

برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک با استفاده از فاز Lg

لرزه‌نگاشت‌های SRO مشهد

غلامرضا رستگارموجد*، عبدالرحیم جواهریان* و احمد سدیدخوی*

موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۸۱/۱۱/۲۱، پذیرش مقاله: ۸۳/۹/۱۰)

چکیده

فاز Lg که فازی ناحیه‌ای است، به منزله امواج برشی به‌دام افتاده در هدایت‌گر موج پوسته‌ای یا در حکم برهم‌نهی مدهای بالای امواج سطحی ریلی و لاو در نظر گرفته می‌شود. سازوکارهای ایجاد فاز Lg در انفجارهای هسته‌ای عبارت‌اند از: تولید امواج برشی به‌واسطه ایجاد ناهمگنی در محیط اطراف انفجار، پدیده پراکندگی امواج P و Rg و تبدیل آن‌ها به امواج برشی، پدیده Spall، فاز غیر هندسی S* و فاز PS که امواج برشی حاصل با به‌دام افتادن در پوسته باعث ایجاد فاز Lg می‌شوند. فاز Lg یکی از فازهای عمده حاصل از انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی حتی با قدرت کم است که در لرزه‌نگاشت‌های دوره کوتاه در فواصل محلی، با دامنه آغازین بزرگ، دارای شروعی واضح است. سرعت گروه فاز Lg حدود ۳/۵ کیلومتر بر ثانیه است. فاز Lg، به علت داشتن الگوی تشعشی همگن و متقارن، تضعیف نشدن زیاد در مسیر انتشار و پراکندگی کم‌تر بزرگی حاصل از این فاز در مقایسه با بزرگی حاصل از فازهای دیگر یک فاز مناسب برای برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیر زمینی محسوب می‌شود. در این مطالعه ۱۶ انفجار هسته‌ای شرق قزاقستان که در منطقه سمیپالاتینسک انجام شده و توسط ایستگاه لرزه‌نگاری SRO مشهد وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ثبت شده، مورد بررسی قرار گرفته و قدرت برآورد شده است. بیشینه دامنه peak تا peak برای دوره‌های ۱ تا ۱/۵ ثانیه در داخل پنجره سرعت گروه ۳/۲ تا ۳/۶ کیلومتر بر ثانیه در نقش دامنه فاز Lg قرائت شد. بعد با توجه به رابطه ناتلی (۱۹۸۶a) بزرگی حاصل از این فاز به‌دست آمد. رابطه $m_b(Lg) = 0.564 \log(Y) + 4.863$ بین بزرگی فاز Lg محاسبه شده و قدرت گزارش شده (Y بر حسب کیلوتن TNT) به منظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای شرق قزاقستان که ایستگاه لرزه‌نگاری SRO مشهد آن را ثبت کرده است، تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: بزرگی فاز Lg، برآورد قدرت، انفجارهای هسته‌ای، سرعت گروه، SRO مشهد، سمیپالاتینسک

۱ مقدمه

- فاز Lg اولین بار به منزله امواج لاو دوره کوتاه که در پوسته گرانیتی منتشر می‌شوند، معرفی شد (پرس و اوینگ، ۱۹۵۲). در حال حاضر دو نظریه در مورد این فاز بیان می‌شود که عبارت‌اند از:
- الف- فاز Lg در حکم امواج برشی به‌دام افتاده در هدایت‌گر موج پوسته‌ای (گوتنبرگ، ۱۹۵۵).
- ب- فاز Lg در نقش برهم‌نهی مدهای بالای امواج سطحی ریلی و لاو (نوبوف و همکاران، ۱۹۷۳).
- سازوکارهای ایجاد فاز Lg در انفجارها عبارت‌اند از:
- الف- تولید امواج برشی به‌واسطه ایجاد ناهمگنی در محیط اطراف انفجار
- ب- پدیده پراکندگی امواج P و Rg و تبدیل آن‌ها به امواج برشی
- ج- پدیده Spall
- د- فاز غیر هندسی S*
- ه- فاز PS. با به‌دام افتادن این امواج برشی در پوسته گرانیتی فاز Lg ایجاد می‌شود (زای و لی، ۱۹۹۴).
- مشخصات فاز Lg حاصل از انفجار، به جزئیات چشمه، چگونگی ساختار هدایت‌گر موج پوسته‌ای و نیز نوع سازوکاری که سهم بیشتری در تولید این فاز دارد وابسته است.
- از سال ۱۹۷۶ که پیمان منع آزمایش‌های هسته‌ای

بالاتر از ۱۵۰ کیلو تن TNT بین شوروی سابق و ایالات متحد امضاء شد، راه‌های برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای موارد توجه جدی قرار گرفت. یکی از راه‌های برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای، استفاده از خصوصیات لرزه‌ای امواج حاصل از انفجار است. در این روش بزرگی حاصل از افزایش‌های مختلف لرزه‌ای با قدرت انفجارها ارتباط پیدا می‌کند. فاز Lg یکی از فازهای عمده حاصل از انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی حتی با قدرت کم است که در لرزه‌نگاشت‌های دوره کوتاه، در فواصل ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتری از محل انفجار، با دامنه آغازین بزرگ، دارای شروعی واضح است. سرعت گروه فاز Lg در حدود ۳/۵ کیلومتر بر ثانیه است.

