

## مدل‌سازی نگاشت انفجار در میدان نزدیک و بررسی پارامترهای مهم و مؤثر بر آن

احمد سدیدخوی<sup>۱\*</sup>، موسی‌الرضا سعیدنژاد<sup>۲</sup>، غلام‌جوان دولوئی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۰۲، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۰۱)

## چکیده

در این مطالعه قصد بر آن است با برداشت نگاشت‌های حاصل از یک‌سری انفجار آزمایشی تک‌چال، و استفاده از آنها برای مقایسه با نگاشت‌های مصنوعی مدل‌شده براساس داده‌های همان انفجارها، میزان تطابق این مدل‌ها با واقعیت به حداکثر رسانده شود. منظور از این کار، داشتن پیش‌زمینه‌ای از نتیجه انفجار قبل از انجام آن، در طرح‌های مشابه، با در دسترس داشتن اطلاعات زمین‌شناختی و ساختگاه منطقه بوده است. در انجام این بررسی، ابتدا پس از شناخت دقیق زمین‌شناسی و ساختگاه منطقه، یک مدل سرعتی به‌عنوان بهترین مدل سرعتی زمین انتخاب شده و پس از اختیار روش مناسب برای فرآیند مدل‌سازی، داده‌های لازم برای آن روش به‌عنوان ورودی کار جمع‌آوری و تهیه می‌شود. در مراحل بعد، با چندین بار اجراء و همچنین تغییر پارامترهای دخیل در مدل‌سازی، به کمینه‌سازی اختلاف مدل مصنوعی و نگاشت واقعی پرداخته می‌شود. در این مقاله، مقایسه دو نگاشت واقعی و مصنوعی، در حوزه زمان و باد دو معیار متفاوت انجام شده است:

۱- مقایسه انحراف معیار اختلاف  $L_n$  نگاشت‌ها به‌صورت یک‌به‌یک؛

۲- مقایسه بیشینه دامنه همبستگی نگاشت‌ها با یکدیگر.

در نتیجه این مقایسه‌ها، چنانچه انحراف معیار بین ۱ تا ۱/۵ بیانگر مدل‌سازی خوب، انحراف معیار بین ۱/۵ تا ۲ بیانگر مدل‌سازی متوسط و انحراف معیار بیشتر از ۲ بیانگر مدل‌سازی ضعیف در نظر گرفته شوند، از نظر کیفی، ۴۵٪ مدل‌های ساخته‌شده، تطابق خوب، ۴۰٪ آنها تطابق متوسط و ۱۵٪ نگاشت‌ها تطابق ضعیفی با داده‌های واقعی داشته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** انفجار، نگاشت مصنوعی، مدل سرعتی، حوزه زمان، انحراف معیار، همبستگی

## ۱ مقدمه

زیادی در ساخت، نوع، شکل مواد منفجره و چگونگی بهره‌مندی از آنها حاصل شده است تا بتوان انفجار را ایمن‌تر و با سهولت و کارایی بیشتر اجراء کرد. به‌طور کلی در انفجار از انرژی یک ماده منفجره برای شکستن و جابه‌جا کردن توده سنگی یا خاکی استفاده می‌شود؛ بنابراین یافتن راه‌هایی برای استفاده بهینه از این انرژی برای انجام کار مفید، مورد نظر محققان بوده است.

عملیات انفجار در استخراج معادن و کارهای عمرانی جزء اصلی و مطرح هر چرخه عملیاتی هستند. دلیل کاربرد گسترده انفجار در این عملیات‌ها، مسائل اقتصادی و جنبه کاربردی آن است. نسبت به روش‌های مکانیکی دیگر، با توجه به حجم تخریبی که در برمی‌گیرد، انفجار از نظر اقتصادی باصرفه‌تر است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های

گروهی و یا تنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مثال، هاگن و کندی (۱۹۸۱) و ماتیو (۱۹۸۴) اثر نوع ماده منفجره را بررسی کرده‌اند. بِلر و جیانگ (۱۹۹۵) بررسی - های خود را بر روی طول خرج متمرکز کرده‌اند. میلنکوف (۱۹۶۹) تحقیقاتی روی خرج‌گذاری منقطع انجام داده است. همچنین اثر جهت شروع انفجار بر روی لرزش را فوگت و سینگ (۱۹۹۸) در معادن سنگ آهک بررسی کرده است (امرا، ۱۳۹۱).

روش‌های پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار را نیز افراد زیادی مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند و روابط زیادی در این زمینه ارائه شده است. اولین پژوهش‌ها در این زمینه در سال ۱۹۳۰ توسط اداره معادن آمریکا انجام شده است (اصانلو، ۱۳۷۴). پژوهشگران زیادی با توجه به معیارهای گوناگون روابطی را ارائه داده‌اند. پژوهشگرانی مانند بلیر و دووال (۱۹۴۵)، لانگفوسر و وستبرگ (۱۹۵۸) بر روی سرعت ذرات ناشی از انفجار پژوهش کرده‌اند. گوش - دیمن (۱۹۸۳) مدل ارائه شده توسط اداره معادن آمریکا را تغییر داد. پالروی (۱۹۹۱) روابط خود را با توجه به طبقات مختلف سازه مطرح کرد و در سال ۱۹۹۸ مدل‌هایی را با توجه به نوع فعالیت معدنی و تأثیر آن بر سازه‌های سطحی ارائه داد (امرا، ۱۳۹۱).

یکی از پارامترهایی هم که مورد پژوهش قرار گرفته، میزان تأخیر است. با پیشرفت در سامانه‌های تأخیر میلی - ثانیه‌ای، گام‌های مؤثری در مهار انفجار و لرزش ناشی از آن برداشته شده است. در مورد تأخیر نیز پژوهش‌های زیادی انجام شده و میزان بهینه آن را پژوهشگران مختلف بررسی کرده‌اند. دووال (۱۹۶۳) براساس مطالعات خود در معادن سنگ آهک فاصله‌های تأخیر ۸ و ۹ میلی‌ثانیه را پیشنهاد کرده است. از طرفی ویس و لاین‌هن (۱۹۷۸) نشان داده‌اند که استفاده از تأخیر نظری ۱۷ میلی‌ثانیه اثر افزایش لرزش‌ها را از بین می‌برد. همچنین جوردویچ (۱۹۹۷) مقاله‌ای راجع به کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی

در هنگام انفجار تمام انرژی ماده منفجره صرف کار مطلوب و مورد نظر نمی‌شود و علاوه بر محدوده مورد نظر، انفجار بر محدوده وسیعی از اطراف محل نیز اثر می‌گذارد که اغلب این اثرات، نامطلوب و مخرب هستند. در میان این اثرات می‌توان از لرزش هوا، لرزش زمین و پرتاب سنگ نام برد. از میان آنها اثر لرزش زمین دارای اهمیت خاصی است، زیرا تقریباً بیشترین میزان انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. در مکان‌هایی که انفجار در نزدیک مناطق مسکونی، سازه‌ها و شریان‌های حیاتی انجام می‌شود، لرزش به صورت یک پدیده نامطلوب بر ساکنان و تجهیزات و سلامت سازه‌ها اثر می‌گذارد. همچنین در مناطق دورتر، لرزش زمین بر روی پایداری توده‌های سنگی اطراف و همچنین تأسیسات موجود منطقه مؤثر است. برای کاستن از اثرات ناشی از لرزش زمین و برای محافظت از سازه‌های مختلف، محققان در زمینه‌های مختلف به پژوهش پرداخته‌اند. فعالیت پژوهشی آنان را می‌توان در دو زمینه زیر خلاصه کرد:

- ۱) کاهش میزان لرزش ناشی از انفجار،
- ۲) پیش‌بینی میزان لرزش و به دست آوردن روش بهینه برای انجام انفجار.

