

## مطالعه و مقایسه بار انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک و تأثیر میرایی و ارتفاع سازه

امیرحسین صدیقی<sup>۱</sup>، قاسم دهقانی اشکذری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴، انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.5.9>

### چکیده

انفجار مدفون از این لحاظ که اثرات آن از طریق زمین به پی سازه‌های سطحی و روزمینی وارد می‌شود مشابه زلزله است؛ ولی محتوای فرکانسی حرکت زمین در اثر انفجار متفاوت با زلزله است. از آنجاکه انرژی انفجار به‌صورت ناگهانی به مقدار زیاد در مدت‌زمان بسیار کوتاه آزاد می‌شود، انتظار می‌رود که فرکانس‌های غالب حرکت زمین در اثر انفجار مدفون نسبت به زلزله، حتی نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک، در سطوح بالاتری قرار داشته باشد. جهت بررسی این موضوع، در این تحقیق انفجار دو مقدار مختلف ماده منفجره TNT در دو عمق متفاوت از محیط نیمه بی‌نهایت دو نوع زمین سخت و نرم به روش عددی اجزای محدود شبیه‌سازی و تاریخچه زمانی مؤلفه‌های حرکت میدان آزاد سطح زمین ناشی از این هشت حالت انفجار استخراج و سپس با به‌دست‌آوردن طیف‌های پاسخ سازه‌ای مربوطه، با هم مقایسه شده‌اند. همچنین با در نظر گرفتن دو زلزله حوزه نزدیک، شامل زلزله‌های LANDERS و CHRISTCHURCH و استخراج طیف‌های پاسخ سازه‌ای مربوط به آن‌ها، بین حرکات ناشی از انفجارها و زلزله‌های حوزه نزدیک فوق‌الذکر نیز مقایسه صورت پذیرفته است. سپس با تحلیل تاریخچه زمانی نمونه‌های سازه‌ای یک و پنج طبقه با میرایی‌های یک، پنج و ده درصد تحت شتاب‌های زمین ناشی از انفجارها و زلزله‌های مذکور، تأثیرات تغییر ارتفاع و میرایی سازه بر پاسخ سازه‌ای و تفاوت این تأثیرات در زلزله و انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی و شتاب میدان آزاد و طیف پاسخ جابه‌جایی سازه ناشی از انفجار در خاک سخت بسیار بزرگ‌تر از مقادیر مربوط به خاک نرم است. همچنین بار انفجار مدفون حالت ضربه‌ای بسیار شدیدتری به نسبت زلزله حوزه نزدیک دارد و انرژی اصلی بار انفجار در سیکل اول وارد می‌شود. به‌علاوه، سازه در مواجهه با بار انفجار مدفون با یک پاسخ ضربه‌ای شدید و بسیار کوتاه‌مدت مواجه و بعد از آن وارد مرحله ارتعاش آزاد می‌شود، اما در برابر بار زلزله حوزه نزدیک به نسبت بار انفجار مدفون دارای سیکل‌های ارتعاشی بیشتر و پربندهای بزرگ‌تر ارتعاش است.

**کلیدواژه‌ها:** انفجار مدفون، زلزله حوزه نزدیک، تحلیل تاریخچه زمانی، میرایی، آباکوس

## Study of Buried Blast Load Compared with Near-field Earthquake & Effect of Damping & Structural Height

A. H. Sedighi, G. Dehghani Ashkezari \* 

Malek Ashtar University of Technology

((Received: 2023/08/29, Revised: 2023/11/02, Accepted: 2023/11/25, Published: 2023/12/04))

### Abstract

The blast load is an impact load with a short duration and a very high maximum pressure, so it is predictable that the dominant frequencies of ground motion (that released from buried blast) will be at high levels. For consideration of buried blast load, we simulated these phenomena with different amounts of TNT explosion and depths from the semi-infinite environment of two types of hard and soft with Abaqus software, we also recorded time history parameters of blast in free field. For consideration of near-field earthquake loading we used accelerogram records of some earthquakes. By taking the acceleration records of explosive models and having record of earthquakes and obtaining the structural response spectrum a comparison between different models of buried blast and near-field earthquake records has been made. Then, by time history analysis of the one & five-story structural models with different percents damping achieved of blast and earthquake records, the structural responses have been studied and compared considering the height and damping parameters.

**Keywords:** Buried Blast, Near-Field Earthquake, Time History Analysis, Damping, Abaqus

## ۱. مقدمه

نشده، میرایی و شدت بار انفجاری بر روی تونل‌ها پرداخته است و نتایج مدل‌سازی نشان داده که شدت انفجار از عوامل مؤثر بر افزایش تنش وارد بر تونل بوده و میرایی خاک تأثیر چندانی بر تنش‌ها نخواهد داشت. ناگی و همکارانش [۵ و ۶] به بررسی تأثیر عمق قرارگیری ماده منفجره در انفجار مدفون و همچنین تأثیر انفجار سطحی بر روی سازه‌های مدفون پرداختند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق انفجار که باعث کاهش فاصله ماده منفجره تا سازه مدفون نیز خواهد شد تنش‌های به‌مراتب بزرگ‌تری روی المان‌های سازه‌ای اتفاق خواهد افتاد. ونگ و لو [۷] خاک نزدیک محل انفجار را با استفاده از روش  $SPH^1$  و سازه و خاک دور از محل انفجار را با روش اجزاء محدود مدل‌سازی نموده و نشان دادند که نتایج مدل‌سازی دوبعدی دارای دقت مناسبی است؛ اما نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی دقت بیشتری دارد.

مطالعاتی نیز در خصوص مقایسه بارهای انفجار و زلزله در سال‌های اخیر صورت گرفته است که من جمله می‌توان به مقایسه انجام‌شده توسط هایس [۸] اشاره نمود که در این تحقیق به پشتیبانی آژانس مدیریت فدرال آمریکا، ساختمان فدرال آمریکا که در بمب‌گذاری سال ۱۹۹۵ صدمه دید مورد مطالعه قرار گرفت و با بررسی طرح‌های مختلف، تأثیر چند سیستم باربر جانبی بررسی شد و نهایتاً تقویت المان‌های محیط سازه پیشنهاد شد. توسط آلمان و همکارانش [۹] اختلاف‌های طیفی انفجار داخل سنگ و زلزله در جنوب آمریکا مورد بررسی قرار گرفت، در این تحقیق طیف امواج S و P حاصل از انفجار داخل سنگ و زلزله‌های ثبت‌شده در جنوب کالیفرنیا در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ بررسی شده‌اند و دامنه و محتوای امواج مقایسه شده‌اند.

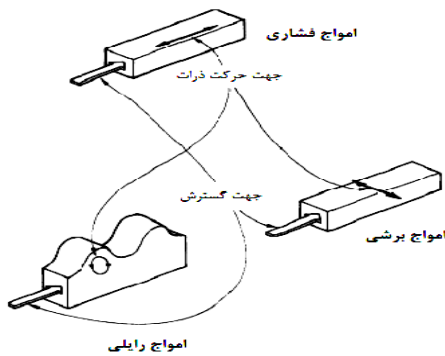
همچنین تقوی پارسا و گراوند [۱۰] اثر تخریبی انفجار در فواصل مختلف بر دیوار حائل بتنی را بررسی نمودند که در این پژوهش اثرات تخریبی انفجار بر دیوار حائل بتن آرمه و بتن بی‌افی و مقدار ماده منفجره برای تخریب در مواضع متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. پیمان و ابراهیم‌زاده [۱۱] تأثیر هندسه بر میزان جذب انرژی هیئت‌رئیس‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری را بررسی عددی نمودند و نتیجه گرفتند وابسته به میزان فشار انفجار، پانل ساندویچی با هندسه خاص می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد. حسینی و همکارانش [۱۲] پاسخ و سختی دال دوطرفه بتن مسلح در برابر انفجار را به کمک روش الگوریتم ژنتیک ارزیابی نمودند و نشان دادند که عرض و طول دال بیشترین تأثیر و متغیر سطح مقطع فولاد کمترین تأثیر را در زمان

پژوهش‌های انجام‌گرفته مرتبط با انفجار مدفون را می‌توان به سه دسته: پژوهش‌های آزمایشگاهی، پژوهش‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی دسته‌بندی نمود؛ با توجه به اینکه آزمایش‌های مربوط به پدیده انفجار مستلزم صرف هزینه‌های زیادی هستند و نیازمند امکانات و تجهیزات خاصی هستند، در این زمینه مطالعات آزمایشگاهی کمتری صورت گرفته است. چند مورد از این پژوهش‌ها را مرور می‌نماییم؛ اهنو [۱] تعدادی آزمایش در مقیاس کوچک انجام داد در این آزمایش‌ها اثر ضخامت خاک در گسترش موج انفجار مدفون و فشار وارد بر سازه زیرزمینی بررسی شده‌اند. دی و همکارانش [۲] به وسیله آزمایش‌هایی که با دستگاه سانتریفیوژ انجام دادند نتایج انفجار سطحی بر سازه‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی نمودند، آن‌ها در آزمایش‌های انجام‌شده اثر ضخامت خاک را بر نتایج بررسی نمودند و در یکی از آزمایش‌ها از خاک مخلوط با فوم استفاده نمودند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت خاک فشار ناشی از انفجار کاهش می‌یابد همچنین خاک مخلوط شده با فوم اثر کاهندگی قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج انفجار دارد.

انجام پژوهش‌های میدانی در زمینه اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی علاوه بر صرف هزینه‌های زیاد، عوارض دیگری چون آلودگی‌های زیست‌محیطی را نیز به دنبال دارد که انجام آن‌ها را با محدودیت‌هایی روبه‌رو نموده است. پژوهش‌های میدانی انجام‌گرفته در این زمینه محدود است و از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های انجام‌شده توسط ایشیکاوا [۳] برای بررسی رفتار سه نوع تونل مستقیم، شاخه‌ای و شبکه‌ای انجام گرفته بود اشاره نمود، وی نتایج فشار به دست آمده در فواصل مختلف را بررسی نموده و نشان داد با افزایش فاصله، فشار در طول تونل کاهش دارد. به علت محدودیت‌های زیاد انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی، شبیه‌سازی‌های عددی مناسب‌ترین گزینه مورد پذیرش هستند؛ از طرفی دیگر به علت آنکه پروسه فیزیکی انفجار و انتشار امواج ناشی از آن خیلی پیچیده هست، شبیه‌سازی کامل و صحیح این پدیده نیازمند مدل‌های پیچیده و صحیح برای بررسی بارگذاری و پاسخ‌های مواد است.

روند شبیه‌سازی پروسه انفجار و اثر آن بر روی سازه‌ها را می‌توان به مراحل پروسه انفجار، شکل‌گیری گودال آن، انتشار امواج ناشی از انفجار و پاسخ سازه تقسیم نمود؛ از پژوهش‌های انجام‌شده به روش شبیه‌سازی می‌توان به مطالعات گویی [۴] اشاره نمود، گویی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC به مطالعه تأثیر ویژگی‌های خاک شامل سختی دینامیکی، مقاومت برشی زهکشی

<sup>1</sup>Smoothed Particle Hydrodynamics



شکل ۱. حرکت ذرات و امواج فشاری، برشی و رابلی [۱۴]

سرعت انتشار هر دو موج سطحی و حجمی بستگی به چگالی و سختی خاک دارد. سرعت امواج رابلی را که موجب حرکت اعوجاجی در خاک می‌شود از رابطه (۱) می‌توان بر اساس  $G$  مدول برشی و  $\rho$  دانسیته خاک به دست آورد.

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

مقادیر  $E$ ،  $G$  و  $\nu$  برای انواع مختلف خاک در مراجع مختلف آورده شده که به وسیله آزمایش‌های میدانی نیز قابل برآورد هستند، با توجه به مشخصات خاک مقادیر سرعت لرزه‌ای کمتر از ۲۰۰ متر بر ثانیه برای ماسه‌های سست و خشک و مقادیر بالاتر از ۱۵۰۰ متر بر ثانیه برای رس اشباع و سنگ قابل تغییر هست [۱۴].

## ۲-۲. پیشگویی شوک زمین به وسیله آئین نامه TM-5-855

تنش و پالس سرعت ذرات را می‌توان با تاریخچه زمانی به صورت تابع‌نمایی مشخص نمود، این تابع در گسترش به سمت دور از منبع انفجار با سرعت در دامنه میرا می‌شود.  $t_a$ ، زمان سپری شده از منبع انفجار تا رسیدن شوک زمین به نقطه مورد نظر است.

$$t_a = R/C \quad (2)$$

در رابطه بالا  $R$  فاصله از منبع انفجار و  $C$  میانگین سرعت لرزه‌ای یا سرعت انتشار موج در مسافت طی شده است. از آنجاکه مشخصه زمان رسیدن رابطه معکوس با سرعت لرزه‌ای دارد، انفجار در محیط با سرعت بالا پریرود زمانی بسیار کوتاه و پالس‌های فرکانس بالا به همراه شتاب بالا و جابه‌جایی کم دارند. از طرف دیگر، انفجار در محیط خشک و سست، حرکت‌های زمین با دوره تناوب بیشتر و فرکانس پایین‌تری تولید می‌نماید. بیشینه سرعت و تنش ذرات با رابطه زیر باهم مرتبط هستند:

$$P_0 = \rho c V_0 \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  چگالی جرمی است، تنش ناشی از انفجار در لایه‌های اطراف یا در خاک اطراف سازه به وسیله روابط زیر به دست می‌آید:

$$P_0 = f * (\rho c) * 160 * (R/W^{1/3})^{-n} \quad (4)$$

رسیدن به خیز حداکثر دال دارد. در مطالعه‌ای دیگر حسینی و الموتی [۱۳] خیز تیرهای بتن مسلح را تحت بار انفجار با تحلیل پارامتریک بررسی نمودند و مشخص شد که دقت روش پیشنهادی در محاسبه خیز تیرها، بالای ۹۰٪ است.

هدف از این تحقیق، مقایسه حرکت زمین در اثر انفجار مدفون و زلزله نزدیک گسل، بررسی تأثیر پارامترهای نوع خاک، مقدار ماده منفجره و عمق انفجار در تحریکات بار انفجاری و نیز تأثیر برخی مشخصات سازه، شامل میرایی و فرکانس طبیعی سازه، بر پاسخ سازه تحت بار انفجار است؛ برای بررسی فرکانس طبیعی سازه، ارتفاع سازه تحت مطالعه قرار گرفته است به این صورت که برای سازه دو مدل یک طبقه و پنج طبقه در نظر گرفته شده است. یکی از روش‌های در نظر گرفتن پدافند غیرعامل، مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در برابر بارگذاری انفجار و طراحی سازه‌های جدید با در نظر گرفتن اصول طراحی مقاوم در برابر انفجار است. بررسی بار وارده در اثر بارهای ضربه‌ای انفجار و زلزله‌های حوزه نزدیک، اولین قدم در راستای بررسی رفتار سازه در برابر این بارها بوده و به جهت لزوم در نظر گرفتن این نیروها در سازه شناخت کامل آن‌ها جهت طراحی و مدل‌سازی سازه ضرورت دارد. ضمناً به جهت بهینه نمودن طراحی‌ها، شناخت عوامل تأثیرگذار بر رفتار سازه در این بارگذاری‌ها مانند ارتفاع سازه و میرایی سازه ضروری است.