از میان سازوکارهای تشکیل موج برشی حاصل از انفجارها، دو پدیده Spall و S* مبانی ریاضی پیچیده‌ای دارند. پدیده Spall به صورت جدا شدگی لایه‌ها به واسطه نیرو کششی حاصل از بازتاب موج فشاری از سطح آزاد، یک چشمه ثانویه ایجاد موج برشی ظاهر می‌شود. سازوکار این پدیده در اثر اندرکنش سه مؤلفه نیرو شامل نیروی وزن استون سنگ‌ها، نیروی مقاومت کششی سنگ‌ها در عمق مربوطه و نیروی فشاری باقی مانده از انفجار، از یک طرف و نیروی کششی حاصل از بازتاب موج فشاری از سطح آزاد از طرف دیگر، به وجود می‌آید که هر یک از موارد ذکر شده به صورت فرمول‌های ریاضی بیان می‌شود و بیان آنها خارج از مبحث مدنظر است. محققین بسیاری فاز S* را که به صورت امواج برشی غیر هندسی بیان می‌شود مورد بررسی قرار داده‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات هرون و میخایلنکو (۱۹۸۱)، دالی و هرون (۱۹۸۳) و وفجرد (۱۹۹۷) اشاره کرد که در آن مطالعات، مبانی ریاضی فاز S* بیان شده است. فاز S* از نوع موج برشی SV است و دامنه آن حساسیت زیادی به عمق انفجار دارد. به نحوی که با افزایش عمق انفجار، دامنه این فاز کاهش پیدا می‌کند.

فاز Lg به صورت امواج برشی به دام افتاده در پوسته گرانیتی، سرعت انتشار امواج برشی در پوسته را دارد. با توجه به این امر زاویه تابش امواج برشی روی مرز موهو باید فرا بحرانی باشد تا اکثر انرژی امواج برشی در پوسته منتشر شود. فاز Lg از جنبه برهم‌نهی مدهای بالای امواج سطحی، بیانگر سازوکار انتشار امواج سطحی در پوسته است. با توجه به نمودارهای پاشندگی سرعت گروه و فاز امواج سطحی در دوره‌های بین ۰/۵ تا ۶ ثانیه، نوع جابه‌جایی و محتوی بسامدی امواج سطحی در این دوره‌ها، دلایل و شواهد راضی کننده برای بیان فاز Lg به صورت برهم‌نهی مدهای امواج سطحی حاصل می‌شود.

به دلایل زیر، فاز Lg فازی مناسب برای مشخص کردن قدرت انفجارها، تمایز قرار دادن بین زلزله و انفجار و نیز برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی محسوب می‌شود:

۱- داشتن الگوی تابشی همگن و مقارن نسبت به امواج P و S (کمیلو، ۱۹۹۰).

۲- تاثیرپذیری کم‌تر از گشته و در نتیجه تضعیف نشدن زیاد این فاز در مسیر انتشار در پوسته (گیونز، ۱۹۸۸).

۳- پراکندگی کم‌تر بزرگی حاصل از این فاز در مقایسه با بزرگی حاصل از فازهای دیگر.

عوامل مؤثر بر پراکندگی بزرگی یک حادثه لرزه‌ای از روی یک فاز خاص به‌طور عمده عبارت‌اند از: الگوی تابشی موج مربوطه و تأثیرپذیری انتشار آن فاز از ساختار پوسته. مثلاً موج P در راستای ۴۵ درجه نسبت به صفحه گسل دارای ماکزیمم دامنه است و در راستای ۹۰ دامنه خیلی کمی دارد و این الگوی تابشی بر روی دامنه موج ثبت شده در ایستگاه، اثرگذار است. ولی فاز Lg به صورت امواج برشی به دام افتاده در پوسته، در همه جهات به صورت یکنواخت انتشار می‌یابد؛ البته اگر پوسته که در این جا هدایت‌گر موج محسوب می‌شود آشفتگی‌های زیاد با ابعاد بزرگ نداشته باشد. دامنه فازهایی از قبیل Pg و Sg

به دست آمده است، مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند و بزرگی این فاز دچار پراکندگی زیادی نیست. به هر حال مسیر انتشار و ساختار پوسته محل گیرنده تاثیر خاصی روی انتشار و ثبت امواج لرزه‌ای دارد و با توجه به این که هنوز رابطه‌ای برای بیان رابطه قدرت-بزرگی مربوط به انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی شرق قزاقستان ثبت شده در ایستگاه SRO مشهد وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ارائه نشده است، بنابراین در این مطالعه تعیین بزرگی، رابطه قدرت-بزرگی و قدرت-دامنه برای فاز Lg ثبت شده در ایستگاه SRO مشهد، حاصل از انفجارهای شرق قزاقستان مورد بررسی قرار گرفت تا روابط خاص در مورد مسیر انتشار سمیپالاتینسک تا ایستگاه مشهد به دست آید.

در بحث برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی با استفاده از روش لرزه‌نگاری باید مراحل زیر انجام شود:

- ۱- تشخیص فاز لرزه‌ای مورد نظر روی لرزه‌نگاشت
- ۲- اعمال تصحیحات لازم روی داده‌ها شامل اثرات پاسخ دستگاهی و اثرات مسیر انتشار و محیط دربرگیرنده
- ۳- محاسبه بزرگی فاز مورد نظر با استفاده از دامنه قرائت شده و رابطه‌های موجود
- ۴- برقرار ساختن رابطه‌ای بین بزرگی محاسبه شده و قدرت گزارش شده. در این مبحث دانستن مقدار واقعی قدرت تعدادی از انفجارها برای پیدا نمودن رابطه بین بزرگی و قدرت ضروری است.