البته دو مورد ذکر شده در بالا در اکثر اوقات در کنار هم مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب که با پیش‌بینی لرزش، معیاری از میزان خسارت به دست می‌آید که در صورت نیاز، موضوع کاهش لرزش مطرح می‌شود و باید راه‌هایی برای کمینه کردن آن ارائه شود. موضوع اصلی در مورد کاهش لرزش زمین ناشی از انفجار، بحث و بررسی پارامترهای مؤثر بر انفجار و تأثیر هر کدام بر میزان لرزش ایجاد شده از آن است. بنابراین تحقیقات زیادی در مورد اثر این پارامترها صورت گرفته است. اداره معادن آمریکا از جمله مکان‌هایی است که در آن افراد مختلف تحقیقات گسترده‌ای روی این موضوع انجام داده‌اند. این پارامترها در حالات مختلف به صورت

یک روز استفاده شد. با توجه به یکسان و یک مدل بودن لرزه‌نگارها و رقمی‌سازها، می‌توان اطمینان داشت که پاسخ به‌دست آمده از آنها همسان باشند. توزیع دستگاه-های لرزه‌نگار در پیرامون محل انفجار و لوله‌های گاز به-گونه‌ای بود که سه مؤلفه الگوی تابش انرژی لرزه‌ای انفجار در سه راستای قائم، شعاعی و عرضی ثبت می‌شد و همواره یک مؤلفه (مؤلفه شعاعی) در راستای محل انفجار قرار می‌گرفت. همچنین فاصله بین دو نمونه متوالی در هنگام رقمی کردن ۱۰ میلی‌ثانیه تعیین شد، یعنی تعداد ۱۰۰ نمونه بر ثانیه برداشت شده است (ریاحی و سدیدخوی، ۱۳۹۰).

هدف از این چیدمان لرزه‌نگارها، تعیین الگوی تابش انفجار و تأثیر بیشینه سرعت جابه‌جایی ذرات حاصل از این انفجارها بر روی لوله‌های گاز بوده است. این آرایه طوری انتخاب شده است تا راستای بین موقعیت لوله‌های گاز و موقعیت انفجار را دربرگیرد. لرزه‌سنج‌های سه مؤلفه‌ای در ایستگاه‌ها طوری نصب شده‌اند که یک مؤلفه افقی آن (مؤلفه N) به‌طرف محل انفجار و مؤلفه افقی دیگر (مؤلفه E) در امتداد عمود بر راستای مذکور و مؤلفه سوم (مؤلفه Z)، قائم بر سطح زمین بوده است (ریاحی و سدیدخوی، ۱۳۹۰).

## ۲-۲- روش‌های محاسبه و ارزیابی

### ۲-۲-۱- محاسبه تابع گرین

مفهوم فیزیکی این توابع، در واقع پاسخ محیط به ضربه است. این توابع مختصات سه‌بُعدی داشته و آنچه را که در زمین در اثر عبور امواج رخ می‌دهد، منعکس می‌کنند. نگاشت‌ها تصاویر این تابع سه‌بُعدی و سازوکار چشمه، در سه راستای شمال- جنوب، شرق- غرب و قائم هستند. در ادامه، محاسبه تابع گرین موردنظر (چشمه انفجاری نقطه‌ای) از دو مرجع معتبر ذکر شده است (سعیدنژاد، ۱۳۹۲):

لرزش زمین ارائه داده که بحث اصلی آن بر روی پارامتر تأخیر است (پورقاسمی، ۱۳۷۹).

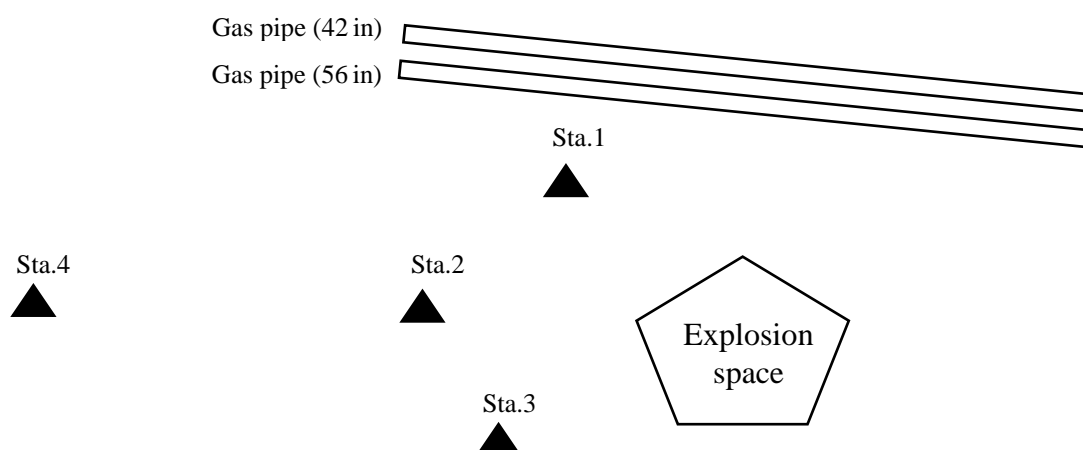
همچنین مدل‌سازی نگاشت‌های امواج ناشی از انفجار و کمینه‌سازی خطای آن در مقایسه با واقعیت یکی از راه-های موجود برای بررسی اثرات مخرب ناشی از انفجار می‌باشد که کمتر از آن استفاده شده است. استفاده از این روش نیاز به نتایج لرزه‌ای حاصل از انفجار تک‌چال دارد. به‌علاوه، برای مدل‌سازی به استفاده از نرم‌افزارهای رایانه-ای و یا برنامه‌نویسی نیاز است. با استفاده از این روش می-توان تأثیر عمق چشمه، فاصله از چشمه و نوع ساختار زمین را بر لرزش ناشی از انفجار به‌خوبی بررسی کرد. در پژوهش حاضر، از برنامه Computer Programs In Seismology (Version 3.30) که در سال ۲۰۰۲ میلادی، پرفسور هرمن از دانشگاه سنت لوئیس آمریکا به زبان فورترن نگاشته و تحت سیستم عامل لینوکس است، بهره‌مند شده‌ایم.

## ۲ روش پژوهش

### ۲-۱- روش‌شناسی و چگونگی برداشت داده‌ها

در این مقاله از داده‌های برداشت‌شده حین اجرای طرح احداث راه‌آهن سریع السیر قم-اصفهان، استفاده شده است. این داده‌ها در تاریخ ۱۳۹۰/۷/۳۰ در کیلومتر ۲۴ این مسیر ریلی برداشت شده‌اند. در این روز تعداد پنج انفجار با الگوهای متفاوت در محدوده خطوط لوله‌های گاز انجام و لرزش حاصل از این انفجارها با چهار دستگاه لرزه‌نگار ثبت گردید. موقعیت این چهار دستگاه لرزه‌نگار به‌همراه موقعیت لوله‌های گاز در شکل ۱ نشان داده شده است. هر چهار دستگاه لرزه‌نگار در حوالی لوله‌های گاز و تحت عنوان Sta1 تا Sta4 نصب و راه‌اندازی شد (ریاحی و سدیدخوی، ۱۳۹۰).

در این طرح از چهار دستگاه لرزه‌نگار رقمی از نوع CMG-6TD ساخت شرکت گورالپ انگلستان در مدت



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های لرزه‌نگار و انفجارها نسبت به خطوط لوله‌های گاز (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

در این جا،  $PEX$  میدان فشار را در یک مایع در اثر انفجار نشان می‌دهد، که با استفاده از وارون تبدیل فوریه می‌توان این توابع گرین را به راحتی محاسبه کرد. در رابطه (۲)،  $M_I$  گشتاور همسانگرد،  $S(\omega)$  تبدیل فوریه تابع زمانی چشمه و پارامتر  $R$  نشان‌دهنده فاصله است. قرار گرفتن  $R$  در مخروط کسر بیانگر گسترش هندسی شکل موج می‌باشد (هرمن و وانگ، ۱۹۸۵).