## ۲. ادبیات فنی انفجار

### ۱-۲. انتشار موج انفجار در خاک

وقوع انفجار در عمق یا سطح زمین باعث پدید آمدن هر دو نوع موج سطحی و حجمی خواهد شد، مؤلفه هم‌راستای شوک انفجار به علت حرکت ذرات در راستای انتشار موج، منجر به تولید تنش فشاری و اتساع ذرات خاک یا سنگ خواهند شد؛ این موج، موج فشاری یا  $P$  نامیده می‌شود. مؤلفه انحرافی پالس تنش به علت عمود بودن سرعت ذرات به جهت انتشار موج منجر به تولید اعوجاج و یا برش در ذرات خواهد شد، این موج با نام موج برشی یا  $S$  شناخته می‌شود. در نزدیکی سطح زمین ذرات حرکت دایروی به خود می‌گیرند؛ مانند مواجه شدن شناگر با امواج در سطح دریا، این موج با عنوان موج رابلی  $R$  شناخته شده‌اند (شکل ۱). به‌طور کلی می‌توان این‌طور گفت که برای انفجار مدفون در محدوده نزدیک مرکز انفجار، امواج  $P$  و  $S$  غالب می‌شوند و امواج  $R$  در انفجار سطحی به علت سرعت کمتر میرایی و در محدوده دور انفجار مدفون غالب خواهد شد [۱۴].

که در آن  $R_2, R_1, B, A$  و  $\omega$  ثابت‌های ماده می‌باشند و  $\rho_0$  دانسیته ماده منفجره و  $P$  دانسیته فرآیند انفجار است که در جدول (۲) آورده شده‌اند [۱۶].

**جدول ۲.** پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT [۱۶ و ۶]

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
دانسیته $\rho_0$	Kg/m <sup>3</sup>	۱۶۳۰	A	Gpa	۳۷۳٫۸
سرعت موج انفجار $C_d$	m/s	۶۹۳۰	B	Gpa	۳٫۷۴۷
انرژی درونی $E_{m_0}$	MJ/kg	۳٫۶۸۱	$R_1$		۴٫۱۵
انرژی بر واحد حجم	Mpa	۶	$R_2$		۰٫۹
فشار	Gpa	۲۱	$\omega$		۰٫۳۵

### ۳-۲. هیدرودینامیک ذرات هموار SPH<sup>۲</sup>

هیدرودینامیک ذرات هموار روشی عددی است که بخشی از خانواده بزرگ‌تر روش بدون شبکه‌بندی است، برای این روش احتیاج به گره‌ها و المان‌هایی که معمولاً در روش تجزیه و تحلیل المان محدود تعریف می‌نمایند ندارید، در عوض مجموعه‌ای از نقاط جهت‌نمایش دادن بدنه احتیاج هست. هیدرودینامیک ذرات هموار یک طرح کاملاً لاگرانژی مدل شده است که اجازه گسسته شدن از یک مجموعه از معادلات پیوستگی را به مجموعه‌ای گسسته از نقاط که بیش از محدوده تعیین شده برای حل مسئله توزیع شده‌اند به وسیله الحاق مستقیم خواص و بدون نیاز به تعریف یک مش فضایی می‌دهد.

با استفاده از این روش در نرم‌افزار آباکوس می‌توان از هر یک از متریکال‌های موجود در آباکوس صریح<sup>۳</sup> استفاده نمود. می‌توان شرایط اولیه و شرایط مرزی برای هر مدل لاگرانژی دیگر را مشخص نمایید و فعل و انفعالات تماس با سایر اجسام لاگرانژی نیز قابل بررسی هست؛ در این تحقیق جهت کنترل اعوجاج ماده منفجره از روش SPH استفاده شده است [۱۶].

### ۳-۳. المان‌های مرزی نامحدود

جهت جلوگیری از بازگشت امواج از مرزهای مدل از المان نیمه بی‌نهایت استفاده خواهد شد با به کار بردن این المان دیگر احتیاجی به استفاده از مرزهای مصنوعی در مرزهای حوزه نزدیک نخواهد بود. در المان‌های بی‌نهایت ایده کلی بر این است که در آن‌ها از مصالحی استفاده شده که در نقاط انتهایی تا بی‌نهایت کشیده شده‌اند و در بی‌نهایت تغییر شکل آن‌ها صفر خواهد بود. معمولاً در مرزها از ترکیب المان محدود با المان‌های بی‌نهایت و نیمه

که در رابطه بالا  $P_0$  بیشینه فشار برحسب psi،  $f$  ضریب تأثیر عمق،  $\rho c$  امپدانس صوتی برحسب psi/fps،  $R$  فاصله تا منبع انفجار برحسب ft،  $W$  وزن ماده منفجره برحسب lb و  $n$  ضریب کاهش است و برای انواع زمین از جدول (5-2) TM5-855-1 قابل استخراج است [۱۵].

جزئیات پارامترهای خاک که در مواجهه با برنامه‌های تست انفجار به دست آمده‌اند و برای زمین‌های مختلف در جداول آئین-نامه 1-5-855-TM ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه دو نوع زمین سخت و نرم در نظر گرفته طوری انتخاب شده‌اند که در محدوده زمین تیپ I و زمین تیپ IV آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران قرار بگیرند پارامترهای مربوطه در جدول (۱) آورده شده‌اند.

### جدول ۱. پارامترهای خاک برای تست انفجار [۱۵]

ضریب کاهش $n$	امپدانس صوتی $\rho c$ (psi/fps)	سرعت لرزه‌ای $c$ (ft/s)	حفرات هوا %	وزن واحد خشک $\gamma_{dry}$ (pcf)	وزن واحد $\gamma$ (pcf)
۳	۱۲٫۵-۱۵	۵۰۰-۶۰۰	۱۰	۹۷	۱۱۶
۱٫۵	۱۳٫۵	>۵۰۰	۰	-	۱۲۰-۱۳۰

دو عامل اصلی در تعیین قدرت انفجار، جرم ماده منفجره ( $W$ ) و فاصله ماده منفجره از محل مورد بررسی ( $R$ ) هستند. جهت تعیین قدرت انفجار انجام شده با در نظر گرفتن هر دو عامل فوق از پارامتری با عنوان فاصله مقیاس شده ( $Z$ ) استفاده می‌شود که اکثر روابط و نمودارهای آئین‌نامه‌ها و مراجع بر اساس این پارامتر است [۱۵].

$$Z = R / W^{1/3} \quad (۵)$$

### ۳. مدل سازی عددی انفجار

#### ۳-۱-۱. رفتار TNT

در این مطالعه از معادله حالت JWL<sup>۱</sup> جهت تعریف رفتار ماده منفجره استفاده خواهد شد. معادله حالت JWL فشار تولید شده در یک ماده منفجره در اثر آزاد شدن انرژی شیمیایی را معرفی می‌نماید. این مدل به عنوان یک احتراق برنامه‌ریزی شده در نظر گرفته می‌شود و این بدان معنا است که واکنش و آغاز انفجار به وسیله شوک در ماده تعیین کننده نیست و در عوض زمان آغاز انفجار به وسیله یک ساختار هندسی تعیین شده با استفاده از سرعت موج انفجار و فاصله نقاط محیط از نقطه انفجار تعیین می‌شود.

فرم عمومی این معادله به صورت زیر است:

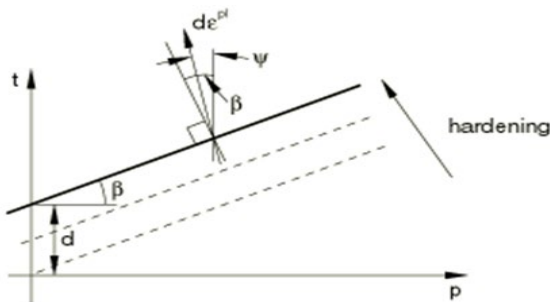
$$P = A \left( 1 - \frac{\omega P}{R_1 P_0} \right) \exp(-R_1 \frac{P_0}{\rho}) + B \left( 1 - \frac{\omega P}{R_2 P_0} \right) \exp(-R_2 \frac{P_0}{\rho}) + \omega P E_m \quad (۶)$$

<sup>۲</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

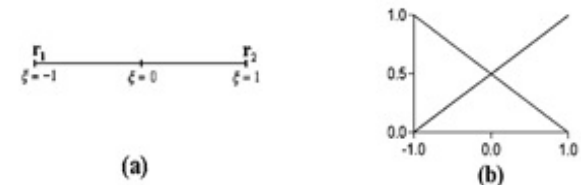
<sup>۳</sup> Abaqus Explicit

<sup>۱</sup> Jones-Wilkens-Lee

بی‌نهایت در این تحلیل‌ها بهره برده می‌شود؛ حوزه‌های نامحدود در معادلات انتگرال بر اساس توابع گرین قابل در نظر گرفتن هستند ابتدا این‌گونه در نظر گرفته می‌شود که عناصر مرزی بی‌نهایت مورد نظر برای مسائل دوبعدی ارائه خواهند شد و به جهت ساده‌سازی ابعاد مکانی مسئله به یک کاهش داده می‌شود (شکل ۲) [۱۷].



شکل ۳. سطح تسلیم و سخت‌شوندگی در مدل دراگر-پراگر [۱۶]



شکل ۲. المان خطی در نظر گرفته‌شده (a) هندسه المان (b) توابع شکل

### ۴-۳. رفتار خاک

لحظه عبور از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک به‌عنوان معیار تسلیم شناخته می‌شود، تعیین دقیق این پارامتر برای خاک‌ها نیازمند مطالعه‌های آزمایشگاهی است. مدل دراگر-پراگر رفتار

جدول ۳. خصوصیت‌های زمین نرم و زمین سخت [۱۵-۱۸]

رفتار سخت‌شوندگی		قابلیت نفوذ k	زاویه اتساع $\psi^\circ$	زاویه اصطکاک داخلی $\phi^\circ$	دانسیته $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت پواسون $\nu$	مدول الاستیسیته E (N/m <sup>2</sup> )	نوع زمین
کرنش پلاستیک	تنش (N/m <sup>2</sup> )							
۰	۲۷۴۹۸۲۰	۱	۰	۲۴	۱۹۲۰	۰٫۴۵	۵۱۶۹۶۶۰۰	نرم
۰٫۰۲	۴۸۲۹۶۸۰							
۰٫۰۴	۵۱۴۹۶۶۰							
۰٫۰۸	۶۱۹۹۵۹۰							
۰	۶۲۰۴۸۷۴	۰٫۸	۴۰	۴۵	۲۲۵۰	۰٫۲۲	۹۱۰۰۴۷۶۳۹۲	سخت
۰٫۰۰۳	۹۱۰۰۴۷۸							
۰٫۰۰۶	۱۱۰۳۰۸۷۷							
۰٫۰۰۹	۱۳۰۹۹۱۶۹							
۰٫۰۱۸	۱۳۷۸۸۵۹۹							
۰٫۰۳۵	۱۴۸۲۲۷۴۹							
۰٫۰۵	۱۵۳۰۵۳۴۲							

پالس‌گونه (ضربه‌ای) بوده و منجر به ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ و ناگهانی خواهد بود [۱۹].

### ۴-۱. اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده

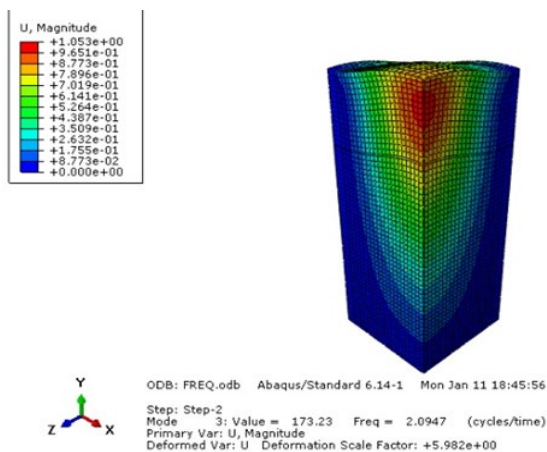
اگر گسیختگی گسل به سمت ساختگاه گسترش یافته و جهت لغزش گسل نیز به سمت آن باشد پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده اتفاق می‌افتد؛ اگر جبهه گسیختگی از کانون به سمت ساختگاه انتشار یابد به دلیل نزدیک بودن سرعت گسیختگی گسل به سرعت امواج برشی زلزله، امواج آزادشده در اثر لغزش‌های متوالی نواحی مختلف گسل در نزدیکی جبهه گسلش (جلوی مسیر گسیختگی)

### ۴. زلزله حوزه نزدیک

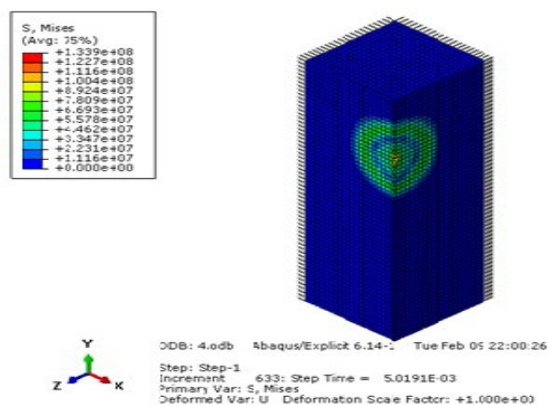
رکوردهای زلزله‌های گذشته نشان‌دهنده تفاوت ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور است. علت اصلی این تفاوت ویژگی‌ها ناشی از پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده است که در زلزله‌های حوزه نزدیک به وجود می‌آید. در نتیجه پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده، مؤلفه عمود بر رکوردهای به‌دست‌آمده در نزدیک گسل دارای پالس‌های با پریود بلند در نگاشت سرعت خواهند بود و در اکثر موارد کل انرژی زلزله در این پالس‌ها جمع می‌شود و به‌این ترتیب ورود انرژی به سازه به‌صورت

## ۵. مدل‌سازی انفجار مدفون با نرم‌افزار آباکوس

در این تحقیق انفجار مدفون محیط زمین به کمک المان‌های نیمه بی‌نهایت مدل‌سازی شده و فرایند انفجار نیز به صورت کامل به وسیله روابط JWL مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به وجود دو مقدار متفاوت TNT در دو عمق متفاوت و در دو نوع زمین نرم و زمین سخت، هشت مدل مختلف جهت شبیه‌سازی انفجار ماده منفجره داخل محیط زمین ساخته خواهد شد. مدل زمین محل انفجار به عمق ۶۰ متر و سطح مربع به ابعاد ۴۰ متر ساخته شده است؛ اما با توجه به اختصاص المان نیمه بی‌نهایت به تکیه‌گاه‌ها می‌توان گفت ابعاد تأییری نخواهند داشت، جهت در نظر گرفتن حالت واقعی محیط خاکی، سنگ‌بستر در عمق ۶۰ متری فرض شده و به تکیه‌گاه زیرین مدل المان نیمه بی‌نهایت اختصاص داده نشده است. نقطه مرکز سطح سازه در شعاع ۱۰ متری از مرکز سطح افقی انفجار روی سطح زمین در نظر گرفته شده است و به جهت اختصاص دادن المان مرزی نیمه بی‌نهایت در سطوح مربوطه ۲ متر به بعد آن‌ها اضافه خواهد شد.