۲ بررسی داده‌ها

در این مطالعه ۱۶ انفجار هسته‌ای زیرزمینی منطقه سمیپالاتینسک که ایستگاه لرزه‌نگاری SRO مشهد آن‌ها را ثبت کرده است، مورد بررسی قرار گرفته و بحث برآورد قدرت برای این انفجارها انجام شده است. عرض و طول جغرافیایی ایستگاه لرزه‌نگاری مشهد به ترتیب

از توپوگرافی و دیگر ناهمگنی‌های پوسته تاثیر می‌گیرد، در عین حال که اثر ناهمگنی‌ها روی فاز Lg نسبت به بقیه فازها کم‌تر است. اگر پوسته از لحاظ زمین‌ساختی (تکتونیکی)، پایدار و دارای ساختار منظم باشد، فاز Lg تا فواصلی حدود ۳ تا ۴ هزار کیلومتر منتشر و با لرزه‌نگارها ثبت می‌شود (پرس و اوینگ، ۱۹۵۲). به کار بردن داده‌های شبکه به‌جای داده‌های تک ایستگاه، باعث افزایش دقت در برآورد قدرت انفجار می‌شود. در به دست آوردن رابطه بین قدرت انفجار و بزرگی فاز Lg حاصل از انفجارها، میزان ضریب تضعیف مسیر انتشار از اهمیت خاصی برخوردار است.

رابطه بین لگاریتم قدرت انفجار هسته‌ای زیرزمینی برحسب کیلومتر و بزرگی حاصل از فاز Lg را نخستین بار ناتلی (۱۹۸۶a) ارائه کرد. وی برای منطقه آزمایش‌های هسته‌ای نوادا در ایالات متحد، با توجه به نوع محیط چشمه به لحاظ اشباع بودن از آب و محیط بدون آب، این رابطه را به صورت دو چندجمله‌ای درجه دوم متفاوت ارائه کرد. فرمول مربوط به محیط اشباع از آب در منطقه نوادا، برای انفجارهای شرق قزاقستان نیز صدق می‌کند (ناتلی، ۱۹۸۶b).

پاتون (۱۹۸۸) نیز با به‌کارگیری روش ناتلی در برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی به این نتیجه رسید که آزاد شدن تنش زمین‌ساختی در حین انفجار اثر مهمی روی بزرگی حاصل از این فاز ندارد. هسن و همکاران (۱۹۹۰) پتانسیل مناسب این فاز را برای برآورد صحیح قدرت انفجارهای روسیه نشان دادند. برای تایید این مطلب که این فاز پتانسیل مناسبی برای برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای در فواصل مرکز سطحی محلی و نیز در فواصل مرکز سطحی دورلرزه‌ای شمرده می‌شود، شلیتهارت (۲۰۰۱) روشن ساخت که بزرگی حاصل از این فاز برای انفجارهای شرق قزاقستان که در ایستگاه گرافنبرگ آلمان و ایستگاه‌های محلی خود قزاقستان

فاز Lg (Lg) m_b گزارش شده این انفجارها و نیز میزان قدرت گزارش شده آنها است.

۳ روش کار

ابتدا این فاز روی لرزه‌نگاشت‌های دوره کوتاه تشخیص داده شد. این فاز در پنجره سرعت گروه $3/2$ تا $3/6$ کیلومتر بر ثانیه (ناتلی، ۱۹۸۶b) با توجه به فاصله رومرکز سطحی بین سمیالاتینسک تا ایستگاه لرزه‌نگاری SRO مشهود مشخص شد. بیشینه دامنه peak to peak برای دوره‌های ۱ تا $1/5$ ثانیه قرائت شد. برای نمونه شکل ۱ قطعه‌ای از لرزه‌نگاشت مؤلفه قائم دوره کوتاه ایستگاه SRO مشهود مربوط به انفجار سال ۱۹۷۸ روز ۳۳۳ با قدرت ۱۰۱ کیلو تن TNT (استیونس و مورفی، ۲۰۰۱) را نشان می‌دهد.

۳۶/۳۰۸۳ درجه شمالی و ۵۹/۴۷۱۷ درجه شرقی است. فاصله محل انفجارهای منطقه سمیالاتینسک تا ایستگاه مشهود حدود ۱۹ تا ۲۰ درجه یا به عبارتی بین ۲۱۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلومتر است. دستگاه لرزه‌نگار SRO مشهود از نوع باند پهن است و خروجی‌های حاصل از لرزه‌سنج‌ها پس از عبور از صافی‌های الکترونیکی به مولفه‌های دوره کوتاه و دوره بلند تفکیک می‌شوند. اطلاعات میزان قدرت انفجار مربوط به تعداد ۳۰ انفجار منطقه سمیالاتینسک را استیونس و مورفی (۲۰۰۱) ارائه کرده‌اند. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به ۱۶ انفجار این منطقه که بزرگی حاصل از فاز Lg برای آنها گزارش شده (ناتلی، ۱۹۸۶b و اسرائیلسون، ۱۹۹۴) و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، آورده شده است. این اطلاعات شامل تاریخ انفجار، زمان انفجار، فاصله بین چشمه تا گیرنده، بزرگی

