure and Earthquake Frequencies in the Frequency Domain Using a Discrete Wavelet”; Sharif J. of Civil Engineering, 2019.
- [19] Lu, C. C.; Hwang, J. H. “Nonlinear Collapse Simulation of Daikai Subway in the 1995 Kobe Earthquake: Necessity of Dynamic Analysis for a Shallow Tunnel”; Tunnelling and Underground Space Technology 2019, 87, 78-90.
- [20] Agrawal, C. P.; Khedikar, A. R. “Linear and Nonlinear Dynamic Analysis of RC Structure for Various Plan Configurations Using ETABS”; J. Struct. Eng. 2018, 7, 70.
- [21] Portugal, H.; Tarque, N. “Non-linear Modelling of a Geomesh-Reinforced Earthen Wall Subjected to Dynamic Loading”; Springer, 2019, 1108-1116.
- [22] Tavakoli, R.; Kamgar, R.; Rahgozar, R. “The Best Location of Belt Truss System in Tall Buildings Using Multiple Criteria Subjected to Blast Loading”; Civil Eng. J. 2018, 4, 1338-1353.
- [23] Moustafa, A.; Takewaki, I. “Characterization and Modeling of Near-Fault Pulse-Like Strong Ground Motion via Damage-Based Critical Excitation Method”; Struct. Eng. & Mechanics 2010, 34, 755.
- [24] Bray, J. D.; Rodriguez-Marek, A. “Characterization of forward-Directivity Ground Motions in the Near-Fault Region”; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2004, 24, 815-828.
- [25] Chopra, A. K.; Chintanapakdee, C. “Comparing Response of SDF Systems to Near-Fault and Far-Fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions”; Earthq. Eng. Struct. Dyn. 2001, 30, 1769-1789.
- [26] Alavi, B.; Krawinkler, H. “Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures”; John A. Blume, Earthq. Eng. Center Stanford, 2001.
- [27] Ambraseys, N.; Douglas, J. “Near-field Horizontal and Vertical Earthquake Ground Motions”; Soil Dyn. Earthq. Eng. 2003, 23, 1-18.
- [28] Chandramohan, R.; Baker, J. W.; Deierlein, G. G. “Quantifying the Influence of Ground Motion Duration on Structural Collapse Capacity Using Spectrally Equivalent Records”; Earthq. Spectra 2016, 32, 927-950.
- [29] Yaghmaei-Sabegh, S. “Earthquake Ground-Motion Duration Estimation Using General Regression Neural Network”; Scientia Iranica 2018, 25, 2425-2439.
- [30] Trifunac, M. D.; Brady, A. G. “A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion”; Bulletin of the Seismological Society of America 1975, 65, 581-626.
- [31] Chandramohan, R.; Baker, J. W.; Deierlein, G. G. “Impact of Hazard Consistent Ground Motion Duration in Structural Collapse Risk Assessment”; Earthq. Eng. Struct. Dyn. 2016, 45, 1357-1379.
- [32] Bommer, J. J.; Martinez-Pereira, A. “The Effective Duration of Earthquake Strong Motion”; J. Earthquake Engineering 1999, 3, 127-172.
- [33] Habibi, A. R.; Sahabi, E. “Development of a Proper Load Pattern for Nonlinear Static Analysis of Composite Girder Bridges Under Blast”; J. Passive Defence Sci. and Technol. 2016, 6, 235-244.
- [34] Khaledy, N.; Habibi, A.; Memarzadeh, P. “A Comparison between Different Techniques for Optimum Design of Steel Frames
- بیشینه برای ۴ سناریوی در نظر گرفته شده، نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی با Case1، Case2، Case3 و Case4 علامت‌گذاری شده است که به ترتیب مربوط به انفجاری خارجی با ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم TNT، انفجار خارجی با ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، انفجار خارجی با ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT و انفجار داخلی با ۲۵ کیلوگرم TN را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین جابه‌جایی بام و برش پایه مربوط به Case4 (انفجار داخلی با ۲۵ کیلوگرم TNT) است. در نتیجه از این شکل نیز می‌توان دریافت که انفجارهای درون سازه‌ای به دلیل اینکه بر روی اعضای بیشتری از سازه اثر می‌گذارند، مخرب‌تر هستند.