شکل ۴. نتیجه مود سوم آنالیز مودال برای یکی از مدل‌های انفجار



شکل ۵. نمایش توزیع تنش از منبع انفجار در یکی از نمونه‌های مدل انفجار

به صورت سیلی از امواج در حرکت، جمع می‌شوند. این امواج دفعاً و به صورت یک شوک قوی به ساختمان می‌رسند، که این شوک به شکل یک پالس قوی حرکت در جهت عمود بر لغزش و در ابتدای نداشت زلزله قابل تشخیص است، بنابراین مدت دوام کم و پالس‌هایی با دامنه بزرگ و پریودهای متوسط تا بلند می‌تواند از مشخصه‌های شرایط جهت‌پذیری پیش‌رونده باشد؛ پدیده جهت‌پذیری هم در گسل‌های امتداد لغز و هم در گسل‌های شیب لغز اتفاق می‌افتد. در مکانیزم گسلش امتداد لغز به علت پراکنش شعاعی تغییر مکان برشی روی آن، پالس حرکت عمود بر جهت لغزش است و در گسلش شیب لغز نیز شرایط جهت‌پذیری پیش‌رونده برای ایستگاه‌هایی که در قسمت فوقانی صفحه گسلش قرار دارند، مهیا می‌گردد [۱۹]. به طور کلی در صورتی که گسیختگی گسل به سمت ساختمان باشد یا زاویه بین امتداد انتشار گسیختگی و ساختمان کوچک باشد و یا سرعت گسیختگی گسل نزدیک سرعت موج برشی ساختمان باشد منجر به اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده می‌شود؛ اثر جهت‌پذیری می‌تواند توزیع انرژی در زمان (دانشیته ویژه انرژی) را تغییر دهد؛ بنابراین این دانشیته از پارامترهای تشخیص زلزله‌های متأثر از جهت‌پذیری است [۲۰].

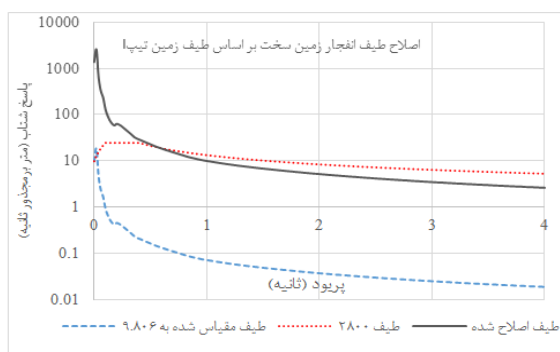
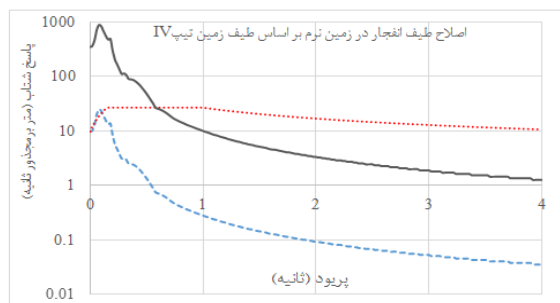
## ۴-۲. اثر تغییر مکان ماندگار

خصوصیت‌های دیگر نداشت‌های حوزه نزدیک ثبت شده در زلزله‌های جدید مانند زلزله‌های سال ۱۹۹۹ ترکیه و تایوان، تغییر مکان ماندگار حاصل از گسلش زمین در مناطق نزدیک گسل است که در بازه زمانی چندثانیه‌ای لغزش و در جهت لغزش گسل اتفاق افتاده و مستقل از تغییر مکان دینامیکی ناشی از پالس جهت‌پذیری گسیختگی زمین است؛ این اثر مؤلفه‌هایی که در جهت لغزش گسل هستند را تحت تأثیر قرار خواهد داد برای زلزله‌های شیب لغز، اثر تغییر مکان ماندگار و اثر جهت‌پذیری در یک جهت صورت می‌گیرد و تغییر مکان ماندگار زمین تقریباً هم‌زمان با تغییر مکان دینامیکی حداکثر رخ می‌دهد، که نیاز است به عنوان بارهای منطبق برهم در نظر گرفته شود. این تلاقی بارها در یک‌زمان، پتانسیل آسیب بسیار گسترده‌ای را دارا است به طور نمونه، تغییر مکان ماندگاری در حدود ۲ متر در ایستگاه یاریمکا طی زلزله کجایی به وجود آمد [۱۹].

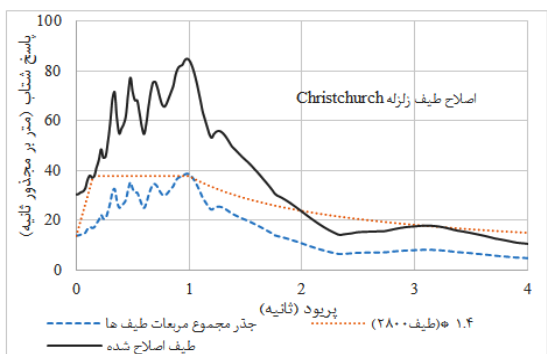
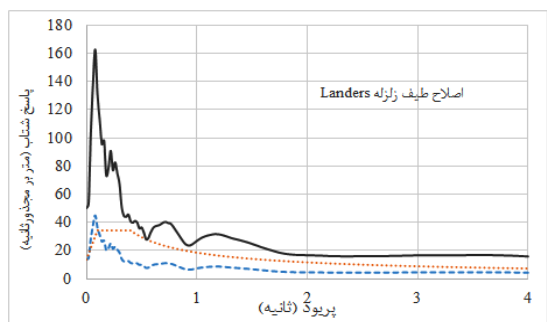
رفتار زلزله حوزه نزدیک شباهت بیشتری به رفتار لرزه‌های ناشی از انفجار مدفون خواهد داشت. جهت بررسی محتوای فرکانسی زلزله حوزه نزدیک و اعمال رکود شتاب‌نگاشت این زلزله به مدل سازه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از زلزله‌های گذشته که در سایت PEER STRONG GROUND MOTION DATABASE جمع‌آوری شده‌اند استفاده شده است [۲۱].

### ۷- هم‌پایه‌سازی طیف‌ها با طیف آئین‌نامه ۲۸۰۰ [۲۲]

برای اصلاح طیف زلزله‌ها، به دلیل وجود دو مؤلفه در راستای افقی برای هر زلزله، از روش جذرمجموع‌مربعات برای ترکیب طیف‌ها استفاده شده و مقادیر به‌دست‌آمده با ۱/۴ برابر مقادیر طیف آئین‌نامه ۲۸۰۰ مقایسه خواهند شد. اما به علت تقارن شرایط، رکورد-های انفجار در هر دو جهت مطابقت دارند و برای طیف انفجار نیازی به ترکیب طیف‌ها نبوده است (شکل ۶ و ۷).



شکل ۶. اصلاح طیف‌های انفجار با طیف آئین‌نامه ۲۸۰۰



شکل ۷. اصلاح طیف زلزله‌ها با طیف آئین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله

باتوجه‌به انتخاب مقادیر ۱۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم برای ماده منفجره و داشتن دانسیته ۱۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای ماده منفجره TNT ابعاد قطعات موردنیاز قابل‌محاسبه است.

در نرم‌افزار آباکوس خروجی آنالیز مودال به‌صورت مقادیر ویژه و برابر با  $\omega^2$  است؛ پس از انجام آنالیز مودال با انجام تحلیل دینامیکی صریح، تاریخچه زمانی شتاب و تغییر مکان در میدان آزاد، از نقطه معرفی‌شده به‌عنوان مرکز سازه جهت انجام بررسی‌های لازم برداشت شده است (شکل ۴ و ۵).

### ۶- انتخاب رکوردهای مناسب زلزله حوزه نزدیک و انفجار مدفون جهت اعمال به سازه

باهدف مشاهده اثر بیشترین اختلاف بین بارگذاری‌های انفجاری، به علت مشاهده تنش‌های تولیدشده بزرگ‌تر در میدان آزاد مدل انفجاری در زمین سخت (تیپ I) نسبت به زمین نرم (تیپ IV)، انفجار زمین تیپ I با مینیمم عمق انفجار و ماکزیمم مقدار ماده منفجره یعنی انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری و انفجار زمین تیپ IV با حداکثر عمق انفجار و حداقل مقدار ماده منفجره یعنی ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۵۰ متری جهت تحلیل دینامیکی سازه انتخاب‌شده و رکوردهای موردنظر قبل از اعمال به سازه مقیاس‌سازی خواهند شد. به‌منظور دخیل نمودن تأثیر نوع زمین بر روی پاسخ‌های سازه در بارگذاری زلزله، دو شتاب‌نگاشت یکی از زمین تیپ I و دیگری از زمین تیپ IV جهت تحلیل دینامیکی سازه انتخاب خواهند شد.

جهت بررسی زلزله از رکوردهای ثبت‌شده در سایت PEER STRONG استفاده‌شده است؛ با مشاهده زلزله‌های رخ داده و منطبق با شرایط موردنظر، اطلاعات شش زلزله یعنی سه زلزله حوزه نزدیک رخ داده در زمین نوع I و سه زلزله حوزه نزدیک رخ داده در زمین نوع IV جهت بررسی اولیه برداشت‌شده است که در جدول (۴) آورده شده‌اند؛ با بررسی محتوای فرکانسی طیف پاسخ زلزله‌ها، نهایتاً زلزله Landers برای بررسی زلزله در زمین سخت تیپ I و زلزله Christchurch Newzeland برای بررسی زلزله در زمین نرم تیپ IV انتخاب‌شده‌اند.

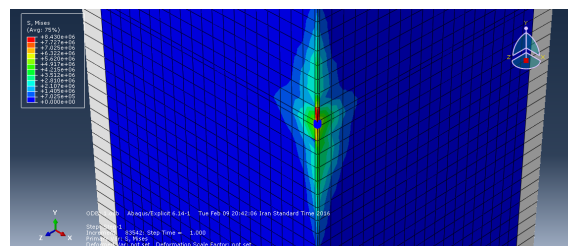
جدول ۴. اطلاعات زلزله‌های برداشت‌شده از سایت PEERSTRONG

Vs (m/sec)	5-95% (sec)	R-jb (km)	Year	Earthquake
۹۰۶	۸/۸	۴/۶۶	۲۰۰۴	Parkfield-02-CA
۸۱۱	۱۵/۱	۳/۶۲	۱۹۹۹	Kocaeli-Turkey
۱۳۶۹	۷/۲۸	۲/۱۹	۱۹۹۲	Landers
۱۳۹	۱۸/۵	۶/۸۶	۲۰۰۰	Tottori-Japan
۱۷۳	۷/۰	۱/۶۱	۲۰۰۴	Parkfield-Cholame 2WA
۱۴۱	۱۱/۵	۵/۱۱	۲۰۱۱	Christchurch-Newzeland

### ۸. صحت‌سنجی نرم‌افزارهای استفاده‌شده

#### ۸-۱. صحت‌سنجی شبیه‌سازی انفجار

به‌منظور صحت‌سنجی مقادیر عددی مدل‌های انفجار ارائه‌شده، بیشینه فشار به‌دست‌آمده از انفجار در نقطه‌ای به فاصله عمق دفن ماده منفجره برداشت‌شده و با مقادیر به‌دست‌آمده از روابط آئین-1-855-5 TM مقایسه شده است [۱۵].



شکل ۸. توزیع تنش از منبع انفجار در یکی از نمونه‌های مدل انفجار

مقادیر بیشینه فشار به‌دست‌آمده از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار آباکوس (شکل ۸) و همچنین مقادیر به‌دست‌آمده از روابط آئین‌نامه در جدول (۵-الف و ب)، برای هریک از زمین‌های نوع I و IV آورده شده‌اند، در هر دو جدول مدل‌ها بر اساس فاصله مقیاس شده مرتب شده‌اند با بررسی جداول محرز است که با افزایش فاصله مقیاس شده در هر دو نوع زمین اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده از نرم‌افزار و آئین‌نامه کاهش یافته است، و یا می‌توان این‌گونه گفت که با کاهش فاصله مقیاس شده درصد خطای نرم-افزار افزایش یافته است.

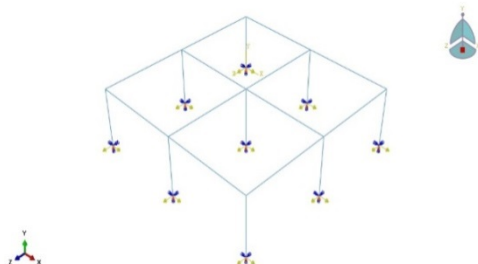
جدول ۵. مقایسه مقادیر بیشینه فشار به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و روابط آئین‌نامه (الف) زمین نرم (ب) زمین سخت

الف) زمین نرم				
مدل انفجار	فاصله مقیاس شده (m/kg <sup>1/3</sup> )	فشار روابط آئین‌نامه (کیلوپاسکال)	بیشینه فشار مدل (کیلوپاسکال)	درصد خطا
۳	۱٫۵	۲۶۵٫۲۵۲	۲۱۵٫۵۰۷	-۱۸٫۲۵
۱	۳٫۲۳	۲۶۵٫۲۵	۲۱٫۸۳۶	-۱۷٫۶۸
۷	۵	۷٫۱۶۲	۶٫۴۲۸	-۱۰٫۲۴
۵	۱۰٫۸۵	۰٫۷۱۶۲	۰٫۶۸	-۵٫۰۵

ب) زمین سخت				
مدل انفجار	فاصله مقیاس شده (m/kg <sup>1/3</sup> )	فشار روابط آئین‌نامه (کیلوپاسکال)	بیشینه فشار مدل (کیلوپاسکال)	درصد خطا
۴	۱٫۵	۲۰۲۶۲٫۴۴	۱۳۷۲۱٫۵	-۳۲٫۲۸
۲	۳٫۲۳	۶۴۰۷٫۵۴۵	۴۵۹۴٫۶۶	-۲۸٫۲۹
۸	۵	۳۳۲۹٫۴۵۸	۲۷۴۰٫۲۹۳	-۱۷٫۶۷
۶	۱۰٫۸۵	۱۰۵۲٫۸۶۷	۹۵۵٫۴۹۶	-۹٫۲۵

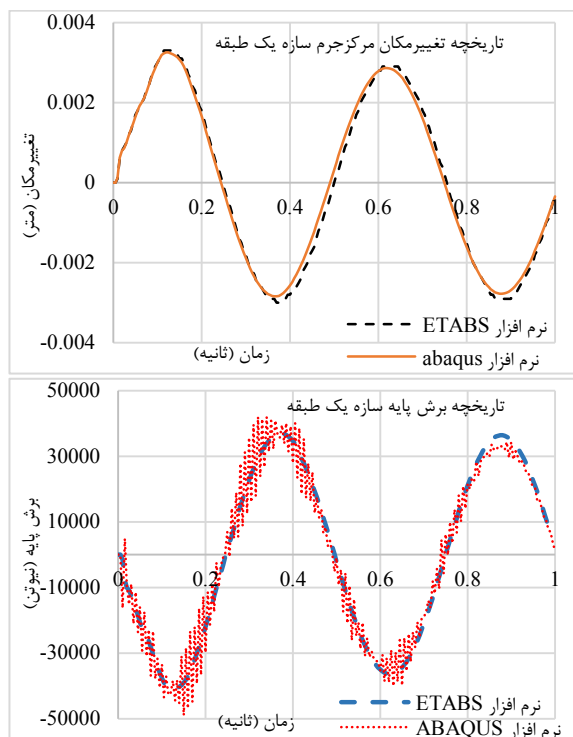
### ۸-۲. صحت‌سنجی نرم‌افزار ETABS و ABAQUS

جهت صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار ETABS در آنالیز رفتار سازه تحت بارگذاری تاریخچه زمانی، سازه یک‌طبقه با نرم‌افزار ETABS و آباکوس شبیه‌سازی شده است (شکل ۹)، مدل‌های شبیه‌سازی شده توسط هر دو نرم‌افزار تحت رکورد برداشت شده از انفجار حالت چهارم که همان انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری زمین سخت بود، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی شده‌اند که نتایج به‌دست‌آمده از هر دو نرم‌افزار در این قسمت بررسی خواهد شد.