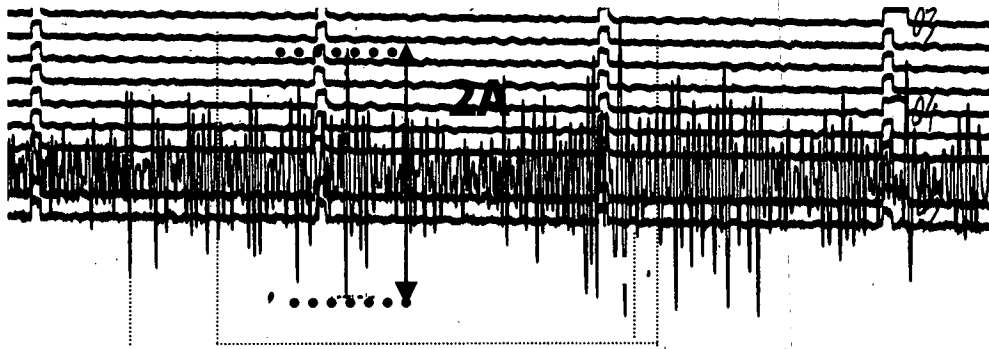
جدول ۱. مشخصات انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی منطقه سمیالاتینسک منتشر شده و فاصله محاسبه شده محل انفجارهای مذکور از ایستگاه SRO مشهود. در این جدول اطلاعات ستون‌های ۲ تا ۶ از (بانگ و همکاران، ۲۰۰۰)، ستون ۸ از (ناتلی، ۱۹۸۶b و اسرائیلسون، ۱۹۹۴) و ستون ۹ (استیونس و مورفی، ۲۰۰۱) است.

| No. | announced | | | | | computed | announced | |
|-----|-----------|------|--------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| | *Year | *Day | *O.T.(h:m:s) | *Lat.(deg) | *Long.(deg) | Distance (km) | ** m_b (Lg) | ***Yield (kt) |
| 1 | 1978 | 308 | 05:05:59.8 | 50.0400 | 78.9410 | 2180 | 5.57 | 44 |
| 2 | 1978 | 333 | 04:33:00.2 | 49.8080 | 77.9990 | 2110 | 6.01 | 101 |
| 3 | 1979 | 188 | 03:46:59.8 | 50.0320 | 78.9890 | 2180 | 5.87 | 97 |
| 4 | 1979 | 301 | 03:16:59.5 | 49.9820 | 78.9960 | 2180 | 6.06 | 139 |
| 5 | 1980 | 164 | 03:27:00.1 | 49.9860 | 78.9980 | 2180 | 5.74 | 37 |
| 6 | 1980 | 181 | 02:33:00.2 | 49.9510 | 78.8150 | 2170 | 5.71 | 44 |
| 7 | 1980 | 286 | 03:34:16.6 | 49.9670 | 79.0260 | 2180 | 5.92 | 102 |
| 8 | 1981 | 361 | 03:43:16.6 | 49.9300 | 78.7920 | 2170 | 6.15 | 156 |
| 9 | 1982 | 115 | 03:23:07.9 | 49.9120 | 78.9060 | 2170 | 6.13 | 145 |
| 10 | 1983 | 163 | 02:36:46.0 | 49.9200 | 78.9140 | 2170 | 6.05 | 138 |
| 11 | 1983 | 299 | 01:55:07.3 | 49.9120 | 78.8280 | 2170 | 6.10 | 114 |
| 12 | 1984 | 116 | 01:09:06.0 | 49.9350 | 78.8670 | 2170 | 5.86 | 76 |
| 13 | 1984 | 196 | 01:09:13.0 | 49.9010 | 78.8790 | 2170 | 6.17 | 135 |
| 14 | 1984 | 337 | 03:19:08.9 | 49.9930 | 79.0090 | 2180 | 5.97 | 79 |
| 15 | 1984 | 351 | 03:55:05.1 | 49.9300 | 78.8160 | 2170 | 6.08 | 137 |
| 16 | 1985 | 201 | 00:53:16.9 | 49.9430 | 78.7830 | 2170 | 5.86 | 74 |

* بانگ و همکاران (۲۰۰۰)

** ناتلی (۱۹۸۶b) و اسرائیلسون (۱۹۹۴)

*** استیونس و مورفی (۲۰۰۱)



شکل ۱. قطعه‌ای از لرزه‌نگاشت مؤلفه قائم دوره کوتاه ایستگاه SRO مشهد مربوط به انفجار سال ۱۹۷۸ روز ۲۳۳ با قدرت ۱۰۱ کیلو تن TNT (استینوس و مورفی، ۲۰۰۱) که در فاصله ۲۱۱۰ کیلومتری ایستگاه مشهد صورت گرفته است. خط نقطه‌چین کم رنگ طول مربوط به پنجره فاز Lg در بازه سرعت ۳/۲ تا ۳/۶ کیلومتر بر ثانیه را و A بیشینه دامنه فاز Lg را نشان می‌دهد.