برای یک چشمه نقطه‌ای انفجاری در مبدأ، بردار جابه‌جایی با گرفتن واگرایی از تابع گرین با در نظر گرفتن مختصات چشمه به دست می‌آید. از آنجا که برای توابع  $\phi$ ،  $g$  و  $\psi$  داریم:  $\nabla = -\nabla$ ، در نتیجه (دانگ و اشمیت، ۱۹۹۳):

$$u = -\hat{z} \frac{\partial}{\partial z} (L_i \phi) - \nabla_i (L_i \phi) + (c_{13} + c_{44}) \left( \nabla_i^2 \hat{z} + \frac{\partial}{\partial z} \nabla_i \right) \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3)$$

در معادله (۳)،  $L_i \phi = \nabla_i^2 \psi + g$ ، تاو (کرل)  $u$  می‌شود (دانگ و اشمیت، ۱۹۹۳):

$$\nabla \times u = \nabla_i \times \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \left[ (c_{13} + 2c_{44} - c_{11}) \nabla_i^2 + (c_{33} - c_{13} - 2c_{44}) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \phi \quad (4)$$

اولین مرجع ذکر شده هرمن و وانگ (۱۹۸۵) می‌باشد که در محاسبات تابع گرین این مقاله از آن استفاده شده است. برای چشمه انفجار، جابه‌جایی‌ها به صورت رابطه (۱) خواهد بود (هرمن و وانگ، ۱۹۸۵):

$$\begin{aligned} u_z &= ZEX, \\ u_r &= REX, \\ u_\phi &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن،  $ZEX$  و  $REX$  به ترتیب مؤلفه‌های قائم و شعاعی جابه‌جایی ذرات در انفجار هستند. در این حالت چنانچه تابع زمانی چشمه،  $S(t)$ ، را یک تابع پله‌ای به مساحت واحد در نظر بگیریم، تبدیل فوریه توابع گرین  $ZEX$ ،  $REX$  و  $PEX$  مطابق رابطه (۲) خواهد شد (هرمن و وانگ، ۱۹۸۵):

$$\begin{aligned} ZEX &= \frac{M_I S(\omega)}{4\pi r \alpha^2} e^{-i\omega R / \alpha} \left[ \frac{h}{R^2} + \left( \frac{i\omega}{\alpha} \right) h / R^2 \right], \\ REX &= \frac{M_I S(\omega)}{4\pi r \alpha^2} e^{-i\omega R / \alpha} \left[ \frac{r}{R^2} + \left( \frac{i\omega}{\alpha} \right) r / R^2 \right], \\ PEX &= \frac{M_I (i\omega)^2 S(\omega)}{4\pi r \alpha^2} \frac{1}{R} e^{-i\omega R / \alpha}. \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن،  $\mu = (1/N) \sum_{i=1}^N X_i$  میانگین اختلاف لگاریتم طبیعی (Ln) داده‌های نگاشت‌های واقعی و نگاشت‌های مدل شده امواج است. همچنین،  $N$  تعداد کل داده‌ها و  $X_i$  بیانگر مقدار داده  $i$ ام است. طبق این رابطه و تعریف انحراف معیار در علم آمار، هرچه این مقدار در محاسبات به ۱ نزدیک‌تر باشد، میزان خطا در محاسبات کمتر است.

روش دوم، محاسبه همبستگی بین نگاشت‌های واقعی و مدل است که با تقسیم به حاصل ضرب جذرهای مقدار بیشینه خودهمبستگی هر نگاشت، آن را بهنجار کرده و سپس میزان بیشینه آن را به دست می‌آوریم. این محاسبات مطابق رابطه (۷) انجام شده است (سعیدنژاد، ۱۳۹۲):

$$\text{Max}(\bar{\phi}_{xy}) = \frac{\phi_{xy}}{\sqrt{\text{Max}(\phi_{xx})} \times \sqrt{\text{Max}(\phi_{yy})}} \quad (7)$$

در رابطه بالا، متغیرهای  $x$  و  $y$  به ترتیب معرف نگاشت‌های واقعی و مصنوعی بوده و تابع همبستگی با  $\phi$  نشان داده شده است.

### ۲-۳- تعریف مدل سرعتی و پارامترهای فاصله

پس از بررسی‌های محاسباتی و میدانی انجام شده، ابتدا مدلی چهارلایه‌ای با مشخصاتی که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای منطقه پیشنهاد شد (با فرض نسبت پواسون ۰/۲۵). با وارد کردن این پارامترها در الگوی مدل سرعتی برای پوسته و تهیه یک فایل حاوی پارامترهای فاصله، تمامی پنج روش را به ترتیب اجراء کرده تا هم از صحت نصب برنامه و هم از نکات ریز و کلیدی خاص روش‌ها آگاهی کامل کسب کنیم.

برای یک چشمه انفجاری در میانه یک محیط همسانگرد متقاطع، تاو میدان جابه‌جایی صفر نیست. این امر بدان معناست که چشمه انفجاری علاوه بر موج  $P$ ، موج  $S_v$  را هم ایجاد می‌کند. در محدوده همسانگرد،  $c_{11} = c_{33} = c_{13} + 2c_{44}$ ، تاو میدان جابه‌جایی در یک چشمه انفجاری صفر است که نشان می‌دهد در این حالت فقط موج فشاری به وجود می‌آید. پس (دانگ و اشمیت، ۱۹۹۳):

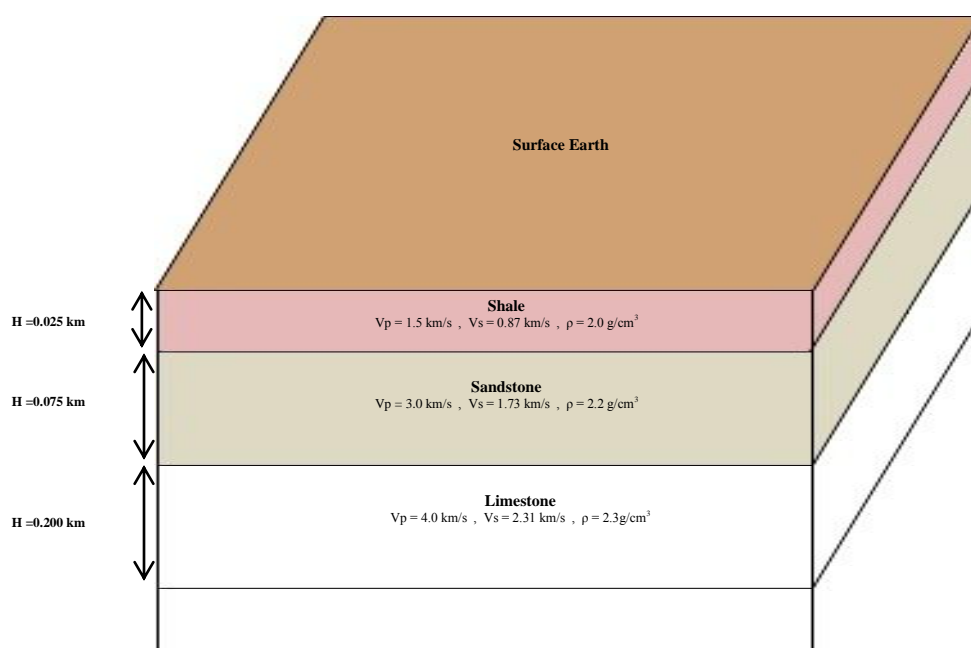
$$U_r = \frac{i}{4\pi} \int_0^\infty [(S_{ab}v_a + T_a)e^{i v_r |z|} - (S_{ab}v_b + T_b)e^{i v_r |z|}] k^2 J_1(kr) dk,$$

$$U_z = \frac{\text{sgn}(z)}{4\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{(S_b v_b - S_{ab} k^2) e^{i v_b |z|}}{(S_a v_a - S_{ab} k^2) e^{i v_a |z|}} - 1 \right] k J_0(kr) dk \quad (8)$$

در محدوده همسانگرد،  $S_{ab} + T_b = 0$  و  $S_b v_b - S_{ab} k^2 = 0$  است. سهم موج  $S_v$  از جابه‌جایی به صفر می‌رسد. جابه‌جایی متناسب با شیو (گرادیان)  $\phi$  کاهش می‌یابد (دانگ و اشمیت، ۱۹۹۳).