شکل ۹. تصویر کلی مدل سازه یک طبقه در نرم‌افزار آباکوس

با مشاهده شکل (۱۰) و مقایسه تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخچه زمانی دو نرم‌افزار، محرز است که علاوه بر اینکه رفتار کلی کاملاً شباهت دارد مقادیر عددی جابه‌جایی در زمان‌های یکسان و مقادیر حداکثر جابه‌جایی نیز بسیار به یکدیگر نزدیک هستند.

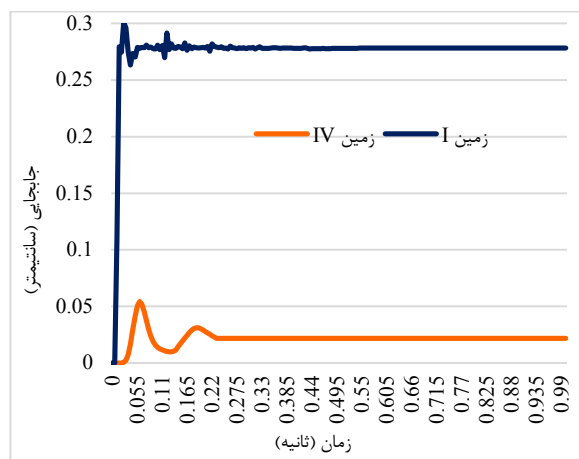


شکل ۱۰. تاریخچه تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم و برش پایه سازه یک طبقه در اثر تحلیل تاریخچه زمانی رکورد انفجار توسط دو نرم‌افزار Etabs و ABAQUS [۱۶ و ۲۳]



برداشت‌شده از زمین سخت دارای بیشینه شتاب بیشتر، تعداد سیکل‌های ارتعاشی بیشتر و همچنین پریود سیکل ارتعاشات کوتاه‌تر بوده و زمان رسیدن موج انفجار به سطح زمین کوتاه‌تر بوده است. علت اختلاف نتایج به‌دست‌آمده از انفجار در دو نوع مختلف زمین، ساختار تشکیل‌دهنده دو نوع زمین مختلف است، در زمین نوع IV به علت ساختار دانه‌ای خاک نرم‌تر نسبت به ساختار شیبه به سنگ زمین نوع I قطعاً قابلیت انتقال تنش کمتر بوده و باتوجه‌به ساختار متفاوت دو نوع زمین میرایی زمین نوع IV بسیار بیشتر از میرایی زمین نوع I خواهد بود.

با مشاهده شکل (۱۲) محرز می‌شود که نوع خاک تأثیر قابل‌توجهی بر جابه‌جایی ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری داشته است، در زمین سخت‌تر مقادیر تاریخچه تغییر مکان در میدان آزاد افزایش‌یافته و تاریخچه تغییر مکان در خاک سخت‌تر محتوای فرکانسی بیشتری داشته است ضمناً جابه‌جایی اولیه در مدت کمتری بعد از وقوع انفجار اتفاق افتاده است.



شکل ۱۲. مقایسه تاریخچه تغییر مکان میدان آزاد زمین در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ متری زمین سخت و نرم

پس با بررسی تاریخچه زمانی تغییر مکان می‌توان گفت به دلیل تفاوت ساختار زمین‌ها و قابلیت انتقال تنش بیشتر و میرایی کمتر زمین سخت، مقادیر جابه‌جایی و محتوای فرکانسی در خاک سخت‌تر بیشتر بوده و زمان شروع جابه‌جایی کاهش‌یافته است در واقع انرژی ناشی از انفجار در زمین سخت بیشتر و سریع‌تر انتقال داده شده است.

با بررسی طیف پاسخ جابه‌جایی سازه، ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری در شکل (۱۳) محرز است که انفجار اتفاق افتاده در عمق زمین سخت تحریک بیشتری روی سازه داشته و سازه رفتار شدیدتری داشته است، در واقع طیف پاسخ جابه‌جایی سازه از لحاظ مقدار، در اثر انفجار

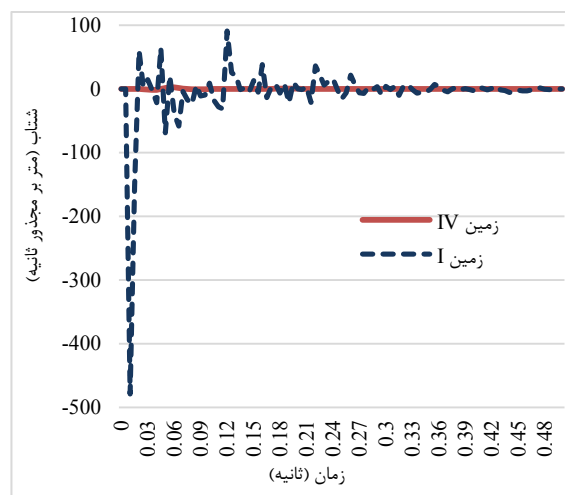
همچنین با مقایسه تاریخچه برش پایه سازه یک‌طبقه در اثر اعمال بار انفجار به‌وسیله دو نرم‌افزار نیز قابل‌رویت هست که رفتار کلی کاملاً شباهت دارد و از نظر مقادیر عددی در زمان‌های یکسان و همچنین مقادیر بیشینه برش پایه اختلاف بسیار کمی وجود دارد، در واقع ظاهراً مقادیر ارائه‌شده توسط نرم‌افزار Etabs به‌صورت اصلاح‌شده و میانینی شده ارائه‌شده‌اند.

## ۹. مقایسه انفجارها (تأثیر نوع خاک، عمق انفجار و مقدار ماده منفجره)

### ۹-۱. مقایسه تأثیر نوع خاک در نتایج میدان آزاد انفجار مدفون و رفتار سازه

برای مقایسه تأثیر نوع خاک بر روی نتایج به‌دست‌آمده، نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب و تغییر مکان میدان آزاد در محل مرکز سازه ترسیم‌شده‌اند و همچنین طیف پاسخ تغییر مکان سازه و طیف فوریه مربوطه به‌صورت دوطرفه برای حالت‌های انفجاری که فقط از نظر نوع خاک اختلاف دارند ترسیم‌شده‌اند.

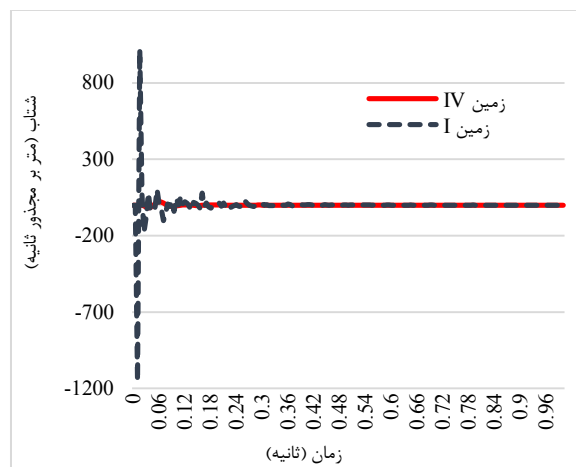
از بررسی تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین در شکل (۱۱) مشخص است نوع خاک تأثیر قابل‌توجهی در تاریخچه شتاب‌های برداشت‌شده از میدان آزاد زمین دارد.



شکل ۱۱. مقایسه تاریخچه شتاب در میدان آزاد زمین ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ متری زمین سخت و نرم

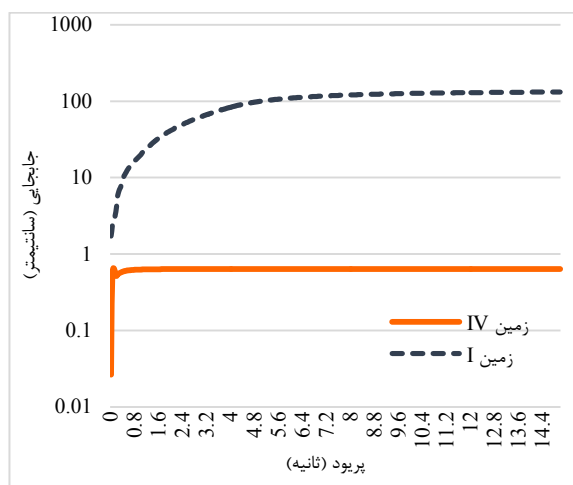
همان‌طور که در تصویر قابل‌مشاهده هست مقادیر ماکزیمم تاریخچه شتاب به‌دست‌آمده ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری زمین در خاک سخت بسیار بزرگ‌تر از مقادیر برداشت‌شده از میدان آزاد خاک نرم هست تا جایی که با روی هم قرار دادن دو نمودار مربوط به خاک سخت و خاک نرم محتوای خاک نرم‌تر تقریباً غیرقابل‌مشاهده بوده و به همین دلیل سیکل‌های اصلی ارتعاش ناشی از انفجار در خاک نرم به‌صورت مجزا بر روی تصویر بزرگ‌نمایی شده است، تاریخچه شتاب

ارتعاش و سیکل‌های بعدی و زمان شروع سیکل اولیه ارتعاش در زمین نرم‌تر بزرگ‌تر از زمین سخت است.



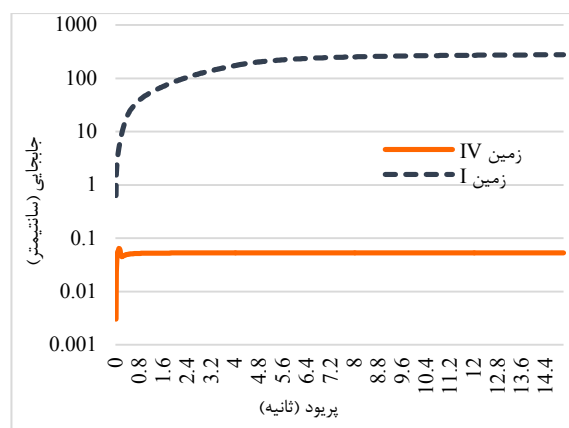
شکل ۱۵. نمودار مقایسه تاریخچه شتاب میدان آزاد انفجار ۱۰۰۰- کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ متری زمین سخت و نرم

با بررسی طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری در شکل (۱۶) محرز هست مقدار طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار درون زمین سخت‌تر بسیار بزرگ‌تر از انفجار در عمق زمین نرم است؛ اما نسبت این اختلاف در مقایسه با انفجار با ماده منفجره کم‌تر کاهش یافته است؛ همانند انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در این انفجار نیز پیوند صعودی طیف پاسخ تغییر مکان زمین سخت طولانی‌تر بوده در صورتی که طیف پاسخ تغییر مکان سازه ناشی از انفجار در عمق زمین نرم پیوند صعودی کوتاه‌تری داشته و در زمان کوتاهی به مقدار ماکزیمم خود رسیده و بلافاصله بعد از مقدار ماکزیمم دارای پله نزولی است و بعد از مقداری نزول تقریباً ثابت شده است.



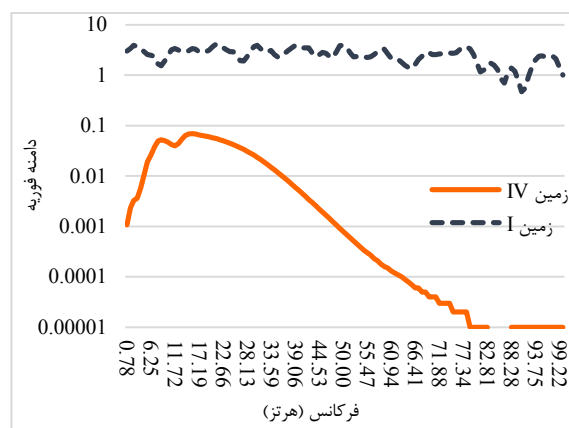
شکل ۱۶. نمودار مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ متری زمین سخت و نرم

زمین سخت مقادیر بسیار بزرگ‌تری دارد؛ اما از نظر رفتار کلی سازه با بررسی نمودارها محرز هست که طیف پاسخ جابه‌جایی سازه ناشی از انفجار در زمین سخت پیوند صعودی بیشتری دارد در صورتی که طیف پاسخ جابه‌جایی ناشی از انفجار در زمین نرم پیوند افزایش بسیار کوتاه‌تری دارد و پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم تقریباً به صورت پله‌ای کاهش یافته است.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ متری زمین سخت و نرم

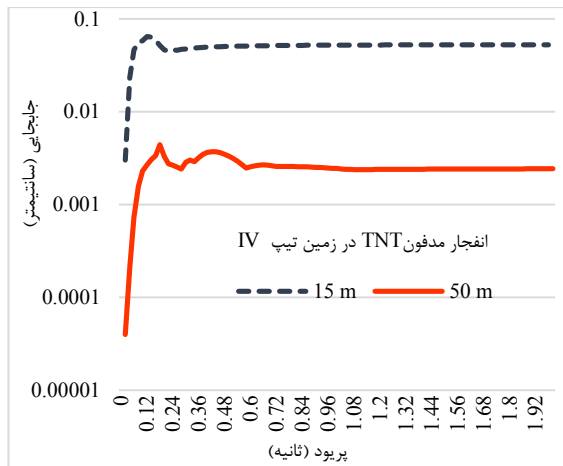
با بررسی طیف‌های فوریه به دست آمده از انفجار در زمین‌های نرم و سخت در شکل (۱۴) مشهود هست که طیف فوریه ناشی از انفجار در زمین سخت‌تر مقدار و محتوای فرکانسی بیشتری دارد در واقع زمین سخت فرکانس بالاتری دارد.