$$m_b(Lg) = 5.0 + \log[A(10\text{km})/110] \quad (۳)$$

در این روش بعد از انتخاب بیشینه دامنه peak to peak برای دوره‌های ۱ تا ۱/۵ ثانیه و در نظر گرفتن نصف این مقدار برای $A(\Delta)$ و نیز سرعت گروه متناظر با دامنه انتخاب شده، با توجه به این که برای مسیر شرق قزاقستان تا ایستگاه مشهد مقادیر Q و η توسط ناتلی (۱۹۸۶b) به ترتیب ۳۸۰ و ۰/۵ ارائه شده است، مقدار بزرگی فاز Lg برای ۱۶ انفجار محاسبه شد. در این مقاله راه محاسبه Q و η مدنظر نیست چون این موضوع خود دارای مباحث طولانی است. ولی می‌توان از عوامل مؤثر بر Q و η به موارد محیط انتشار و فعالیت زمین‌ساختی محیط انتشار، اشاره کرد. رسوبات دارای ضریب کیفیت پایین است، در ناحیه پایدار قاره‌ای، ضریب کیفیت زیاد و تابعیت بسامدی آن کم است. ولی در نواحی فعال زمین‌ساختی، به علت برهم ریختگی پوسته و وجود شکستگی‌ها و فعال بودن منطقه، جذب انرژی افزایش و به تبع آن ضریب کیفیت کاهش پیدا می‌کند و تابعیت بسامدی آن بیشتر می‌شود (کمپیلو، ۱۹۹۰).

رابطه بین قدرت انفجار و بزرگی فاز Lg حاصل از انفجار به صورت چندجمله‌ای درجه دوم توسط ناتلی (۱۹۸۶a) برای دو ناحیه محل چشمه، یکی اشباع از آب و

دامنه حاصل از فاز Lg از رابطه (۱) که ناتلی (۱۹۸۶b)

آن را ارائه کرده است، محاسبه شد.

$$A(10\text{km}) = A(\Delta)B.C.\exp[\gamma(\Delta - 10)] \quad (۱)$$

$$B = (\Delta/10)^{\frac{1}{3}}$$

$$C = \sin(\Delta/111.1) / \sin(10/111.1)$$

که در آن، $A(10\text{km})$ دامنه محاسبه شده در فاصله ۱۰ کیلومتر، Δ فاصله رومرکز سطحی برحسب کیلومتر، $A(\Delta)$ دامنه اندازه‌گیری صفر تا ماکزیمم فاز Lg برحسب میکرون، B مربوط به پاشندگی امواج، C برای جبران تضعیف گسترش هندسی، قسمت نمایی برای جبران اثر تضعیف غیر کشسان محیط انتشار و γ ضریب تضعیف است که از رابطه (۲) به دست می‌آید (ناتلی، ۱۹۸۶b).

$$\gamma = \frac{\pi f}{UQ(f)} \quad (۲)$$

و در آن f بسامد، U سرعت گروه فاز Lg در طول پنجره سرعت گروه، Q ضریب کیفیت که دارای تابعیت بسامدی $Q = Q_0 f^\eta$ و Q_0 ضریب کیفیت در بسامد یک هرتز است. بعد از محاسبه دامنه فاز در مبنای ۱۰ کیلومتر، بزرگی این فاز از رابطه (۳) به دست می‌آید (ناتلی، ۱۹۸۶b).

نظر قرار گرفت.

رابطه‌های بین بزرگی فاز Lg گزارش شده و قدرت گزارش شده با تابعیت درجه اول مربوط به تعداد ۴۰ و ۲۳ انفجار، به ترتیب به صورت رابطه‌های (۶) و (۷) است.

$$m_b(Lg) = 0.730 \log(Y) + 4.511 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.7419$$

$$m_b(Lg) = 0.679 \log(Y) + 4.614 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.6747$$

رابطه‌های بین بزرگی فاز Lg گزارش شده و قدرت گزارش شده با تابعیت درجه اول و درجه دوم مربوط به تعداد ۱۶ انفجار به ترتیب به صورت رابطه‌های (۸) و (۹) است.

$$m_b(Lg) = 0.803 \log(Y) + 4.375 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.8583$$

$$m_b(Lg) = 5.857 - 0.785 \log(Y) - 0.420 [\log(Y)]^2 \quad (9)$$

رابطه‌های بین بزرگی فاز Lg محاسبه شده و قدرت گزارش شده با تابعیت درجه اول و درجه دوم مربوط به تعداد ۱۶ انفجار به ترتیب به صورت رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) است.

$$m_b(Lg) = 0.564 \log(Y) + 4.863 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.8130$$