۲-۲- محاسبه معیارهای اندازه‌گیری خطای مدل‌سازی در این مطالعه، از دو روش برای اندازه‌گیری میزان خطای محاسبات و مدل‌سازی استفاده کرده‌ایم. اولین روش، به دست آوردن انحراف معیار از اختلاف لگاریتم طبیعی (Ln) داده‌های نگاشت‌های واقعی و نگاشت‌های مدل شده امواج نسبت به هم است. همان‌طور که می‌دانید، این معیار یک شاخص آماری بوده و مطابق رابطه (۶) برای یک سری از داده‌ها محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (6)$$



شکل ۲. مدل سرعتی زمین مورد بررسی در این مطالعه (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

جدول ۱. فاکتور کیفیت لایه های زمین مورد مطالعه (محمی الدین و همکاران، ۲۰۰۱).

	$Q_p$	$Q_s$
Shale	۳۰/۲	۹/۰
Sandstone	۵۸/۰	۳۱/۳
Limestone	۱۷/۶	۱۶/۰
Halfspace	۲۳/۰	۱۷/۶

بعد از تعیین فاکتور کیفیت از مراجع مذکور، دو مؤلفه دیگر پارامترهای میرایی که لازم است، مطابق رابطه (۹) محاسبه شده (هرمن، ۲۰۰۶):

$$Q_v(f) = Q_v(f/f_v)\eta_v, Q_v = Q_p \text{ or } Q_s \text{ \& } f_v = f_p \text{ or } f_s$$

(۹)

و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. شایان ذکر است که در این مطالعه نتایج دو مدل سرعتی دیگر نیز با تغییر دادن فقط سرعت امواج به میزان  $\pm 0.5$

مدل سرعتی شامل اطلاعات کامل و جامعی از مدل

پوسته و زمین موردنظر کاربر است. در فایل پوسته، از خطوط اولیه که بگذریم، به مشخصات لایه های زمین شامل ضخامت، چگالی، سرعت امواج  $P$ ،  $S$  و پارامترهای میرایی می رسیم.

در این مقاله برای تعیین سرعت امواج در لایه های مختلف و همچنین چگالی آنها از جداول مرجع و روابط (۸) استفاده شده، که برحسب سرعت موج  $P$  است (اودیاس، ۱۹۹۹):

$$\begin{aligned} V_p &= \sqrt{3}V_s, \\ \rho &= 0.32V_p + 0.77. \end{aligned} \quad (۸)$$

نتایج حاصل از این روابط در شکل ۲ ارائه شده است. پارامتر بعدی فاکتور کیفیت ( $Q$ ) برای امواج مختلف در لایه های زمین با جنس های متفاوت است که مطابق جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۳ تعداد نمونه‌های ورودی به دستگاه نشان داده شده است که از روی آن می‌توان نتیجه گرفت، هرچه ایستگاه به چشمه انفجار نزدیک‌تر باشد، گیرنده تعداد نمونه بیشتری ثبت می‌کند. کاهش این پارامتر سبب تفکیک و وضوح بیشتر صعود و نزول‌ها در شکل موج شده و تغییر آن روی دامنه موج هیچ تأثیری ندارد.

جدول ۳. NPTS‌های محاسبه شده برای مدل سازی شکل موج انفجارها.

	Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4
<b>Blast.1</b>	$\tau^{11} = 2048$	$\tau^{12} = 76536$	$\tau^4 = 512$	$\tau^{12} = 33768$
<b>Blast.2</b>	$\tau^{11} = 2048$	$\tau^{12} = 33768$	$\tau^{11} = 1024$	$\tau^{12} = 16384$
<b>Blast.3</b>	$\tau^{11} = 2048$	$\tau^{12} = 16384$	$\tau^{11} = 1024$	$\tau^{12} = 16384$
<b>Blast.4</b>	$\tau^{11} = 2048$	$\tau^{12} = 16384$	$\tau^4 = 512$	$\tau^{12} = 16384$
<b>Blast.5</b>	$\tau^{11} = 2048$	$\tau^{12} = 16384$	$\tau^{11} = 1024$	$\tau^{12} = 16384$

برای بررسی تأثیر میزان انرژی تولیدی انفجار بر نگاشت‌ها، از زمان ورود اولین نمونه ( $T_0$ ) که روی دامنه امواج تأثیر مثبت دارد استفاده می‌کنیم. دامنه امواج از میزان انرژی آزاد شده در انفجار تأثیر مستقیم می‌پذیرد. پس می‌توان گفت که با داشتن بیشینه دامنه و مقدار و نوع ماده ناریه، میزان انرژی آزاد شده با یک تناسب ساده و با روابط مرجع بزرگی معادل به دست می‌آید. در این بررسی بعد از تصحیحات انجام گرفته، میزان بیشینه دامنه در ایستگاه‌های مختلف محاسبه و سپس از طریق رابطه (۱۰):

$$M_L = \log A + 2.56 \log D - 1.67, \quad (10)$$

داشتن فاصله رومرکزی، بزرگی معادل در مقیاس  $M_L$  تعیین و با جای‌گذاری نتیجه در رابطه (۱۱) برطبق گوتمبرگ و ریشر (۱۹۵۶):

$$\log T_0 = 0.1 M_L - 1.1, \quad (11)$$

میزان  $T_0$  محاسبه شد. در روابط مذکور، دامنه برحسب  $\mu\text{m}$  و فاصله رومرکزی برحسب km با قیده‌های  $M_L < 7$  و  $D < 600$  اعمال شده است (گوتمبرگ و ریشر، ۱۹۵۶).

کیلومتر بر ثانیه بررسی شده است. شایان ذکر است که شکل موج‌های حاصل از مدل سرعتی فوق بهترین تطابق را با امواج واقعی داشتند.

جدول ۲. پارامترهای میرایی لایه های زمین مورد مطالعه (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

$f_s$	$f_p$	$\eta_s$	$H$	
۳/۰	۵/۵	۲/۰	۲/۰	Shale
۵/۶	۷/۶	۲/۰	۲/۰	Sandstone
۴/۰	۴/۲	۲/۰	۲/۰	Limestone
۴/۲	۴/۸	۲/۰	۲/۰	Halfspace

فایل پوسته فقط شامل ضخامت، سرعت و چگالی لایه‌ها و فایل فاصله فقط شامل فاصله ایستگاه‌ها از محل هر انفجار است. لازم به توضیح است که در این کار با داشتن پنج انفجار و چهار ایستگاه، پنج فایل فاصله شامل فاصله هر ایستگاه تا محل همان انفجار به تفکیک، تهیه شد (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

پس از تولید نگاشت‌های اولیه با هر پنج روش ممکن برای مدل‌سازی، هر کدام از روش‌ها خصوصیات، معایب و مزایای خاصی داشتند که به انتخاب هرچه بهتر ما در نیل به روشی مناسب‌تر با پارامترهای ورودی کارمان کمک می‌کرد. سرانجام، پس از بررسی‌ها روش مدل‌سازی با انتگرال عدد موج برای داده‌های این طرح مناسب تشخیص داده شد (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

پس از انتخاب روش مدل‌سازی و تعریف مدل سرعتی پوسته مطابق با منطقه، نوبت به تهیه پارامترهای فاصله در قالب یک فایل می‌رسد که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود.