شکل ۱۴. نمودار مقایسه طیف فوریه انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ متری زمین سخت و نرم

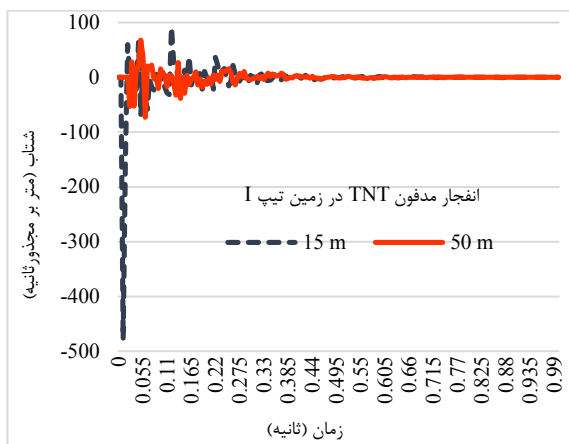
با بررسی تاریخچه شتاب در میدان آزاد زمین ناشی از انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ متری در شکل (۱۵) محرز هست که مقدار ماکزیمم شتاب به دست آمده از انفجار در زمین سخت‌تر بزرگ‌تر از مقدار ماکزیمم شتاب به دست آمده از انفجار در زمین نرم‌تر است، اما نسبت این اختلاف در مقایسه با انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره کاهش پیدا کرده است. با بررسی محتوای فرکانسی نمودار می‌توان دریافت که پیوند سیکل اولیه

کاهش یافته‌اند؛ اما محتوای طیف تغییر مکان با افزایش عمق سیکل‌های تغییرات بیشتری داشته است در واقع انفجار با عمق کمتر در پریود کمتری به ثبات رسیده است.



شکل ۱۸. نمودار مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در عمق ۱۵ و ۵۰ متری خاک نرم

با بررسی تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق زمین سخت در شکل (۱۹) محرز است که با افزایش عمق انفجار در زمین سخت مقدار ماکزیمم شتاب اولیه ارتعاش شدیداً کاهش یافته است و پریود شروع ارتعاشات افزایش یافته است؛ اما در خصوص سیکل‌های بعدی ارتعاش کاهش قابل توجهی در دامنه شتاب و تعداد سیکل‌ها دیده نمی‌شود. در واقع می‌توان این‌گونه گفت که در زمین سخت با افزایش عمق منبع انفجار، تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین از لحاظ دامنه تغییرات سیکل اولیه ارتعاش و پریود شروع ارتعاش تغییر قابل توجهی داشته است.

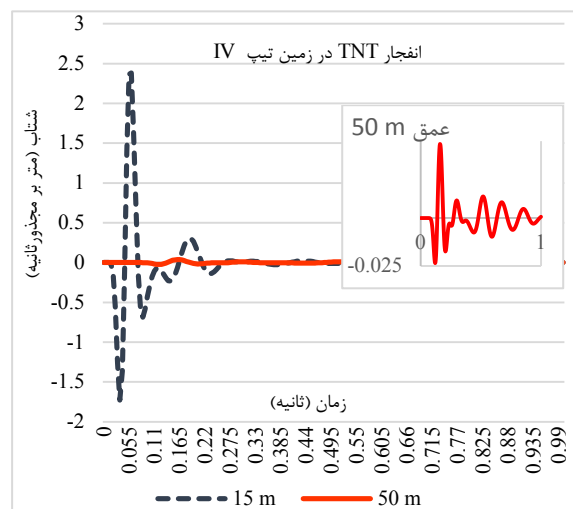


شکل ۱۹. نمودار مقایسه تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین سخت در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ و ۵۰ متری

## ۲-۹. تأثیر عمق ماده منفجره در نتایج میدان آزاد انفجار مدفون و رفتار سازه

در این بخش به وسیله به داده‌های برداشت شده از مدل انفجار مدفون، نمودار تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین در مرکز سطح سازه و طیف پاسخ تغییر مکان سازه برای حالت‌های مختلف انفجار به صورت دوگانه جهت مقایسه تأثیر پارامتر عمق انفجار ترسیم شده‌اند؛ با بررسی تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین در مرکز سطح سازه در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در زمین نرم برای دو عمق انفجار ۱۵ و ۵۰ متر در شکل (۱۷) محرز است که با افزایش عمق مقدار ماکزیمم شتاب و دامنه تغییرات شتاب شدیداً کاهش یافته است.

همچنین به دلیل افزایش فاصله تا میدان آزاد، زمان رسیدن موج لرزه‌ای افزایش یافته و پریود شروع ارتعاش با افزایش عمق افزایش یافته است و پریود سیکل اولیه ارتعاش و سیکل‌های بعدی ارتعاش‌ها نیز افزایش پیدا کرده‌اند؛ می‌توان این‌گونه گفت که با افزایش عمق انفجار، مقدار شتاب دریافت شده در میدان آزاد زمین کاهش یافته اما نسبت کاهش دامنه شتاب در سیکل اولیه ارتعاش بسیار بزرگ است. با افزایش عمق پریود سیکل ارتعاشات و پریود سکون قبل از سیکل اولیه ارتعاش افزایش یافته‌اند؛ اما شدت میرا شدن در انفجار با عمق کمتر خیلی بیشتر است در واقع دامنه تغییرات در انفجار با عمق کمتر با شدت بیشتری کاهش می‌یابند.



شکل ۱۷. نمودار مقایسه تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین نرم در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ و ۵۰ متری

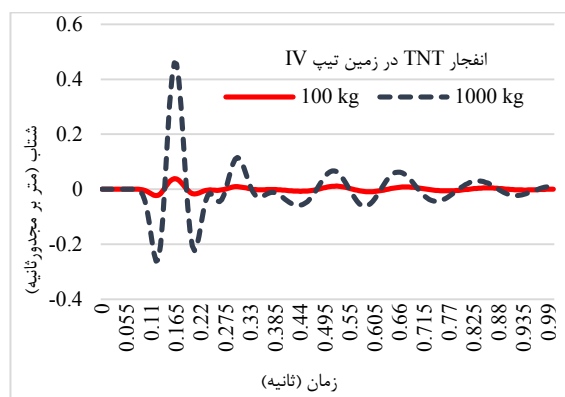
با بررسی طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق زمین نرم در شکل شماره (۱۸) محرز است که با افزایش عمق انفجار مقادیر طیف پاسخ تغییر مکان به شدت

عمق انفجار نسبت ماکزیمم شتاب سیکل اولیه و سیکل‌های بعدی به شدت کاهش می‌یابد همچنین در سیکل‌های بعدی به دلیل ایجاد فرصت، اثر میرایی مهم‌تر است، لذا در زمین نوع IV به دلیل وجود میرایی با افزایش عمق به جهت تأثیر بیشتر میرایی پاسخ در سیکل‌های بعدی نسبت به عمق کمتر کاهش زیادی دارد؛ اما در زمین نوع I به دلیل عدم وجود میرایی کاهش چشمگیری با افزایش عمق دیده نمی‌شود.

ضمناً با افزایش عمق انفجار در تمامی حالت‌های انفجار، پریود سیکل اولیه و سیکل‌های بعدی ارتعاش و پریود قبل از شروع سیکل اولیه ارتعاش افزایش یافته است که این مسئله مربوط به زمان رسیدن امواج لرزه‌ای به میدان آزاد زمین است که با افزایش مسافت زمان رسیدن افزایش یافته است و با این افزایش زمان، میرایی فرصت بیشتری جهت اعمال تأثیر پیدا کرده در نتیجه پریود سیکل‌های ارتعاشی نیز افزایش یافته است.

### ۹-۳. تأثیر مقدار ماده منفجره در نتایج میدان آزاد انفجار مدفون و رفتار سازه

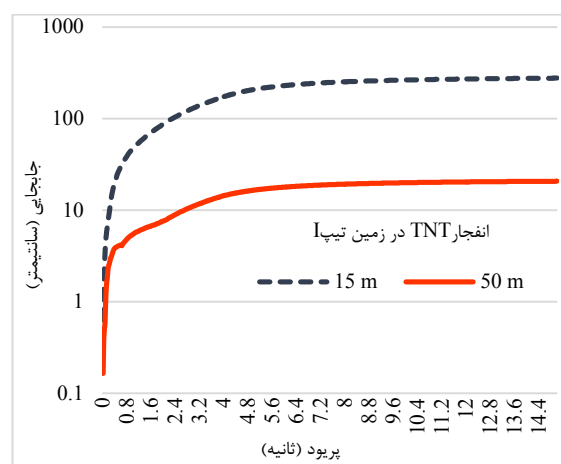
با بررسی نمودارهای شکل (۲۱) مربوط به تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین نرم در اثر انفجار مقادیر مختلف ماده منفجره در عمق ۵۰ متری نیز مشخص هست که در زمین نرم با افزایش مقدار ماده منفجره تنها دامنه تغییرات شتاب افزایش یافته اما شکل کلی محتوای فرکانسی از قبیل زمان شروع ارتعاش و پریود سیکل اولیه ارتعاش و تقریباً پریود سیکل‌های بعدی ارتعاش تغییری نکرده است.



شکل ۲۱. نمودار مقایسه تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین نرم در اثر انفجار ۱۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۵۰ متری

با بررسی شکل (۲۲) مربوط به طیف پاسخ سازه برای انفجار مقادیر متفاوت ماده منفجره در عمق ۵۰ متری زمین نرم محرز است که با افزایش مقدار ماده منفجره مقادیر پاسخ تغییر مکان سازه‌ای افزایش یافته است.

با بررسی طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق زمین سخت در شکل (۲۰) محرز است که با افزایش عمق انفجار مقادیر طیف پاسخ تغییر مکان سازه شدیداً کاهش می‌یابند؛ دیگر تفاوت نمودارهای عمق‌های متفاوت انفجار این است که در پریود ناحیه صعودی جابه‌جایی، انفجار در عمق کمتر روند صعود یکنواخت‌تری دارد؛ در نتایج حاصل از انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در شرایط زمین و اعماق مختلف نیز نتایج مشابه انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مشاهده شده است.

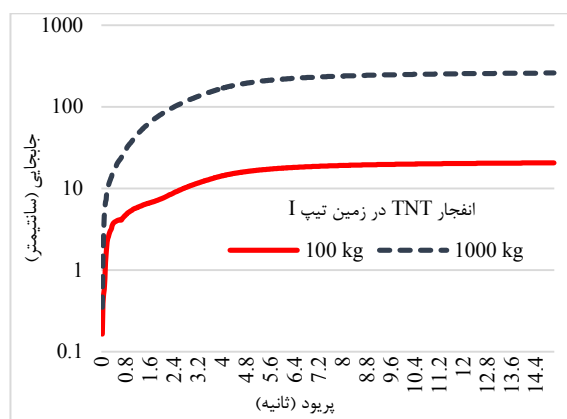


شکل ۲۰. نمودار مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۱۵ و ۵۰ متری زمین سخت

نکته مشاهده شده در این نمودارها که جلب توجه می‌نماید این است که همان‌طور که در انفجار ۱۰۰ کیلوگرم مشاهده شده بود با افزایش عمق انفجار دامنه شتاب سیکل‌های بعد از سیکل اول ارتعاش دچار کاهش نشده بودند، در انفجار با ماده منفجره بیشتر با افزایش عمق دفن ماده منفجره در سیکل‌های بعدی ارتعاش حتی دامنه شتاب افزایش پیدا کرده است و این موضوع موجب افزایش پاسخ‌های سازه‌ای با افزایش عمق در انفجار رخ داده در زمین سخت‌تر شده است.

با در نظر گرفتن اطلاعات به دست آمده در این قسمت در خصوص تأثیر پارامتر عمق منبع انفجار در نتایج به دست آمده می‌توان گفت، با افزایش عمق انفجار مقدار ماکزیمم شتاب سیکل اولیه ارتعاش شدیداً کاهش خواهد یافت، این کاهش شتاب در سیکل‌های بعدی ارتعاش در زمین نرم با شدت کمتری دیده می‌شود؛ اما در زمین سخت کاهش چشمگیری در دامنه شتاب سیکل‌های بعدی دیده نشده است و حتی در زمین سخت با افزایش عمق انفجارهای شدید پاسخ‌های سازه‌ای دچار افزایش شده‌اند، این موضوع را این‌گونه می‌توان تعبیر نمود که میرایی در سیکل اولیه پاسخ تأثیری ندارد؛ زیرا فرصتی برای اعمال تأثیر ندارد؛ اما با افزایش عمق منبع انفجار فرصت بیشتری جهت اعمال اثر پارامتر میرایی ایجاد می‌شود به همین علت است که با افزایش

منفجره بر روی زمان شروع ارتعاشات و پریود سیکل‌های ارتعاشی تأثیری ندارد؛ اما در خاک نرم افزایش مقدار ماده منفجره باعث افزایش دامنه تغییرات شتاب میدان آزاد زمین و افزایش پاسخ‌های سازه‌ای خواهد شد و در خاک سخت افزایش مقدار ماده منفجره تنها موجب افزایش دامنه شتاب سیکل‌های اول ارتعاشی شده و خصوصاً در انفجار کم‌عمق خاک سخت بعضاً منجر به کاهش دامنه شتاب سیکل‌های بعدی شتاب و پاسخ‌های سازه‌ای خواهد شد.