$$m_b(Lg) = 5.939 - 0.583 \log(Y) - 0.302 [\log(Y)]^2 \quad (11)$$

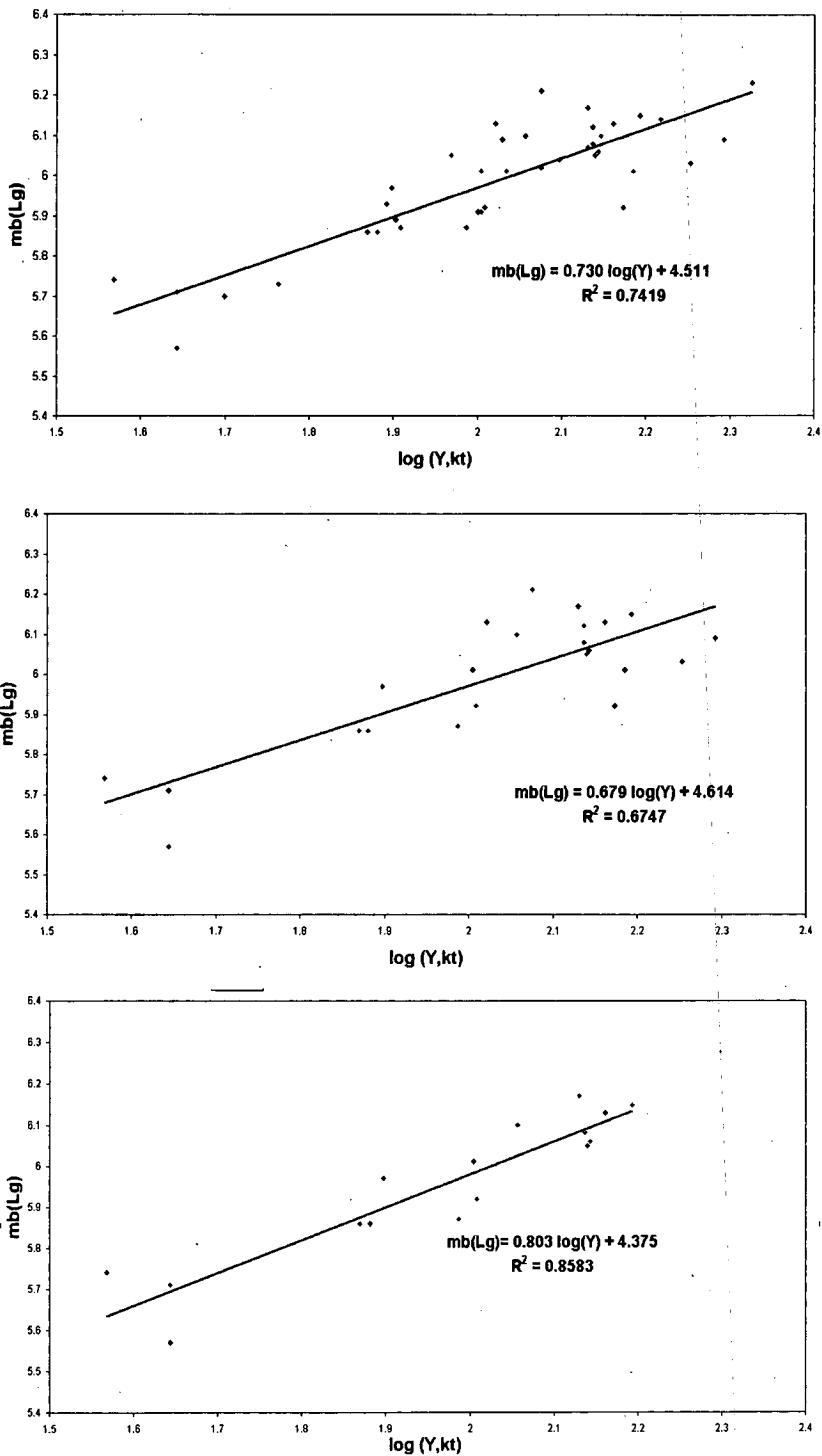
شکل ۳ رابطه بین بزرگی محاسبه شده فاز Lg و قدرت انفجار مربوط به ۱۶ انفجار منطقه سمیالاتینسک را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی بین داده‌ها ۰/۸۱ است. رابطه (۱۰) به عنوان رابطه برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیر زمینی سمیالاتینسک، ثبت شده در ایستگاه SRO مشهد با کمک از فاز Lg ارائه می‌شود. پایین بودن ضریب همبستگی بین بزرگی محاسبه شده فاز Lg و قدرت

دیگری محیط بدون آب به ترتیب به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. رابطه (۴) تقریباً برای دیگر نواحی قاره‌ای نیز صادق است.

$$m_b(Lg) = 3.943 + 1.124 \log(Y) - 0.083 (\log(Y))^2 \quad (4)$$

$$m_b(Lg) = 3.869 + 1.110 \log(Y) - 0.146 (\log(Y))^2 \quad (5)$$

در مطالعات مربوط به این مقاله، در کل، اطلاعات مربوط به تعداد ۴۰ انفجار با بزرگی و قدرت اعلام شده در اختیار بود. تعداد ۲۳ انفجار را ایستگاه SRO مشهد به طور مناسب ثبت کرده بود، به نحوی که فاز Lg روی لرزه‌نگاشت‌های مربوط به آن‌ها قابل قرائت بود. در ادامه، با بررسی ضریب همبستگی داده‌ها تعداد ۱۶ انفجار از این ۲۳ انفجار، برای به دست آوردن رابطه برآورد قدرت مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲ نمودارهای قدرت-بزرگی فاز Lg گزارش شده برای ۴۰، ۲۳ و ۱۶ انفجار نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی در این نمودارها به ترتیب ۰/۷۴۱۹، ۰/۶۷۴۷ و ۰/۸۵۸۳ است. این ضرایب همبستگی مربوط به اطلاعات گزارش شده‌اند. پایین بودن نسبی این ضرایب همبستگی می‌تواند ناشی از مناسب و دقیق ارائه نشدن قدرت انفجارها، متناسب با بزرگی‌های گزارش شده، باشد. البته مقادیر قدرت انفجارها از استیونس و مورفی (۲۰۰۱)، گرفته شده است. در حالت مقایسه بین ضریب همبستگی ۲۳ انفجار که ایستگاه SRO مشهد به طور مناسب آن‌ها را ثبت کرده است، با تعداد کل ۴۰ انفجار، ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی بین داده‌ها کاهش پیدا نموده است. ولی ضریب همبستگی مربوط به رابطه قدرت-بزرگی فاز Lg مربوط به ۱۶ انفجار در مقایسه با تعداد ۴۰ و ۲۳ انفجار مورد مطالعه، افزایش یافته است. در نتیجه برای بالا بردن ضریب همبستگی مقادیر اعلام شده، تعداد ۱۶ انفجار مد



شکل ۲. رابطه $mb(Lg)$ اعلام شده و قدرت انفجارهای هسته‌ای به ترتیب از بالا به پایین مربوط به تعداد ۴۰، ۲۳ و ۱۶ انفجار در منطقه سمپالانتینسک. اطلاعات مربوط به $mb(Lg)$ توسط ناتلی (۱۹۸۶b) و اسرائیلسون (۱۹۹۴) و قدرت انفجارها از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) اعلام شده است.