فایل فاصله شامل پنج ستون داده به شرح زیر است (هرمن، ۲۰۰۶):

- Distance;
- DT;
- NPTS;
- T0
- VRED

زمین به برنامه داده و نگاشت‌های تولیدی با مدل واقعی مقایسه شده است (شکل‌های ۳ و ۴).

پس از بررسی‌های انجام شده، در راستای درستی-سنجی مدل سرعتی پیشنهادشده بر روی زمین مورد مطالعه، برای اطمینان از دقت بودن عمق چشمه و همچنین مطالعه تأثیر این پارامتر بر نگاشت تولیدی، عمق چشمه با اعمال تغییر  $\pm 0/5$  متری در دستور مربوطه به برنامه داده و نگاشت‌های تولیدی با مدل واقعی مقایسه شده است (شکل‌های ۵ و ۶).

مطابق جدول ۵، اگر انحراف معیار بین ۱ تا ۱/۵ معرف مدل‌سازی خوب (طبق تعریف انحراف معیار، در این بازه نزدیک‌ترین مقادیر به ۱ و داده‌ها حداقل خطا را دارا می‌باشند)، انحراف معیار بین ۱/۵ تا ۲ معرف مدل‌سازی متوسط و انحراف معیار بیشتر از ۲ معرف مدل‌سازی ضعیف در نظر گرفته شود، از نظر تطابق با داده‌های واقعی، در میان مدل‌های ساخته‌شده، ۴۵٪ خوب، ۴۰٪ متوسط و ۱۵٪ ضعیف بوده‌اند.

بنابه توضیحات فوق، نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شده است. ستون پنجم، پارامتر VRED است. مطابق هرمن (۲۰۰۲)، اگر  $T_0$  زمان ثبت اولین نمونه فرض شود، مقدار  $VRED = 0$  خواهد بود. مطالعه حاضر با همین پیش‌فرض انجام گرفته است (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

### ۳ نتیجه‌گیری

در این طرح، نگاشت حاصل از پنج انفجار در چهار ایستگاه، هر کدام شامل سه مؤلفه قائم  $(Z)$ ، شعاعی  $(R)$  و مماسی  $(T)$ ، به‌روش ذکر شده در بخش‌های قبل تولید شد. لازم به ذکر است که مؤلفه شعاعی در راستای محل انفجار و مؤلفه مماسی در امتداد عمود بر محل انفجار در نظر گرفته شده است. در مجموع شصت نگاشت مصنوعی تولید شده است (سعیدنژاد، ۱۳۹۲).

در این طرح، برای درستی‌سنجی مدل سرعتی پیشنهادشده برای زمین مورد مطالعه و بررسی تأثیر آن بر نگاشت تولیدی، دو مدل سرعتی دیگر نیز با تغییر  $\pm 0/5$  کیلومتر بر ثانیه‌ای در سرعت امواج  $P$  و  $S$  در قالب فایل

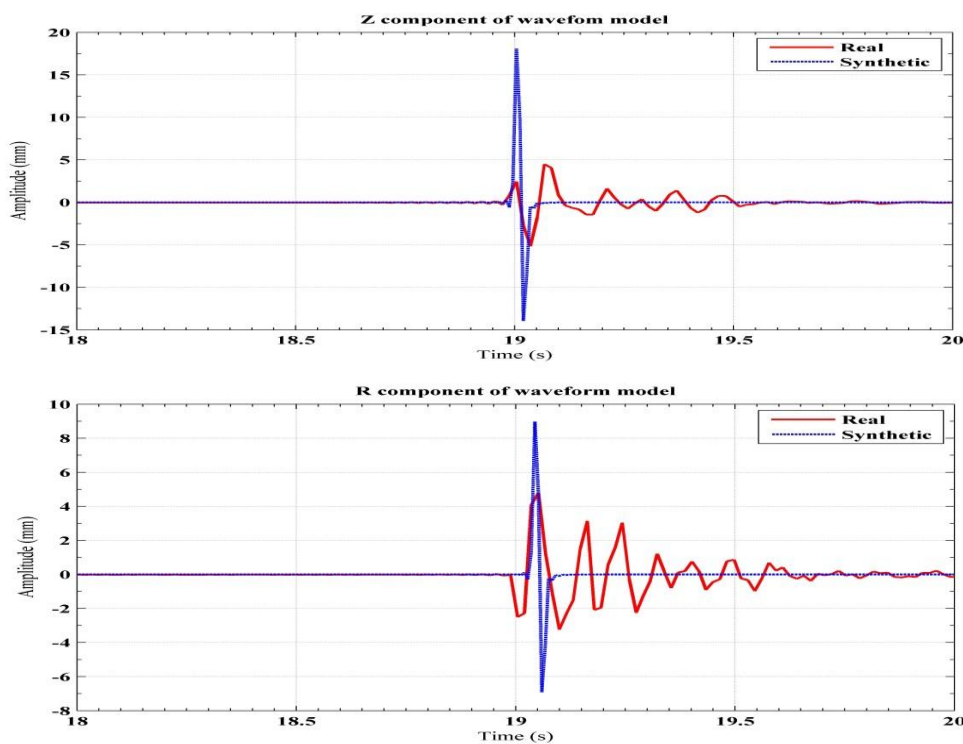
جدول ۴. نتایج تأثیر انرژی در مدل‌سازی نگاشت انفجار.

	Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4
	<b>D (km)</b>			
<b>Blast.1</b>	۰/۱۲۴	۰/۰۳۰	۰/۱۰۲	۰/۱۱۲
<b>Blast.2</b>	۰/۱۱۹	۰/۰۳۴	۰/۱۰۸	۰/۱۱۶
<b>Blast.3</b>	۰/۱۰۷	۰/۰۲۹	۰/۱۱۸	۰/۱۱۱
<b>Blast.4</b>	۰/۱۰۵	۰/۰۳۴	۰/۱۲۲	۰/۱۱۵
<b>Blast.5</b>	۰/۱۱۲	۰/۰۳۳	۰/۱۱۵	۰/۱۱۶
	<b><math>A_{max}</math> (<math>\mu m</math>)</b>			
	۶۶۰۲/۵۷۶	۶۶۹۲/۹۶۱	۶۵۵۳/۲۸۸	۶۵۲۴/۰۳۹
	<b><math>T_0</math></b>			
	۰/۰۷۶۴	۰/۰۵۳۲	۰/۰۷۲۶	۰/۰۷۴۳
	۰/۰۷۵۶	۰/۰۵۴۹	۰/۰۷۳۷	۰/۰۷۵۰
	۰/۰۷۳۵	۰/۰۵۲۷	۰/۰۷۵۳	۰/۰۷۴۱
	۰/۰۷۳۲	۰/۰۵۴۹	۰/۰۷۶۰	۰/۰۷۴۸
	۰/۰۷۴۴	۰/۰۵۴۵	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۵۰



جدول ۵. مقادیر انحراف معیار اختلاف لگاریتم طبیعی دامنه نگاشت‌های مصنوعی با واقعی.