مراجع

- [1] Timoshenko, S. P.; Gere, J. M. “Theory of Elastic Stability”; Courier Corporation, 2009.
- [2] Chen, W. F.; Lui, E. M. “Structural Stability: Theory and Implementation”; 1987.
- [3] Cedolin, L. “Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories”; World Scientific, 2010.
- [4] Frisch-Fay, R. “On the Stability of a Strut under Uniformly Distributed Axial Forces”; Int. J. Solids Struct. 1966, 2, 361-369.
- [5] Ermopoulos, J. C. “Equivalent Buckling Length of Non-Uniform Members”; J. Construct. Steel Res. 1997, 42, 141-158.
- [6] Karabalis, D.; Beskos, D. “Static, Dynamic and Stability Analysis of Structures Composed of Tapered Beams”; Computers & Structures 1983, 16, 731-748.
- [7] Siginer, A. “Buckling of Columns of Variable Flexural Rigidity”; J. Eng. Mechanics 1992, 118, 640-643.
- [8] Erkmen, R. E.; Mohareb, M. “Buckling Analysis of Thin-walled Open Members - A Complementary Energy Variational Principle”; Thin-Walled Struct. 2008, 46, 602-617.
- [9] Erkmen, R.; Mohareb, M. “Buckling Analysis of Thin-walled Open Members - A Finite Element Formulation”; Thin-Walled Struct. 2008, 46, 618-636.
- [10] Kurniawan, C. W.; Mahendran, M. “Elastic Lateral Buckling of Simply Supported Limestone Beams Subject to Transverse Loading”; Thin-Walled Struct. 2009, 47, 109-119.
- [11] Taheri, A.; Shahsavari, E. “Time History Dynamic Analysis of a New Constructed Offshore Jacket Platform in Persian Gulf Due to Random Waves”; J. Marine Sci. App. 2019, 18, 372-379.
- [12] Kim, J. S.; Lee, S. H.; Kweon, H. D.; Oh, C. Y. “Optimal Finite Element Modeling Technique for Efficient Time History Seismic Dynamic Elastic-Plastic Analysis”; Trans. Korean Society of Mechanical Eng., A. 2018, 42, 23-28.
- [13] Zhang, H.; Xu, X. “Finite Element Analysis of Dynamic Behavior of CFRP Reinforced Concrete Frame”; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2019, pp. 042114.
- [14] Majidi, N.; Heidari, A. “Spectral Analysis of Structures Using Wavelet Theory and Concept of Time of Strong Ground Motion”; Amirkabir J. of Civil & Environ. Eng. (In Persian). 2019.
- [15] Heidari, A.; Majidi, N. “Earthquake Mapping Acceleration Analysis Using Wavelet Method”; Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019.
- [16] Wang, M.; Gao, L. “Dynamic Time-History Analyses of Ground Reinforced Concrete Tank in Water Supply System under Bi-

- [43] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures—an Overview"; *J. Loading Struct.* 2007, 131, 76-91.
- [44] Mills, C. "The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects"; *Proceedings 1st Int. Conf. Concrete for Hazard Protections*, Edinburgh, UK, 1987, pp. 61-73.
- [45] Hao, H.; Wu, C.; Li, Z.; Abdullah, A. "Numerical Analysis of Structural Progressive Collapse to Blast Loads"; *Trans. Tianjin University*, 2006, 31-34.
- [46] De Silva, C. W. "Vibration and Shock Handbook"; CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- [47] Acosta, P. F. "Overview of UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; D. Ames, T. L. Droessler, M. Hoit (Eds.) *Structures Congress, Structural Engineering Institute of American Society of Civil Engineers*, Las Vegas, Nevada, 2011, 1454-1469.
- [48] Dusenberry, D. O. "Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings"; John Wiley & Sons, 2010.
- [49] Macquorn Rankine, W. J. "On the Thermodynamic Theory of Waves of Finite Longitudinal Disturbance"; *Philosophical Trans. Royal Soc. London* 1870, 160, 277-288.
- [50] Lam, N.; Mendis, P.; Ngo, T. "Response Spectrum Solutions for Blast Loading"; *Electron. J. Struct. Eng.* 2004, 4, 28-44.
- [51] Chandler, A.; Pappin, J.; Coburn, A. "Vulnerability and seismic Risk Assessment of Buildings Following the 1989 Newcastle, Australia Earthquake"; *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* 1991, 24, 116-138.
- Subjected to Blast"; *Latin American J. Solids and Structures* 2018, 15, 1-26.
- [35] Khaledy, N.; Habibi, A. R.; Memarzadeh, P. "Minimum Weight and Drift Design of Steel Moment Frames Subjected to Blast"; *Int. J. Optimization in Civil Engineering* 2019, 9, 39-63.
- [36] Abdollahzadeh, G.; Faghihmaleki, H.; Avazeh, M. "Progressive Collapse Risk and Reliability of Buildings Encountering Limited Gas-Pipe Explosion after Moderate Earthquakes"; *SN Applied Sciences* 2020, 2, 1-13.
- [37] Hao, H.; Zhou, Y. "Rigid Structure Response Analysis to Seismic and Blast Induced Ground Motions"; *Procedia Engineering* 2011, 14, 946-955.
- [38] Abdollahzadeh, G.; Faghihmaleki, H. "Proposal of a Probabilistic Assessment of Structural Collapse Concomitantly Subject to Earthquake and Gas Explosion"; *Frontiers of Struct. Civil Eng.* 2018, 12, 425-437.
- [39] Abdollahzadeh, G.; Faghihmaleki, H. "Seismic-explosion Risk-based Robustness Index of Structures"; *Int. J. Damage Mechanics* 2017, 26, 523-540.
- [40] Abdollahzadeh, G.; Faghihmaleki, H. "Effect of Seismic Improvement Techniques on a Structure in Seismic-Explosive Probabilistic Two-Hazard Risk"; *Int. J. Struct. Eng.* 2016, 7, 314-331.
- [41] Faghihmaleki, H.; Nejati, F.; Mirzagoltabar-Roshan, A.; Batebi-Motlagh, Y. "An Evaluation of Multi-Hazard Risk Subjected to Blast and Earthquake Loads in RC Moment Frame with Shear Wall"; *J. Eng. Sci. Technol.* 2017, 12, 636-647.
- [42] Baker, J. F.; Williams, E. L.; Lax, D. "The Design of Framed Buildings Against High-Explosive Bombs"; *Civil Engineer in War: A Symposium of Papers on War-Time Engineering Problems*, Thomas Telford Ltd, 1948, 80-112.