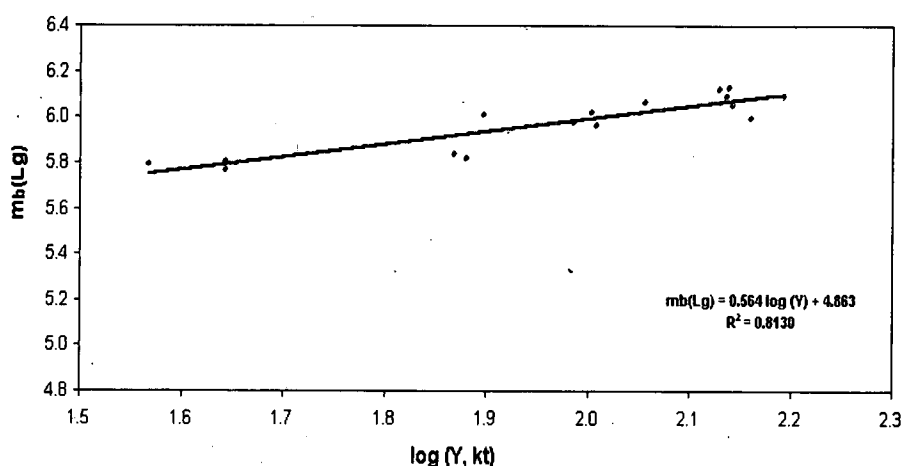
سمیپالاتینسک و قدرت گزارش شده این تعداد انفجار است.

$$\text{Log}(A) = 0.676 \log(Y) + 0.968 \quad (12)$$

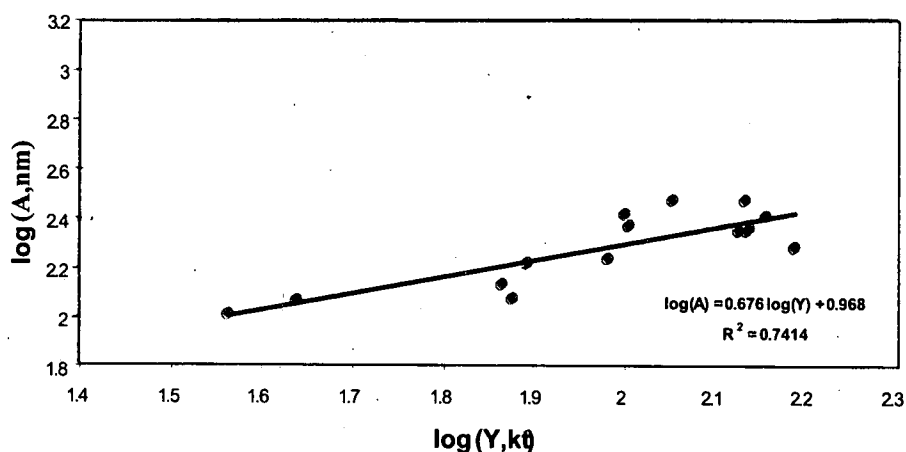
$$R^2 = 0.7414$$

که در آن R^2 ضریب همبستگی است. شکل ۴ رابطه بین بیشینه دامنه فاز Lg بر حسب نانومتر و قدرت انفجاری تعداد ۱۶ انفجار این منطقه است. ضریب همبستگی بین داده‌ها ۰/۷۴ است.

انفجار مربوط به ۱۶ انفجار، نسبت به ضریب همبستگی بین بزرگی گزارش شده فاز Lg و قدرت انفجار، امری بدیهی است زیرا که در محاسبه بزرگی، در این مقاله از تک ایستگاه استفاده شده است، ولی در مورد مقادیر بزرگی گزارش شده، از میانگین چند ایستگاه صورت گرفته است. رابطه (۱۲) بیانگر ارتباط بین دامنه قرائت شده فاز Lg از روی ۱۶ لرزه‌نگاشت‌های مؤلفه قائم دوره کوتاه ایستگاه SRO مشهود مربوط به انفجارهای منطقه



شکل ۳. رابطه $mb(Lg)$ محاسبه شده از روی لرزه‌نگاشت‌های مؤلفه قائم دوره کوتاه SRO مشهود و قدرت انفجارهای هسته‌ای مربوط به ۱۶ انفجار در منطقه سمیپالاتینسک. قدرت انفجارها از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) منتشر شده است.



شکل ۴. رابطه دامنه فاز Lg قرائت شده از روی لرزه‌نگاشت‌های مؤلفه قائم دوره کوتاه SRO مشهود و قدرت انفجارهای هسته‌ای مربوط به ۱۶ انفجار در منطقه سمیپالاتینسک. قدرت انفجارها از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) منتشر شده است.