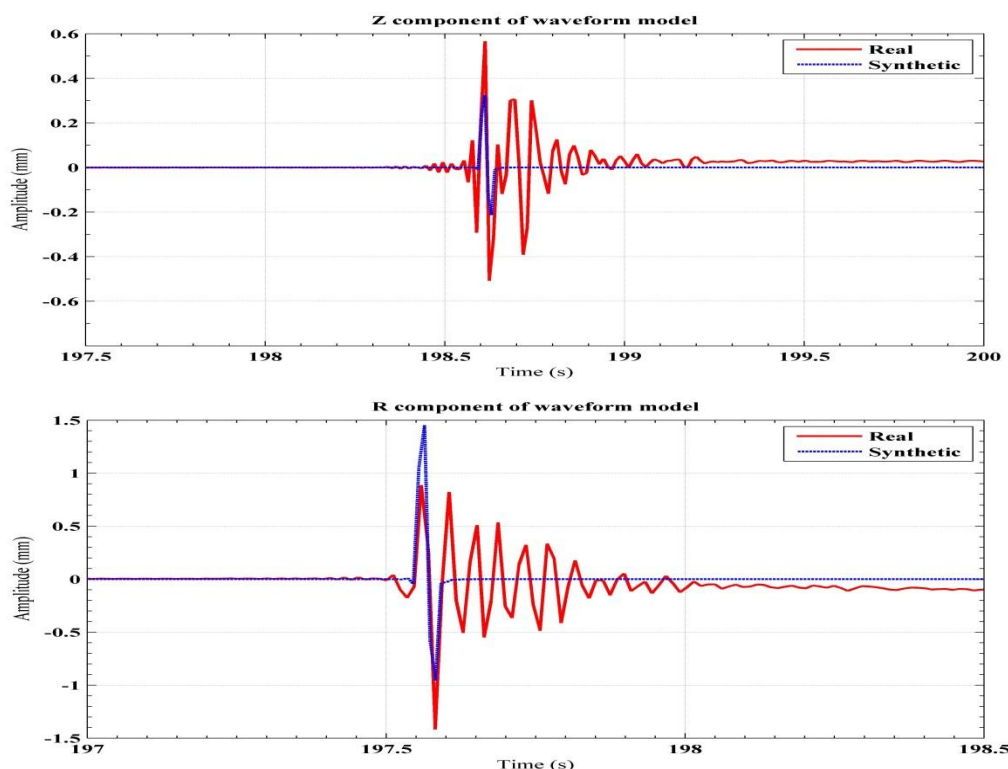
	Sta1	Sta2	Sta3	Sta4
Blast1	Z = ۱/۳۴۰۱	Z = ۱/۷۶۵۴	Z = ۲/۳۳۵۶	Z = ۱/۱۰۰۰۰
	R = ۱/۶۰۴۷	R = ۱/۱۴۷۷	R = ۲/۳۳۹۰	R = ۱/۴۰۷۸
Blast2	Z = ۱/۷۸۱۱	Z = ۱/۰۰۲۴	Z = ۱/۶۵۵۲	Z = ۱/۰۰۰۱
	R = ۱/۷۲۱۴	R = ۱/۰۰۶۹	R = ۱/۷۸۲۱	R = ۱/۲۵۷۴
Blast3	Z = ۱/۱۲۶۰	Z = ۱/۶۶۰۳	Z = ۱/۷۹۶۶	Z = ۱/۰۰۰۰
	R = ۱/۸۸۱۵	R = ۱/۰۰۹۰	R = ۲/۳۵۴۵	R = ۱/۱۹۶۸
Blast4	Z = ۱/۶۰۳۶	Z = ۱/۷۲۳۹	Z = ۱/۹۹۷۵	Z = ۱/۰۰۱۱
	R = ۱/۰۰۶۵	R = ۱/۱۱۵۱	R = ۲/۲۱۸۳	R = ۲/۲۶۶۱
Blast5	Z = ۱/۶۳۹۴	Z = ۱/۰۰۰۲	Z = ۱/۸۹۳۴	Z = ۱/۱۴۳۶
	R = ۱/۵۸۵۲	R = ۱/۱۳۴۰	R = ۱/۹۵۶۳	R = ۱/۳۶۵۹



شکل ۳. مقایسه نگاشت‌های مصنوعی و واقعی در دو مؤلفه Z و R با کاهش سرعت امواج، انفجار اول ثبت شده در ایستگاه شماره ۱.

جدول ۶. فواصل رومرکزی چشمه انفجار تا گیرنده (فواصل برحسب کیلومتر هستند).

	Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4
Blast.1	۰/۱۲۴	۰/۰۳۰	۰/۱۰۲	۰/۱۱۲
Blast.2	۰/۱۱۹	۰/۰۳۴	۰/۱۰۸	۰/۱۱۶
Blast.3	۰/۱۰۷	۰/۰۲۹	۰/۱۱۸	۰/۱۱۱
Blast.4	۰/۱۰۵	۰/۰۳۴	۰/۱۲۲	۰/۱۱۵
Blast.5	۰/۱۱۲	۰/۰۳۳	۰/۱۱۵	۰/۱۱۶



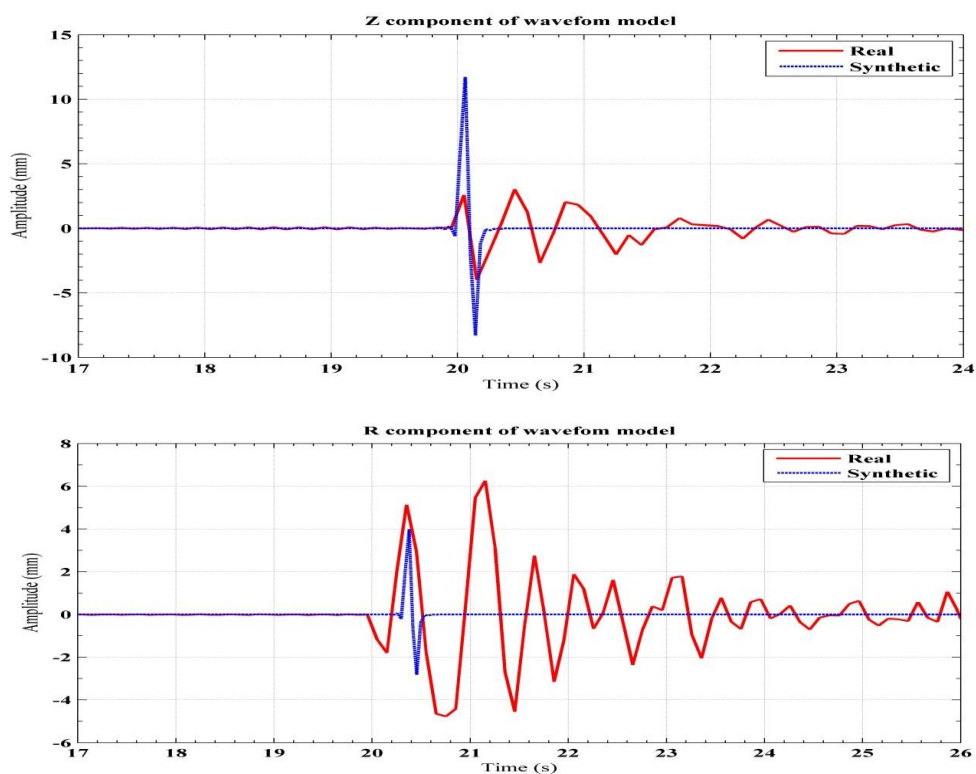
شکل ۴. مقایسه نگاشت های مصنوعی و واقعی در دو مؤلفه  $Z$  و  $R$  با افزایش سرعت امواج، انفجار اول ثبت شده در ایستگاه شماره ۴.