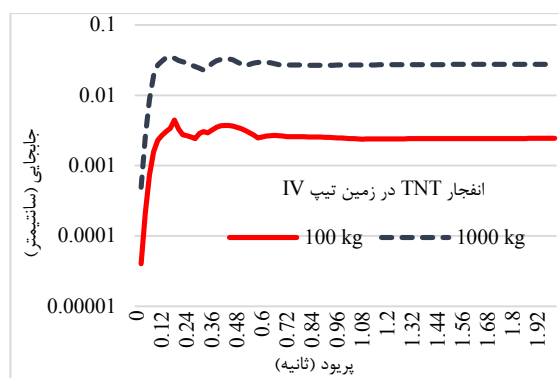
شکل ۲۴. نمودار مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان سازه ناشی از انفجار

۱۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۵۰ متری زمین سخت

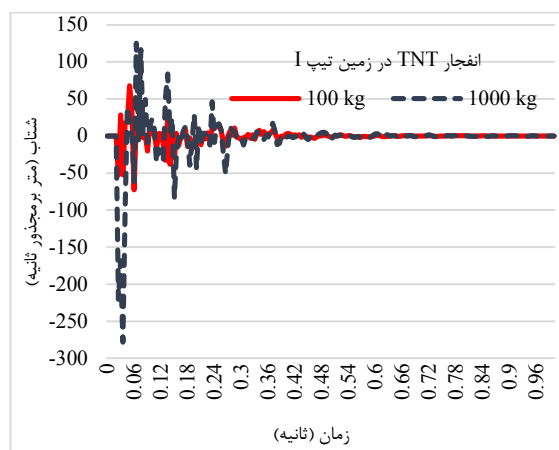
#### ۱۰. مقایسه انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک

در این بخش قصد بر مقایسه بارگذاری انفجار مدفون و بارگذاری زلزله حوزه نزدیک است، برای این منظور از رکوردهای شتاب برداشت‌شده از مرکز سطح سازه روی میدان آزاد مدل‌های انفجار مدفون استفاده خواهیم کرد، جهت در نظر گرفتن شرایط ساختگاه، شتاب‌نگاشت انفجار و زلزله برداشت‌شده از زمین تیپ IV باهم مقایسه می‌شوند و شتاب‌نگاشت و زلزله برداشت‌شده از زمین تیپ I نیز جداگانه مقایسه می‌شوند؛ باهدف حداکثر اختلاف بین بارگذاری‌های انفجاری، انفجار مدفون زمین نوع I با عمق کمتر و مقدار ماده منفجره بیشتر، همچنین انفجار مدفون در زمین نوع IV با عمق بیشتر و مقدار ماده منفجره کمتر در نظر گرفته شده است. جهت امکان بررسی محتوای فرکانسی همه شتاب‌نگاشت‌ها به مقدار شتاب ثقل مقیاس شده‌اند؛ ضمناً جهت مقایسه طیف پاسخ شتاب سازه از طیف‌های پاسخ اصلاح‌شده با طیف آئین‌نامه ۲۸۰۰ استفاده خواهد شد. باتوجه‌به اینکه مرکز سازه بر روی صفحه میدان آزاد در فاصله یکسانی از مرکز منبع انفجار در نظر گرفته شده به علت تقارن شتاب‌نگاشت برداشت‌شده از مدل انفجار در دو جهت افقی یکسان هستند، برای رکوردهای زلزله با بررسی محتوای فرکانسی رکوردها و بررسی طیف‌های پاسخ شتاب

با بررسی شکل (۲۳) مربوط به تاریخچه شتاب میدان آزاد ناشی از انفجار مقادیر مختلف ماده منفجره در عمق ۵۰ متری زمین سخت مشهود است که با افزایش مقدار منفجره ماکزیمم شتاب سیکل‌های اولیه ارتعاش افزایش یافته است؛ اما باگذشت زمانی در حدود ۰٫۳ ثانیه دامنه تغییرات شتاب سیکل‌ها کاهش یافته و در دو حالت مختلف تقریباً دامنه یکسانی دارد.



شکل ۲۲. نمودار مقایسه طیف پاسخ تغییر مکان سازه برای انفجار ۱۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۵۰ متری زمین نرم



شکل ۲۳. نمودار مقایسه تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین سخت برای

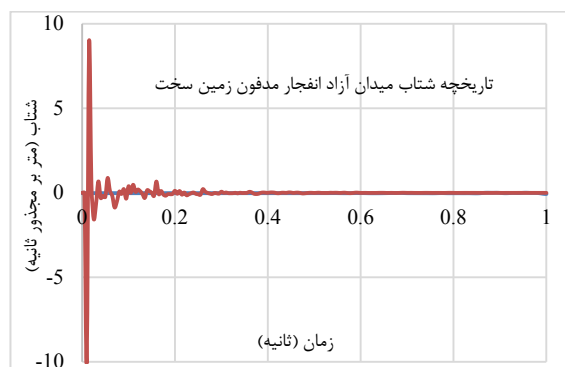
انفجار ۱۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق ۵۰ متری

ضمناً با بررسی شکل‌های (۲۲) و (۲۳) مشخص است که با افزایش مقدار ماده منفجره پریود سیکل‌های اولیه ارتعاش مقداری افزایش داشته؛ اما باگذشت زمان محتوای فرکانسی هر دو انفجار شبیه به هم است.

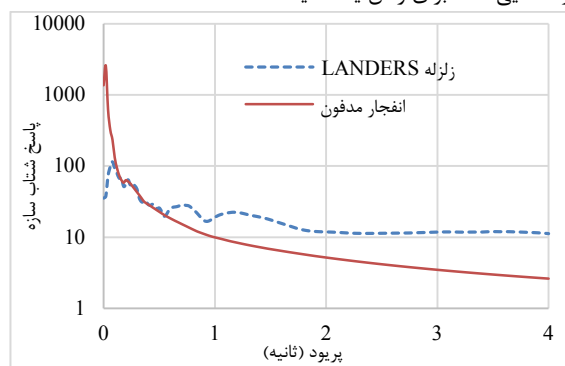
با بررسی طیف‌های پاسخ تغییر مکان سازه در اثر انفجار دو مقدار ماده منفجره در عمق زمین سخت در شکل (۲۴) محرز است که با افزایش مقدار ماده منفجره مقادیر پاسخ‌های تغییر مکان سازه‌ای افزایش داشته است.

با بررسی کلی اطلاعات به دست آمده از نتایج نمودارهای تاریخچه شتاب و طیف پاسخ تغییر مکان سازه می‌توان گفت مقدار ماده

بارگذاری انفجاری پاسخ شتاب بزرگ‌تری داشته است که این مطلب باتوجه به شکل پالس گونه بار انفجار و عدم تأثیر میرایی در ابتدای پریود منطقی هست؛ اما با افزایش پریود، پاسخ شتاب سازه تحت بارگذاری انفجاری به سرعت روند کاملاً نزولی داشته است درحالی‌که سیر نزولی طیف پاسخ سازه تحت اثر بار زلزله کندتر بوده و دارای محتوا است، در واقع در انفجار پس از وارد شدن تنش نسبتاً بزرگی در یک و یا تعداد محدودی سیکل، سازه وارد مرحله ارتعاش آزاد خواهد شد.



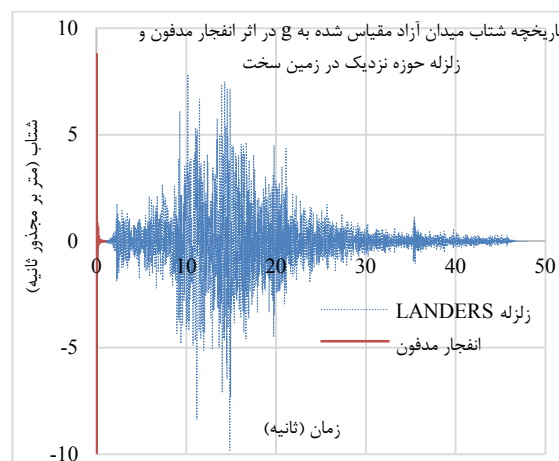
**شکل ۲۶.** مقایسه تاریخچه شتاب مقیاس شده به  $g$  میدان آزاد زمین سخت (تیپ I)، برای انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک (Landers) بزرگ‌نمایی شده برای زمان یک ثانیه



**شکل ۲۷.** مقایسه طیف‌های پاسخ شتاب سازه اصلاح‌شده با طیف آئین-نامه ۲۸۰۰ تحت اثر بارگذاری انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک زمین سخت (تیپ I)

سرعت و تغییر مکان، طیف بزرگ‌تر که در واقع طیفی هست که اثرات جهت‌پذیری نیز بر روی آن دیده شده مشخص شده و در مقایسه‌ها از این طیف استفاده شده است.

با مشاهده تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین مقیاس شده به شتاب ثقل در شکل (۲۵) مربوط به انفجار مدفون که روی زمین با خصوصیت‌های تیپ I مدل‌سازی شده است و زلزله حوزه نزدیک LANDERS که در ساختگاه زمین تیپ I ثبت شده است، تفاوت‌های تاریخچه شتاب بارگذاری‌های انفجار و زلزله حوزه نزدیک محرز است، مدت زمان ارتعاش‌های بارگذاری انفجار مدفون بسیار کوتاه‌تر از بارگذاری زلزله حوزه نزدیک هست ضمناً تعداد سیکل‌های ارتعاشی بار انفجار مدفون خیلی کمتر از تعداد سیکل ارتعاش بار زلزله حوزه نزدیک است.



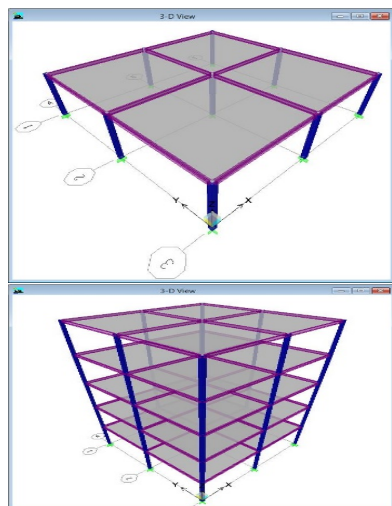
**شکل ۲۵.** مقایسه تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین سخت (تیپ I) برای انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک (Landers)

جهت بررسی دقیق‌تر محتوای فرکانسی ارتعاش، تاریخچه شتاب هر یک از بارگذاری‌ها در شکل (۲۶) بزرگ‌نمایی شده است؛ با بررسی محتوای فرکانسی این تصاویر مشخص هست که پریود سیکل ارتعاشات زلزله حوزه نزدیک بسیار بزرگ‌تر از پریود سیکل ارتعاشات انفجار مدفون هست، سیکل ارتعاشات انفجار مدفون با سرعت میرا می‌شوند؛ اما سیکل ارتعاش‌های زلزله حوزه نزدیک تداوم بیشتری دارند، در بارگذاری انفجاری سیکل اولیه ارتعاش از سیکل‌های بعدی بزرگ‌تر هست و سیکل‌های بعدی با سرعت کاهش می‌یابند؛ اما در تاریخچه زلزله حوزه نزدیک ماکزیمم شتاب در سیکل‌های ابتدایی باگذشت زمان سیر صعودی و بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم، روند نزولی دارد. در تاریخچه ارتعاش زلزله حوزه نزدیک زمین سخت پیش‌لرزه و پس‌لرزه به‌وضوح مشهود هستند؛ اما در تاریخچه شتاب انفجار مدفون ارتعاش‌ها کاملاً ناگهانی و کوتاه‌مدت هستند. با مشاهده طیف پاسخ شتاب سازه شکل (۲۷) محرز هست که در ابتدای پریود، سازه تحت

انفجار مدفون شدیداً کمتر از زلزله حوزه نزدیک هست، دامنه تغییرات شتاب میدان آزاد در اثر انفجار مدفون دارای یک سیکل - اولیه بزرگ و سیکل‌های بعدی محدود بوده و سریعاً میرا می‌شوند، در صورتی که سیکل‌های ارتعاشی زلزله حوزه نزدیک در ابتدا صعودی و پس از گذشت سیکل‌های متعدد روند نزولی دارد و این روند افزایش و میرایی با شدت کمتری به نسبت بار انفجار دیده می‌شود و در بارگذاری انفجاری پس‌لرزه و پیش‌لرزه موجود در تحریک‌های زلزله وجود ندارد و رفتار سازه در ابتدای پریود ارتعاش در بارگذاری انفجاری بسیار شدیدتر هست؛ اما با پریود کوتاهی سریعاً میرا می‌شود؛ پس بارگذاری انفجار مدفون رفتار بسیار ضربه‌ای و پالس گونه‌تری به نسبت ارتعاشات زلزله حوزه نزدیک دارد و سازه در مواجهه با بار انفجار مدفون با یک ضربه شدید و بسیار کوتاه‌مدت شدیداً دینامیکی مواجه شده و بعد وارد مرحله ارتعاش آزاد می‌شود.

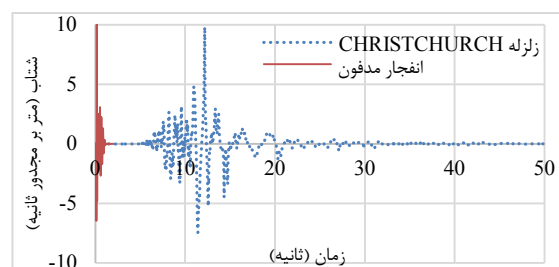
#### ۱۱. مقایسه رفتار سازه تحت بار انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک، تأثیر میرایی و ارتفاع سازه

جهت بررسی رفتار سازه با استفاده از نرم‌افزار ETABS دو مدل سازه‌ای یک و پنج طبقه ساخته شده و دو بار انفجار انتخاب شده و دو زلزله حوزه نزدیک موردنظر به وسیله بارگذاری تاریخچه زمانی به سازه اعمال شده‌اند، به جهت ایجاد امکان بررسی تأثیر میرایی هر یک از بارگذاری‌ها با سه میرایی متفاوت ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ به سازه اعمال شده‌اند؛ مدل‌های سازه‌ای در نظر گرفته شده، قاب خمشی فولادی متوسط و به صورت کاملاً منظم و با کاربری مسکونی می‌باشند، در مدل‌سازی سازه به دلیل بهتر مشخص شدن تأثیر پارامترهای مدنظر مدل‌سازی و بارگذاری ساده‌سازی شده است. سقف سازه از نوع تیرچه‌بلوک و کاملاً صلب در نظر گرفته شده است (شکل ۳۰).



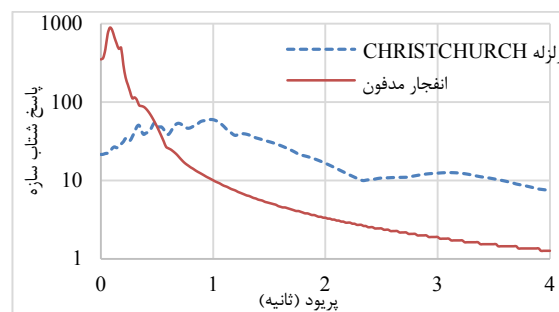
شکل ۳۰. تصویر مدل سازه یک و پنج طبقه در نرم‌افزار ETABS

با بررسی نمودارهای تاریخچه شتاب میدان آزاد زمین تیپ IV در شکل (۲۸) محرز هست که گرچه تعداد سیکل‌های ارتعاشی در اثر زلزله حوزه نزدیک نسبت به زمین سخت کاهش یافته است؛ اما کماکان این تعداد نسبت به سیکل‌های ارتعاشی انفجار مدفون شدیداً بیشتر هست، با بررسی محتوای فرکانسی محرز است که پریود سیکل‌های ارتعاش ناشی از بار انفجار مدفون در زمین نرم‌تر نیز، نسبت به زلزله حوزه نزدیک کوتاه‌تر هست؛ ضمناً در دامنه تغییرات شتاب سیکل‌های متوالی ارتعاش انفجار مدفون از ابتدا روند کاهشی اما در زلزله حوزه نزدیک دامنه تغییرات شتاب سیکل‌ها در ابتدا روند افزایشی و بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم روند کاهشی وجود دارد، در واقع می‌توان گفت بیشینه انرژی در انفجار در سیکل اول دیده می‌شود؛ اما در زلزله در میانه سیکل‌های ارتعاشی دیده می‌شود.