۴ نتیجه‌گیری

به شماره ۶۵۲/۳/۸۱۸ با عنوان برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی شرق قزاقستان با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های پایگاه لرزه‌نگاری SRO مشهد انجام شده است. بنابراین از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران، حوزه معاونت پژوهشی مؤسسه ژئوفیزیک و گروه فیزیک زمین تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک و کارکنان این مرکز به ویژه آقای محمدحسین حسن‌نیا به خاطر در اختیار قرار دادن لرزه‌نگاشت‌های مربوط به رخدادها تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Campillo, M., 1990, Propagation and attenuation characteristics of the crustal phase Lg: Pure Appl. Geophys., 132, 1-19.
- Daley, P. F., and Hron, F., 1983, High-frequency approximation to the nongeometrical S^{*} arrival: Bull. Seism. Soc. Am., 73, 109-123.
- Gibbons, J. H., 1988, Seismic verification of nuclear testing treaties, U. S. government printing office, Washington, DC 20402-9325.
- Gutenberg, B., 1955, Channel waves in the earth's crust: Geophysics, 20, 283-294.
- Hansen, R. A., Ringdal, F., and Richards, P. G., 1990, The stability of RMS Lg measurements and their potential for accurate estimation of the yields of Soviet underground nuclear explosions: Bull. Seism. Soc. Am., 80, 2106-2126.
- Hron, F., and Mikhailenko, B. G., 1981, Numerical modeling of nongeometrical effects by the Alekseev-Mikhailenko method: Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1011-1029.
- Israelsson, H., 1994, Analysis of historical seismograms-root mean square Lg magnitudes, yield and depths of explosions at the Semipalatinsk Test Range: Geophys. J. Int., 117, 591-609.
- Knopoff, L., Schwab, F., and Kausel, E., 1973, Interpretation of Lg: Geophys. J. R. Astr. Soc., 33, 389-404.
- Nuttli, O. W., 1986a, Yield estimates of Nevada Test Site explosions obtained from seismic Lg waves: J. Geophys. Res., 91, 2137-2151.

دامنه فاز Lg ثبت شده روی لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم دوره کوتاه ایستگاه SRO مشهد برای ۱۶ انفجار منطقه سمیپالاتینسک، به منظور محاسبه بزرگی این فاز، $m_b(Lg)$ قرائت شد. مقادیر $m_b(P)$ این تعداد انفجار هسته‌ای زیرزمینی بزرگ‌تر یا مساوی ۵/۵ در مقیاس امواج درونی است. مقدار میانگین فاکتور کیفیت مربوط به مسیر محل انفجارهای منطقه سمیپالاتینسک تا ایستگاه SRO مشهد برای دوره‌های نزدیک ۱ ثانیه، مقدار ۳۸۰ در نظر گرفته شد (ناتلی، ۱۹۸۶a). با توجه به وضوح دامنه فاز Lg ثبت شده در ایستگاه SRO مشهد، این ایستگاه محل مناسبی برای ثبت انفجارهای منطقه سمیپالاتینسک است. مقادیر بزرگی $m_b(Lg)$ محاسبه شده در مقایسه با مقادیر گزارش شده اختلاف کمی دارند. مقدار بزرگی محاسبه شده از فاز Lg نسبت به دیگر مقادیر بزرگی دارای پراکندگی کم‌تر است. رابطه‌ای خطی که به منظور برآورد مقادیر قدرت انفجار از فاز Lg ارائه شده است، تاثیرپذیری کمی از ساختارهای مختلف پوسته از خود نشان می‌دهد. مقادیر قدرت‌های برآورد شده در مقایسه با مقادیر گزارش شده اختلاف کمی دارد. رابطه $m_b(Lg) = 0.564 \log(Y) + 4.863$ بین بزرگی فاز Lg محاسبه شده و قدرت گزارش شده و نیز با قرائت دامنه فاز Lg بر حسب نانومتر، رابطه $\log(A) = 0.676 \log(Y) + 0.96$ بین لگاریتم دامنه قرائت شده فاز Lg و قدرت گزارش شده، به منظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای شرق قزاقستان ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری SRO مشهد، تعیین شد. برای برآورد قدرت رابطه مربوط به بزرگی - قدرت به علت وجود ضریب همبستگی بزرگ‌تر توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه تهران

- Nuttli, O. W., 1986b, Lg magnitudes of selected east Kazakhstan underground explosions: Bull. Seism. Soc. Am., **76**, 1241-1251.
- Patton, H. J., 1988, Application of Nuttli's method to estimate yield of Nevada Test Site explosions recorded on Lawrence Livermore National Laboratory's digital seismic system: Bull. Seism. Soc. Am., **86**, 1759-1772.
- Press, F., and Ewing, M., 1952, Two surface waves across north America: Bull. Seism. Soc. Am., **42**, 219-228.
- Schlittenhardt, J., 2001, Teleseismic Lg of Semipalatinsk and Novaya Zemlya nuclear explosions recorded by the GRF (Grafenberg) array: comparison with regional Lg (BRV) and their potential for accurate yield estimation: Pure Appl. Geophys., **158**, 2253-2274.
- Stevens, J. L., and Murphy, J. R., 2001, Yield estimation from surface-wave amplitudes: Pure Appl. Geophys., **158**, 2227-2251.
- Vogfjord, K. S., 1997, Effects of explosion depth and earth structure on the excitation of Lg waves: S* revisited: Bull. Seism. Soc. Am., **87**, 1100-1114.
- Xie, X. and Lay, T., 1994, The excitation of Lg waves by explosions: A finite-difference investigation: Bull. Seism. Soc. Am., **84**, 324-342.
- Yang, X., North, R., and Romney, C., 2000, CMR Nuclear Explosion Database (revision 3): CMR Technical Report CMR-00/16.