افزار مورد استفاده، پنج روش مدل سازی قابلیت اجرا دارد که بعضاً در برخی از ایستگاه ها نتایج متفاوت و بهتری نشان می دادند، اما در مجموع شصت نگاشت شبیه سازی شده، روش مذکور بیشترین تعداد مدل سازی خوب را به دست می دهد.

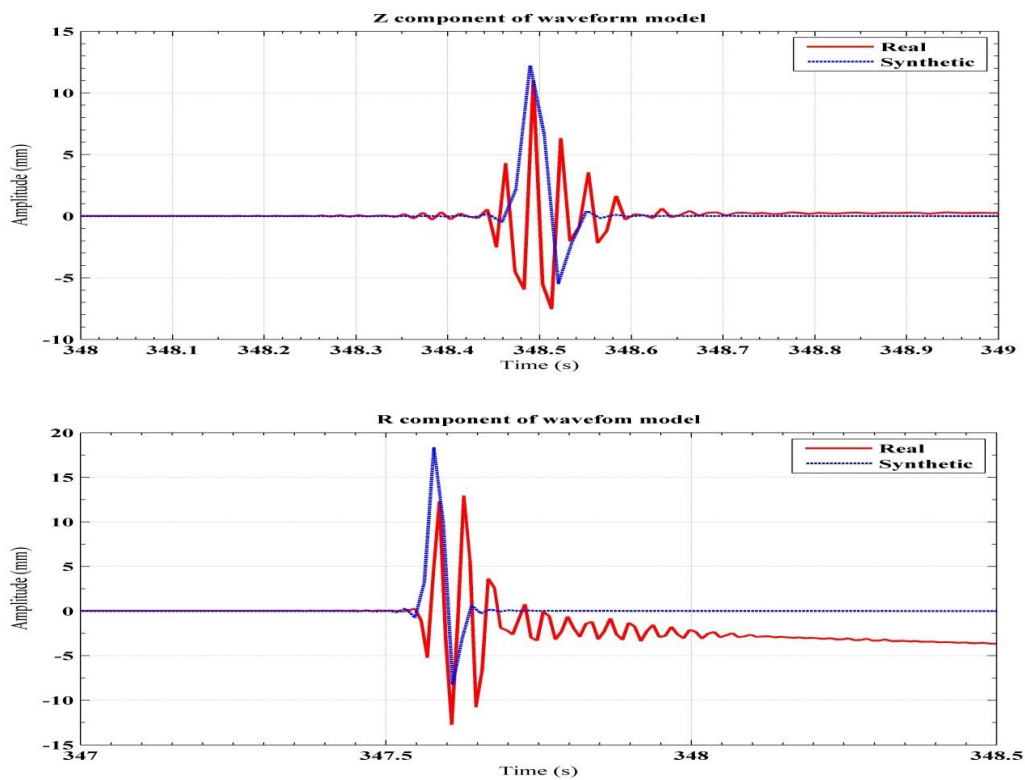
معیار بعدی که برای مقایسه نگاشت ها از آن استفاده شد، محاسبه بیشینه دامنه همبستگی بهنجار شده بین دو سری داده مدل و واقعی بوده است. با توجه به آن که بهترین مقدار همبستگی بهنجار شده از رابطه (۷) برابر ۱ است، هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک تر باشد، نتیجه مدل سازی را می توان بهتر دانست. جدول ۷ مقدار بیشینه دامنه همبستگی بهنجار شده بین این دو سری داده را نشان می دهد.

همچنین می توان گفت که هر چه فاصله رومرکزی افزایش داشته، تطابق داده ها بهبود یافته است. این نتیجه در ایستگاه ۴ به خوبی دیده می شود و با مطابقت داده های جدول ۵ با جدول ۶ که فواصل رومرکزی در آن ذکر شده است، هم می توان به صحت این ادعا پی برد.

در شکل ۷ قدر مطلق اختلاف انحراف معیار محاسبه شده در هر انفجار از هر ایستگاه با ۱، به منزله خطا در نظر گرفته شده و پس از ضرب حاصل در ۱۰۰، میزان درصد خطا در مدل سازی برای هر موج ترسیم شده است. با توجه به این شکل، می توان گفت کمترین خطا مربوط به انفجارهای ایستگاه های ۲ و ۴ و بیشترین خطا مربوط به انفجارهای ایستگاه ۳ بوده است. این نتایج با توجه به مطالب ذکر شده در قبل، به سبب فاصله رومرکزی این ایستگاه ها رخ داده است. لازم به ذکر است که در نرم-



شکل ۵. مقایسه نگاشت‌های مصنوعی و واقعی در دو مؤلفه  $Z$  و  $R$  با افزایش عمق چشمه انفجار، انفجار اول ثبت شده در ایستگاه شماره ۳.

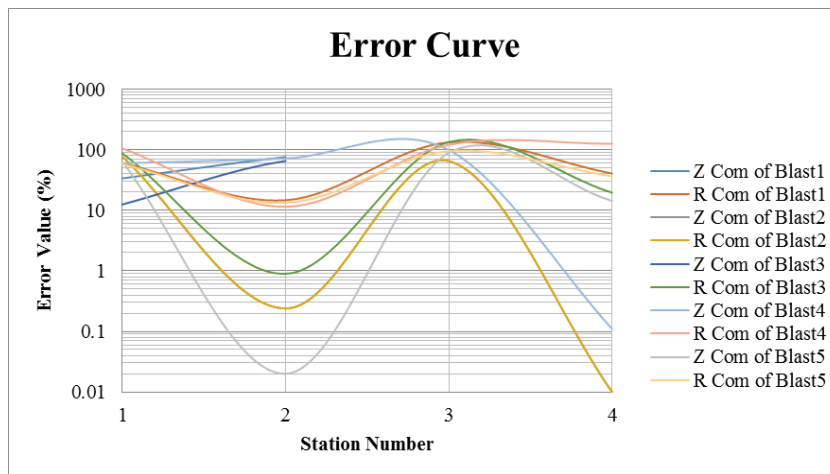


شکل ۶. مقایسه نگاشت‌های مصنوعی و واقعی در دو مؤلفه  $Z$  و  $R$  با کاهش عمق چشمه انفجار، انفجار اول ثبت شده در ایستگاه شماره ۲.

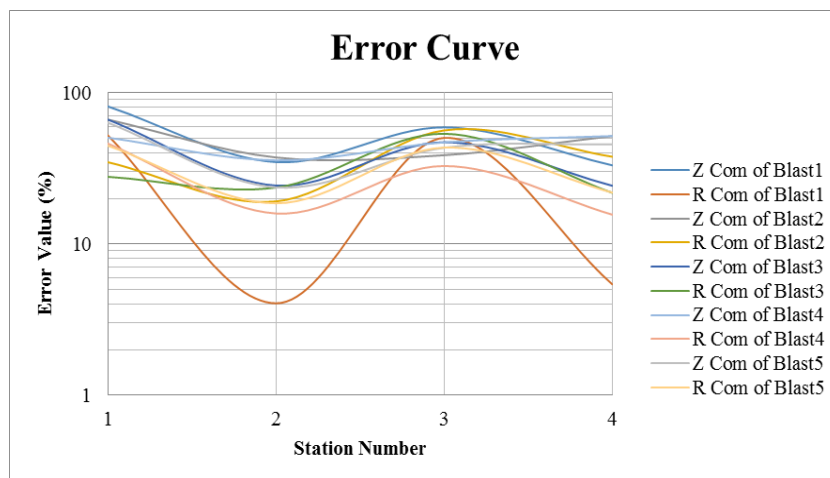
شکل ۸ نشان‌دهنده فاصله اعداد جدول ۷ از ۱ به عنوان اعداد در ۱۰۰، میزان درصد خطای مدل‌سازی برای هر مقدار خطا در هر نگاشت است که پس از ضرب این موج ترسیم شده است.