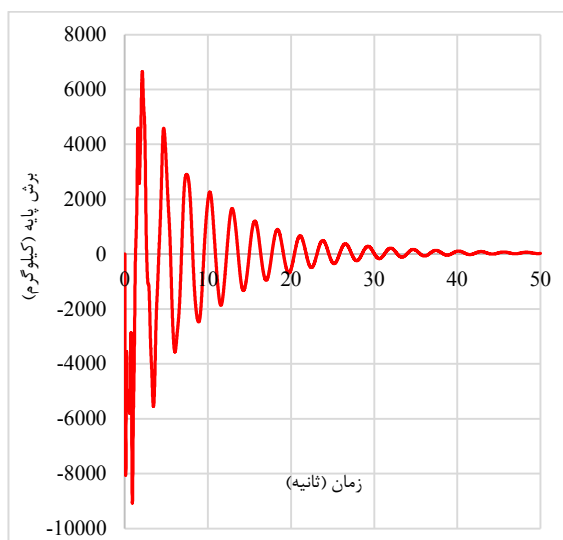
شکل ۲۸. مقایسه تاریخچه شتاب مقیاس شده به g میدان آزاد زمین نرم (تیپ IV) برای انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک (Christchurch)

با بررسی نمودارهای شکل (۲۹) نیز محرز هست پاسخ‌های شتاب سازه‌ای همانند بارگذاری‌های زمین سخت در زمین نرم‌تر نیز با بارگذاری انفجار مدفون در ابتدای پریود مقدار بزرگ‌تری دارند و با افزایش پریود سیر نزولی بسیار سریعی دارند؛ اما در بارگذاری زلزله حوزه نزدیک با افزایش پریود در پاسخ‌های شتاب سازه در ابتدا سیکل‌های افزایشی و سپس سیکل‌های کاهشی با شیب ملایم‌تری نسبت به بارگذاری انفجاری دیده می‌شود.

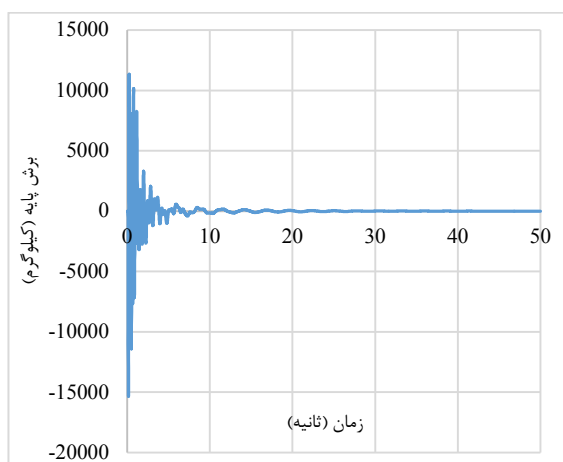


شکل ۲۹. مقایسه طیف‌های پاسخ شتاب سازه اصلاح شده با طیف آئین-نامه ۲۸۰۰ تحت اثر بارگذاری انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک زمین تیپ IV

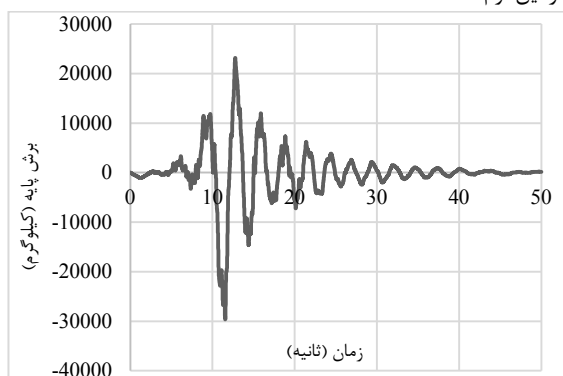
جمعاً می‌توان گفت، پریود کل ارتعاشات و پریود هر یک از سیکل‌های ارتعاش همچنین تعداد سیکل‌های ارتعاش ناشی از بارگذاری



شکل ۳۱. نمودار تاریخچه برش پایه سازه پنج طبقه تحت انفجار مدفون در زمین سخت



شکل ۳۲. نمودار تاریخچه برش پایه سازه پنج طبقه تحت انفجار مدفون در زمین نرم



شکل ۳۳. نمودار تاریخچه برش پایه سازه پنج طبقه تحت زلزله زمین سخت LANDERS

برای مقطع تمامی تیرها از سری مقاطع اشتایل و از پروفیل IPE200 و همچنین برای مقطع تمامی ستون‌ها از باکس مکعب به ابعاد ۱۸ سانتیمتر و ضخامت ورق ۸ میلی‌متر استفاده شده است و پس از اتمام مدل‌سازی و بارگذاری، ترکیب بارهای تحلیل تاریخچه زمانی با ترکیب شتاب‌نگاشت‌ها در دو جهت اعمال شده‌اند که در این قسمت برای هر ترکیب شتاب‌نگاشت سه بارگذاری با مقادیر مختلف میرایی معرفی شده است. در این قسمت به بررسی خروجی‌های رفتار مدل سازه‌ای تحت بارگذاری‌های اعمال شده خواهیم پرداخت.

### ۱۱-۱. مقایسه رفتار مدل‌های سازه‌ای در برابر بارگذاری انفجاری و زلزله

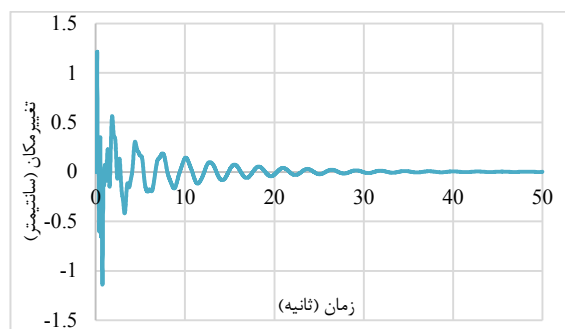
در این بخش به مقایسه پاسخ‌های مدل‌های سازه‌ای، ناشی از بارگذاری‌های انفجاری و زلزله خواهیم پرداخت، جهت انجام این مقایسه با دریافت تاریخچه رفتار سازه از نرم‌افزار Etabs نمودارهای مربوط به برش پایه، تغییر مکان و منحنی ظرفیت سازه تحت هر یک از بارگذاری‌ها ترسیم شده و به طور جداگانه برای سازه یک طبقه و پنج طبقه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به اینکه هدف این بخش مقایسه بین بارگذاری‌های انفجاری و زلزله هست نمودارها فقط برای میرایی ۵ درصد رسم خواهند شد و تأثیر میرایی در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. رکوردهای بارگذاری انفجاری به علت فاصله یکسان منبع انفجاری در هر دو جهت افقی از مرکز سطح سازه، در هر دو جهت یکسان بوده‌اند؛ اما به دلیل وجود اختلاف در رکوردهای زلزله در دو جهت مختلف جهت مشاهده بیشترین اختلاف، جهتی که نتایج بزرگ‌تری داشته مورد بررسی قرار گرفته است.

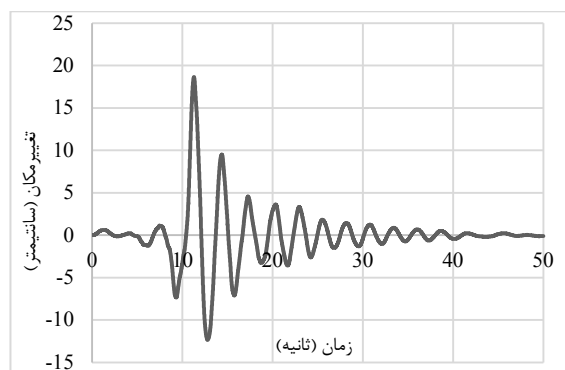
با بررسی شکل‌های (۳۴-۳۱) که مربوط به تاریخچه برش پایه سازه پنج طبقه هستند نیز اختلاف موجود در رفتار سازه یک طبقه بین دو نوع بارگذاری انفجاری و زلزله مشهود هستند؛ در بارگذاری انفجاری، رسیدن سریع نیروی وارده به مقدار بیشینه خود در ابتدای بارگذاری که ناشی از ماهیت ضربه‌ای بار بوده است در این مدل سازه‌ای نیز دیده می‌شود.

میرایی نیروی وارده در انفجار بلافاصله بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم که در اثر عدم تداوم بار و ماهیت پالس‌گونه بار انفجاری وجود دارد، همچنین تعداد کمتر سیکل‌های اعمال نیرو در بار انفجاری به دلیل مدت تداوم بیشتر نیروی زلزله و مدت زمان مؤثر بیشتر نیروی زلزله، از تفاوت‌های بارز رفتار مدل سازه‌ای در برابر دو بارگذاری متفاوت است.

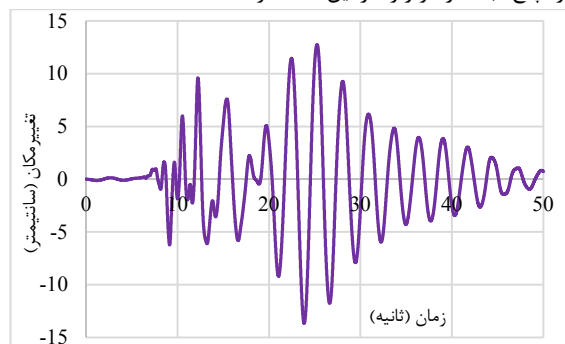




شکل ۳۶. نمودار تاریخچه تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم طبقه آخر سازه پنج‌طبقه در اثر انفجار مدفون در زمین نرم



شکل ۳۷. نمودار تاریخچه تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم طبقه آخر سازه پنج‌طبقه در اثر زلزله زمین سخت‌تر LANDERS

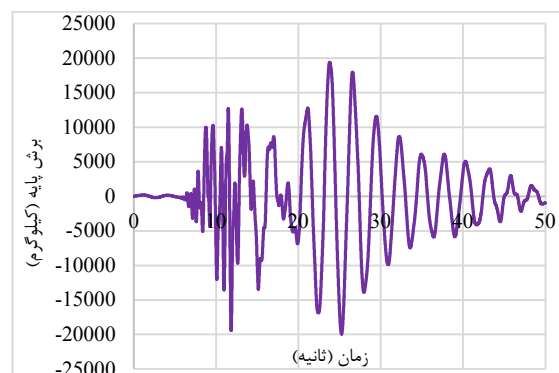


شکل ۳۸. تاریخچه تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم طبقه آخر سازه پنج‌طبقه در اثر زلزله حوزه نزدیک زمین نرم‌تر CHRISTCHURCH

## ۱۱-۲. تأثیر مرتبه سازه بر پاسخ‌های سازه تحت بارگذاری انفجاری

جهت بررسی تأثیر ارتفاع و مرتبه سازه بر پاسخ‌های بارگذاری انفجاری هم جابه‌جایی مرکز جرم دیافراگم طبقات مختلف سازه پنج‌طبقه بررسی شده است و هم نتایج به‌دست‌آمده از بخش قبلی برای دو سازه متفاوت یک و پنج‌طبقه باهم مقایسه شده‌اند.

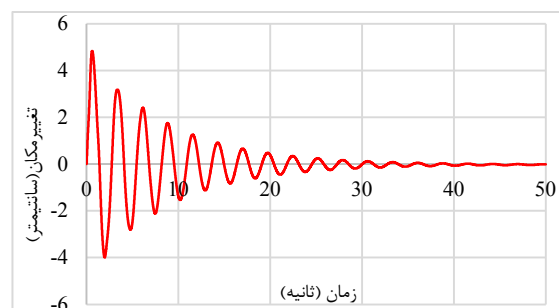
همان‌طور که در شکل (۳۹) محرز است در اثر اعمال بارگذاری انفجاری برداشت‌شده از انفجار مدفون در زمین سخت، نیروی برش پایه وارده به سازه پنج‌طبقه در مقایسه با نیروی وارد



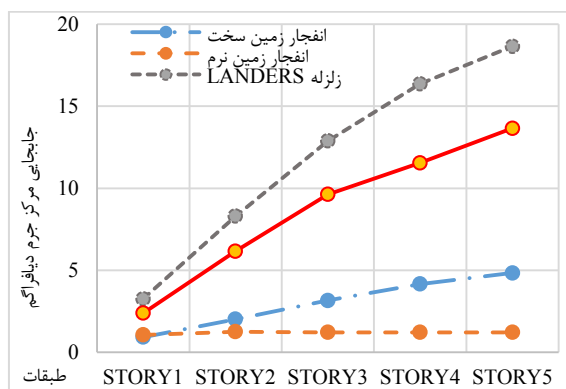
شکل ۳۹. نمودار تاریخچه برش پایه سازه پنج‌طبقه تحت زلزله زمین نرم CHRISTCHURCH

با بررسی نمودارهای تاریخچه تغییر مکان سازه پنج‌طبقه در شکل‌های (۳۸-۳۵) نیز مشخص هست که در بارگذاری انفجاری بزرگ‌ترین دامنه سیکل‌های ارتعاشی مربوط به سیکل اول هست و ماکزیمم تغییر مکان در سیکل اولیه اتفاق افتاده است و به علت عدم تداوم اعمال نیرو پس از سیکل اولیه، سازه وارد مرحله ارتعاش آزادشده و وارد مرحله میرایی می‌شود؛ اما در رفتار سازه در برابر بار زلزله به نسبت بار انفجار سیکل‌های تغییر مکان بازم بیشتر بوده و بیشینه تغییر مکان در سیکل‌های ثانویه و باگذشت سیکل‌های متعدد اتفاق افتاده است که این مطلب در مورد رفتار سازه در اثر زلزله رخ داده در زمین نرم‌تر بیشتر مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده این موضوع هست که در بین زلزله‌ها، زلزله حوزه نزدیک رخ داده در زمین سخت ماهیت ضربه‌ای‌تر داشته و شباهت بیشتری به بار انفجاری دارد.

با بررسی بیشینه مقادیر برش پایه و تغییر مکان به‌دست‌آمده از رفتار سازه محرز هست رفتار سازه در برابر بار زلزله به مقادیر بیشینه بزرگ‌تری رسیده است که این به علت اختلاف ماهیت بارگذاری‌های انفجار و زلزله است.



شکل ۴۰. نمودار تاریخچه تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم طبقه آخر سازه پنج‌طبقه در اثر انفجار مدفون در زمین سخت



شکل ۴۱. نمودار بیشینه جابه‌جایی مرکز جرم دیافراگم طبقات مختلف سازه پنج‌طبقه

با جمع‌بندی مطالب این بخش می‌توان گفت مطالب به‌دست‌آمده حاکی از ماهیت ضربه‌ای بسیار بارزتر بارگذاری انفجاری بوده است و از تأثیرات قابل‌مشاهده این مطلب در رفتار سازه، وقوع بیشینه رفتار سازه در ثانیه‌های اولیه بارگذاری و سیکل‌های اولیه بارگذاری هست که در اثر شروع دوره تناوب مؤثر بار انفجار از ثانیه‌های اولیه بارگذاری و اعمال نیرو در پالس‌های با پررود کوتاه و تعداد محدود است.