جدول ۷. مقدار بیشینه دامنه همبستگی بهنجار شده بین داده‌های نگاشت‌های مصنوعی و واقعی.

	Sta1	Sta2	Sta3	Sta4
Blast1	Z = ۰/۸۱۳۵	Z = ۰/۳۴۸۵	Z = ۰/۵۹۱۲	Z = ۰/۳۳۱۸
	R = ۰/۵۲۳۲	R = ۰/۰۴۰۶	R = ۰/۵۰۳۸	R = ۰/۰۵۴۲
Blast2	Z = ۰/۶۶۶۳	Z = ۰/۳۷۳۸	Z = ۰/۳۸۷۱	Z = ۰/۵۱۷۴
	R = ۰/۳۴۷۸	R = ۰/۱۹۱۵	R = ۰/۵۶۴۶	R = ۰/۳۷۸۰
Blast3	Z = ۰/۶۶۵۵	Z = ۰/۲۴۳۸	Z = ۰/۴۷۱۵	Z = ۰/۲۴۳۱
	R = ۰/۲۷۸۶	R = ۰/۲۳۶۳	R = ۰/۵۳۶۴	R = ۰/۲۱۸۳
Blast4	Z = ۰/۵۰۵۷	Z = ۰/۳۵۷۶	Z = ۰/۴۷۰۸	Z = ۰/۵۱۸۰
	R = ۰/۴۶۱۹	R = ۰/۱۵۹۳	R = ۰/۳۲۸۲	R = ۰/۱۵۶۶
Blast5	Z = ۰/۶۳۳۸	Z = ۰/۲۳۷۰	Z = ۰/۴۳۳۹	Z = ۰/۴۵۷۴
	R = ۰/۴۴۷۴	R = ۰/۱۸۶۱	R = ۰/۴۳۴۶	R = ۰/۲۱۹۱



شکل ۷. منحنی میزان خطا در انفجارهای پنجگانه در ایستگاه‌های مختلف.



شکل ۸. منحنی میزان خطا در انفجارهای پنجگانه در ایستگاه‌های مختلف.

کاهش دامنه امواج مصنوعی نسبت به واقعی می‌شود و تطابق میان امواج مصنوعی و واقعی بازم کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش عمق چشمه در نگاشت‌های مشابه حاصل از عمق چشمه آرمانی (۲/۵ متر)، می‌توان دریافت که افزایش عمق چشمه سبب افزایش دامنه امواج مصنوعی نسبت به واقعی در مؤلفه قائم شده و ضمن برهم‌زدن تطابق دامنه امواج، بر روی مؤلفه شعاعی اثر چندانی ندارد.

۴- با کاهش عمق چشمه در نگاشت‌های مشابه حاصل از عمق چشمه آرمانی (۲/۵ متر)، می‌توان دریافت که کاهش عمق چشمه سبب کاهش دامنه امواج مصنوعی نسبت به واقعی در مؤلفه قائم شده و ضمن برهم‌زدن تطابق دامنه امواج، بازم بر روی مؤلفه شعاعی اثر چندانی ندارد.

#### منابع

امرا، م.، ۱۳۹۱، بررسی روش‌های پیش‌بینی لرزش ناشی از آتشیاری: سمینار کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده-های فنی، دانشگاه تهران.

اصانلو، م.، ۱۳۷۴، طراحی، برنامه‌ریزی و روش‌های استخراج معادن سطحی: انتشارات لادن.

پورقاسمی، م.، ۱۳۷۹، شبیه‌سازی لرزش زمین ناشی از انفجار و بررسی اثرات تأخیر بر لرزش در معدن مس سرچشمه کرمان: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

ریاحی، م. ع.، و سدیدیخوی، ا.، ۱۳۹۰، مطالعات برآورد حداکثر وزن خرج مجاز در هر تأخیر به‌منظور انجام عملیات انفجاری ایمن در مجاورت لوله‌های فشارقوی گاز در مسیر راه‌آهن سریع‌السیر قم-اصفهان: گزارش فاز اول طرح پژوهشی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

سعیدنژاد، م.، ۱۳۹۲، بررسی آسیب‌پذیری سازه‌ها و شریان‌های حیاتی با مدل‌سازی شکل موج انفجار:

از مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان دریافت که در دو روش مقایسه داده‌های حاصل از نگاشت‌های مدل با نگاشت‌های واقعی، نتایج یکسانی حاصل شده است. برای مثال، داده‌های حاصل از ایستگاه شماره ۲ در دو روش کمترین درصد خطا را نشان می‌دهند.

با توجه به شکل موج‌های خروجی که سعیدنژاد (۱۳۹۲) ارائه کرده است، با بررسی‌های انجام شده بر روی آنها می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- در بعضی انفجارها (انفجار شماره چهارم)، از دو چاله انفجاری بدون تأخیر زمانی استفاده کرده‌ایم که به علت فاصله عرضی کم این چال‌ها، تأثیر آنها از طریق فاصله رومرکزی برمدل‌سازی خنثی بود. بدین‌منظور سه فاصله ۱، ۱/۵ و ۲ متر بین چال‌ها اعمال شد که چون فاصله در برنامه برحسب کیلومتر است، معادل آنها برحسب کیلومتر از دقت برنامه خارج بود.

- با بررسی مدل‌ها می‌توان دریافت که برنامه مورد استفاده، مؤلفه  $R$  را برای شروع لرزش و مؤلفه  $Z$  را برای بیشینه قله نگاشت واقعی مدل کرده و تطابق داده است.

- چون برنامه مورد استفاده بازه زمانی را برای تولید نگاشت در ورودی دریافت نمی‌کند، قابلیت مدل‌سازی انفجارهای دارای تأخیر زمانی را ندارد.

همچنین، با مقایسه نگاشت‌های حاصل از بررسی مدل سرعتی و بررسی عمق چشمه، می‌توان به نتایج زیر رسید:

۱- با کاهش مقادیر مدل سرعتی نسبت به مدل سرعتی نهایی، می‌توان دریافت که کاهش سرعت لایه‌ها باعث افزایش دامنه امواج مصنوعی نسبت به واقعی می‌شود و تطابق میان امواج مصنوعی و واقعی کاهش می‌یابد.

۲- با افزایش مدل سرعتی نسبت به مدل سرعتی نهایی، می‌توان دریافت که افزایش سرعت لایه‌ها باعث

- Herrman, R. B., 2006, An overview of synthetic seismogram computation: Saint Louis University.
- Herrmann, R. B., and Wang, C. Y., 1985, A comparison of synthetic seismograms: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(1), 41–56.
- Lay, T., and Wallace, T. C., 1995, *Modern Global Seismology*, Academic Press, 521 pp.
- Mohiuddin, M. A., Korvin, G., Abdulraheem, A., and Khan, K., 2001, Attenuation characteristics of Saudi Arabian reservoir sandstone and limestone cores: 57<sup>th</sup> SCA (Society of Core Analysts).
- Singh, S. P., and Vogt, W., 1998, Effect of direction of initiation on ground vibration: *Int. J. Surface Mining Reclamation and Environment*, **12**, 75–78.
- Udias, A., 1999, *Principles of Seismology*: Cambridge University Press, 492 pp.
- پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Arandelovic, D., 1969, *Geophysical in Civil Engineering*: Institute for Geological and Geophysical Research, Belgrade.
- Blair, D. P., and Jiang, J. J., 1995, Surface vibration due to a vertical column of explosive: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, **32**(2), 149–154.
- Dong, W., and Schmitt, D. P., 1993, *Dynamic and Static Green's functions in transversely isotropic elastic media*: Massachusetts Institute of Technology, 278 pp.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **46**(2), 105–145.