### ۱۱-۳. تأثیر میرایی بر پاسخ‌های سازه‌ای تحت بارگذاری انفجاری:

در بخش مدل‌سازی سازه جهت ایجاد امکان بررسی تأثیر میرایی روی پاسخ‌های سازه، سه مقدار میرایی ۱، ۵ و ۱۰ درصد را در نظر گرفتیم که در این قسمت با برداشت بیشینه پاسخ‌های سازه‌ای برش پایه و تغییر مکان، تأثیر تغییر مقدار میرایی بر روی سازه بررسی می‌شود.

بامطالعه مقادیر بیشینه برش پایه به‌دست‌آمده از مدل‌های سازه‌ای یک و پنج‌طبقه، در اثر اعمال بارگذاری انفجاری محرز هست که با افزایش میرایی مقادیر برش پایه کاهش یافته‌اند.

بامطالعه مقادیر بیشینه جابه‌جایی مرکز جرم دیافراگم طبقه آخر دو مدل یک و پنج‌طبقه در جدول‌های (۶) و (۷) محرز هست که با افزایش میرایی مقادیر جابه‌جایی در هر دو مدل سازه کاهش یافته‌اند؛ اما این کاهش به نسبت افزایش میرایی چندان چشمگیر نیست.

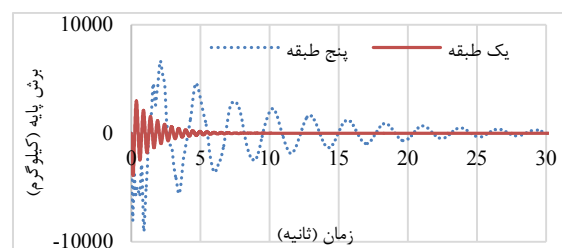
جدول ۶. مقایسه تأثیر میرایی مدل پنج‌طبقه بر برش پایه حداکثر

نوع بارگذاری	زمین	برش پایه (کیلوگرم)		
		میرایی ۱٪	میرایی ۵٪	میرایی ۱۰٪
انفجار	تیپ I	۷۶۸۵	۹۰۶۵	۱۲۱۵۹
انفجار	تیپ IV	۱۴۷۷۸	۱۵۳۴۷	۱۵۸۵۴

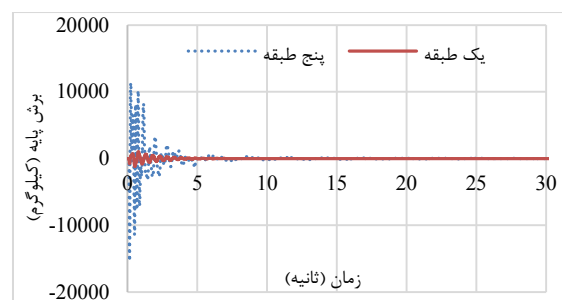
جدول ۷. مقایسه تأثیر میرایی مدل پنج‌طبقه بر جابه‌جایی دیافراگم

بر مدل یک طبقه دارای مقدار بزرگ‌تری است در واقع دامنه سیکل‌های رفت‌وبرگشت نیرو بزرگ‌تر شده است علاوه بر این پررود و تعداد سیکل‌های اعمال نیرو نیز بزرگ‌تر است و با بزرگ‌تر شدن پررود و تعداد سیکل‌های اعمال نیرو، مدت تداوم اعمال نیرو نیز افزایش یافته است.

با بررسی شکل (۴۰) نیز محرز است که در اثر اعمال بار انفجار مدفون زمین نرم به دو مدل سازه‌ای یک و پنج‌طبقه، مدل پنج‌طبقه نیروی برش پایه به‌مراتب بزرگ‌تری دریافت می‌کند و سیکل‌های اعمال نیرو بیشتر می‌باشند که در نتیجه مدت تداوم نیرو بیشتر خواهد شد. اما در مقایسه با انفجار مدفون زمین سخت پررود سیکل‌های اعمال نیرو در سازه پنج‌طبقه افزایش پیدا نکرده است، که این مطلب ناشی از شرایط متفاوت زمین دو بار انفجاری است.



شکل ۳۹. تاریخچه برش پایه مدل سازه یک و پنج‌طبقه تحت انفجار مدفون زمین سخت



شکل ۴۰. تاریخچه برش پایه مدل سازه‌ای یک و پنج‌طبقه تحت انفجار مدفون زمین نرم

با مشاهده نحوه رفتار تغییر مکان سازه در ارتفاع روی شکل (۴۱) محرز هست که در بارگذاری انفجاری با بالا رفتن در ارتفاع و طبقات سازه، تغییر مکان نسبت به طبقات پائین تر افزایش چشمگیری نداشته در صورتی که در بارگذاری زلزله طبقات بالاتر به‌مراتب تغییر مکان بزرگ‌تری دارند که این مطلب نیز به دلیل ماهیت ضربه‌ای بیشتر بار انفجار هست در واقع باتوجه‌به اینکه مقدار بیشینه رفتار سازه در سیکل اولیه ارتعاش هست سازه فرصت تغییر شکل پیدا نمی‌کند و همانند یک جسم صلب جابه‌جا می‌شود.

خصوصاً در انفجار کم‌عمق خاک سخت بعضاً منجر به کاهش دامنه سیکل‌های بعدی شتاب و پاسخ‌های سازه‌ای خواهد شد.

با بررسی محتوای فرکانسی تاریخچه شتاب میدان آزاد ناشی از انفجار مدفون و زلزله حوزه نزدیک در زمین نوع I مشخص شد که پرپود سیکل ارتعاشات زلزله حوزه نزدیک چندین برابر بزرگ‌تر از پرپود سیکل ارتعاشات انفجار مدفون هست، سیکل ارتعاشات انفجار مدفون با سرعت میرا می‌شوند؛ اما سیکل ارتعاشات زلزله حوزه نزدیک تداوم بیشتری دارند.

با بررسی بیشینه مقادیر برش پایه و تغییر مکان به‌دست‌آمده از رفتار سازه محرز هست که ماهیت ضربه‌ای بسیار بارزتر بارگذاری انفجاری، موجب وقوع بیشینه رفتار سازه در سیکل‌های اولیه بارگذاری هست؛ اما به علت مدت تداوم بیشتر، رفتار سازه در برابر بار زلزله حوزه نزدیک به نسبت بار انفجار مدفون از لحاظ کمی به مقادیر بیشینه بزرگ‌تری رسیده است و همچنین از نظر محتوای فرکانسی دارای سیکل‌های ارتعاشی بیشتر و پرپودهای بزرگ‌تر ارتعاش بوده است. در بارگذاری انفجاری با بالا رفتن در ارتفاع و طبقات سازه، تغییر مکان نسبت به طبقات پائین‌تر افزایش چشمگیری ندارد، در صورتی که در بارگذاری زلزله طبقات بالاتر به-مراتب تغییر مکان بزرگ‌تری دارند.

با افزایش میرایی سازه، پاسخ‌های سازه‌ای در برابر بارگذاری انفجاری تا حدی دچار کاهش خواهند شد، اما با توجه به اینکه بیشینه نیروی وارد به سازه در بارگذاری انفجاری در سیکل اول وارد می‌شود پیک پاسخ سازه در برابر بارگذاری انفجاری در سیکل اول اتفاق افتاده است به همین علت میرایی تأثیر چشمگیری بر روی پیک پاسخ‌های سازه در برابر بارگذاری انفجاری نخواهد داشت؛ اما در سیکل‌های بعدی میرایی مؤثر شده و با توجه به عدم تداوم بار انفجار، پرپود کلی ارتعاش سازه را کاهش خواهد داد.

### ۱۳. مرجع‌ها

- [1] Ohno, T. "Study on Structural Response to Explosion of Explosives and Blast Resistance Design"; National Defense Academy of Japan, 2008.
- [2] De, A.; Zimmie, T. F.; Abdoun, T.; Tessari, A. "Physical Modeling of Explosive Effects on Tunnels"; Geotech Test J; 2010, 30, 5, 427-431.
- [3] Ishikawa, N.; Beppu, M. "Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan"; Int J Impact Eng; 2006, 34, 1535-1545.
- [4] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport-a Parametric Study"; Geotechnical and Geological Engineering; 2004, 24, 227-248.
- [5] Nagy, N. M.; Eltehawy, E. A.; Elhanafy, H. M.; Eldesouky, A. "Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures"; 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology; ASAT- 13, Egypt, 2009.
- [6] Nagy, N. M.; Mohamed, M.; Boot, J.C. "Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions

نوع بارگذاری	زمین	تغییر مکان دیافراگم طبقه آخر (سانتیمتر)		
		میرایی ۱۰٪	میرایی ۵٪	میرایی ۱٪
انفجار	تیپ I	۴,۴۷۰۴	۴,۸۳۱۶	۵,۱۵۰۳۰
انفجار	تیپ IV	۱,۲۱۰۲	۱,۲۱۵۵	۱,۳۰۱۶

**جدول ۸.** مقایسه تأثیر میرایی مدل پنج‌طبقه بر برش پایه حداکثر در بارگذاری‌های زمین نرم

نوع بارگذاری	برش پایه (کیلوگرم)			درصد اختلاف بین میرایی ۱ و ۱۰ درصد
	میرایی ۱۰٪	میرایی ۵٪	میرایی ۱٪	
زلزله	۱۵۱۴۲	۱۹۹۱۱	۲۸۴۱۱	۴۶
انفجار	۱۴۷۷۸	۱۵۲۴۷	۱۵۸۵۴	۶

**جدول ۹.** مقایسه تأثیر میرایی مدل پنج‌طبقه بر جابه‌جایی دیافراگم طبقه آخر

نوع بارگذاری	تغییر مکان (سانتیمتر)			درصد اختلاف بین میرایی ۱ و ۱۰ درصد
	میرایی ۱۰٪	میرایی ۵٪	میرایی ۱٪	
زلزله	۱۰,۶۱۷۳	۱۸,۶۵۳۶	۱۴,۸۶۴۲	۴۰
انفجار	۱,۲۱۰۲	۱,۲۱۵۵	۱,۳۰۱۶	۷

در واقع با بررسی جدول‌های (۸) و (۹) می‌توان گفت با افزایش میرایی سازه، پاسخ‌های سازه‌ای در برابر بارگذاری انفجاری تا حدی دچار کاهش خواهند شد؛ اما با توجه به اینکه بیشینه نیروی وارد به سازه در بارگذاری انفجاری در سیکل اول وارد می‌شود و پیک پاسخ سازه در برابر بارگذاری انفجاری در سیکل اول اتفاق افتاده است به همین علت میرایی تأثیر چشمگیری بر روی پیک پاسخ‌های سازه در برابر بارگذاری انفجاری نخواهد داشت؛ اما در سیکل‌های بعدی میرایی مؤثر شده و با توجه به عدم تداوم بار انفجار، پرپود کلی ارتعاش سازه را کاهش خواهد داد.

### ۱۲. نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج برداشت‌شده از میدان آزاد مدل‌های انفجار مدفون و طیف‌های پاسخ سازه، با سخت‌تر شدن زمین ساختگاه انفجار مدفون مقادیر حداکثر شتاب و تعداد سیکل‌های ارتعاش در میدان آزاد زمین به‌شدت افزایش یافته و به دلیل سرعت بالاتر موج لرزه‌ای در زمین سخت‌تر، زمان وقوع و پرپود سیکل‌های ارتعاش در زمین سخت‌تر کاهش می‌یابند؛ همچنین با افزایش عمق انفجار، مقدار ماکزیمم شتاب سیکل اولیه ارتعاش به شدت کاهش می‌یابد. مقدار ماده منفجره بر روی زمان شروع ارتعاشات و پرپود سیکل‌های ارتعاشی تأثیری ندارد؛ اما در خاک نرم افزایش مقدار ماده منفجره باعث افزایش دامنه تغییرات شتاب میدان آزاد زمین و افزایش پاسخ‌های سازه‌ای خواهد شد و در خاک سخت افزایش آن تنها موجب افزایش دامنه شتاب سیکل‌های اول ارتعاشی شده و

- on Buried Reinforced Concrete Structures”; *Geomech Eng*; 2010, 2, 1, 1-18.
- [7] Lu, Y.; Wang, Zh.; Chong, K. “A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations”; *Soil Dyn Earthq Eng*; 2005, 25, 275–288.
- [8] Hayes, J. R. “Earthquake Resistance & Blast Resistance: a Structural Comparison”; 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.
- [9] Bettina, P.; Allmann, Peter M. “Shearer and Egill Hauksson, Spectral Discrimination between Quarry Blasts and Earthquakes in Southern California”; *Bulletin of the Seismological Society of America*; Vol. 98, 2008.
- [10] Taghavi Parsa, M. H.; Geravand, A. “Investigating the Destructive Effect of Explosions at Different Distances on Concrete Retaining Walls” , *Advanced Defence Sci Technol*. 2020, 4, 369-382.
- [11] Peyman, S.; Ebrahimzade, A. “Numerical Investigation of the Effect of Geometry on the Energy Absorption Rate of Sandwich Panels under Blast Loading”, *Advanced Defence Sci Technol*. 2020, 4, 347-355.
- [12] Hosseini, S. A.; Foroughi, A.; Peymani Forushani, S., “Assessment of Response and Stiffness of Two-way Reinforced Concrete Slab Against Explosion Using Genetic Algorithm and Response Surface Method”, *Advanced Defence Sci.& Technol.*, 2023, 4, 239-249.
- [13] Hoseini, A.; Najafi, M. H., “Parametric Analysis of Reinforced Concrete Beams Under Blast Load” *Advanced Defence Sci.& Technol.*, 2023, 4, 1-10.
- [14] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. “Blast & Ballistic Loading of Structures”; Butterworth-Heinemann Ltd Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 80P, 1994.
- [15] TM-5-855-1. “Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons”, US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1984.
- [16] Abaqus 6.14-1, Analysis User’s Manual, 2014.
- [17] Li-Yun Fu; Ru-Shan Wu. “Infinite Element Based Absorbing Boundary Technique for Elastic Wave Modeling”; *Geophysics*; 2000, 65(2): 596.
- [18] Eshiet, K.; Sheng, Y. “Influence of Rock Failure Behavior on Prediction in Sand Production Problem”; *Environ Earth Sci*; 2013, 70, 1339-1365.
- [19] Stewart, J.P. ; Chiou, Sh.-J.; Bray, J. D.; Graves, R. W.; Somerville, P. G.; Abrahamson, N. A. “Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design”; Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California; Berkeley, PEER Report 2001/09.
- [20] Li, Sh. “Effect of Near-Fault Pulse-Like Ground Motions on Reinforced Concrete Frame Structures”; *Harbin Institute of Technology*; 31-33 (in Chinese). 2005.
- [21] Pacific Earthquake Engineering Research Center; Peer Strong Ground Motion Database; [www.peer.berkeley.edu](http://www.peer.berkeley.edu)
- [22] Standard No. 2800. “Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings”; 4th Edition, Road Housing & Urban Development Research Center.
- [23] Etab 9.7.4 Documentation User’s Guide