

بررسی آزمایش هسته ای ۳ سپتامبر ۲۰۱۷ کره شمالی با استفاده از برگردان شکل موج

سارا عباسی^۱، عباس غلام زاده^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک گرایش زلزله شناسی، دانشگاه هرمزگان، ایران، saraabbasi700@gmail.com
^۲استادیار زلزله شناسی، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان، ایران، abbas.gholam@hormozgan.ac.ir

چکیده

تشخیص زمین لرزه طبیعی از انفجار، علاوه بر کاربرد نتایج علمی آن در تشخیص سیگنال‌های مشابهی که دارای چشمه فیزیکی متفاوتند، از نقطه نظر مسائل سیاسی مرتبط با آزمایش انفجارهای هسته‌ای نیز نقش مهمی دارد. هرگاه انفجاری هسته ای رخ دهد، صدها ایستگاه، آن را ثبت می‌کنند. لرزه نگاشت ناشی از انفجار، ویژگی‌های خاصی دارد که با زلزله تکتونیکی متفاوت است. شکل موج، سازوکار چشمه، عمق، بزرگی و میزان انرژی آزاد شده و سایر ویژگی‌های زمین لرزه و انفجار با هم متفاوت‌اند. با شناخت این ویژگی‌ها، انفجار و زمین لرزه از یکدیگر قابل تشخیص می‌باشند. زمین لرزه سپتامبر ۲۰۱۷ کره شمالی، با استفاده از روش برگردان شکل موج بررسی گردیده و تشخیص داده شده است که این زمین لرزه، طبیعی نبوده و ناشی از آزمایش یک بمب هسته‌ای زیر زمینی در این کشور بوده است.

واژه‌های کلیدی: زمین لرزه، انفجار هسته‌ای، برگردان شکل موج

Investigation of the North Korea's September 3, 2017 Nuclear Test, Using Waveform Inversion

Sara Abbasi¹, Abbas Gholamzadeh²

¹M.s.c student of seismology, Physics Department, Faculty of science, University of Hormozgan, Iran

²Assistant Professor of seismology, Physics Department, Faculty of science, University of Hormozgan, Iran

Abstract

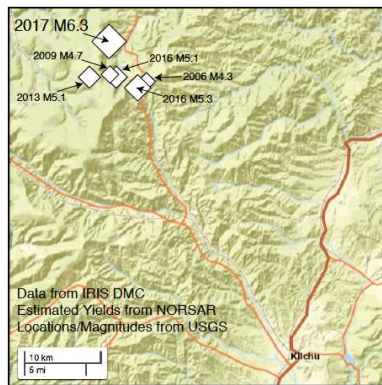
Detecting the natural earthquake from the explosion, apart from its scientific effects in detecting similar signals of a different physical source, is also important in political issues related to the testing of nuclear explosions. When a nuclear explosion occurs, hundreds of stations record it. The explosion seismogram, has specific characteristics that are different from the tectonic earthquake. The waveform, the focal mechanism, the depth, magnitude and amount of released energy and other characteristics of the earthquake and explosion are different. By knowing these features, explosions and earthquakes can be distinguished from each other. North Korea's September 3, 2017 earthquake, using the waveform inversion method Checked out and Detected that the earthquake was not natural, But also due to underground nuclear testing in this country.

Keywords: Earthquake, Nuclear Explosion, Waveform inversion

۱ مقدمه

اصطلاح زمین لرزه شامل هر نوع ارتعاشی است که موجب ایجاد امواج لرزه‌ای شود. چشمه‌های لرزه‌ای به دو دسته مصنوعی و طبیعی تقسیم می‌شوند. انفجار، یک چشمه مصنوعی و زلزله تکتونیکی ناشی از حرکت در گسل، چشمه‌ای طبیعی است. چگونگی تشخیص زمین لرزه طبیعی از انفجار، علاوه بر سودمندی آن در تشخیص سیگنال‌های مشابهی که دارای چشمه فیزیکی متفاوت‌اند، در مسائل سیاسی مرتبط با آزمایش انفجارهای هسته‌ای نیز نقش دارد. استفاده از "زلزله شناسی تشخیصی یا قانونی (Forensic seismology)" برای تشخیص آزمایش‌های هسته‌ای، به تاریخ آغاز سلاح هسته‌ای بر می‌گردد. در سال ۱۹۴۶، آمریکا، اولین آزمایش اتمی جهان را انجام داد. امواج این انفجار، در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری جهان ثبت و دانشمندان متوجه شدند که از زلزله شناسی می‌توان برای نظارت بر این آزمایش‌ها استفاده کرد. برای ثبت امواج ناشی از آزمایش‌های زیر زمینی، دانشمندان آرایه‌های لرزه نگاری و لرزه نگارهای حساس تری را نصب کردند. در سال ۱۹۹۶، پیمان تحریم آزمایش هسته‌ای (CTBT)، مطرح و برای اجرای آن، یک سیستم نظارت بین المللی با بیش از ۵۰ ایستگاه مانیتورینگ

لرزه نگاری برای شناسایی آزمایش‌های هسته ای ایجاد شد. هر زلزله یا انفجار، انواع مختلفی از امواج را ایجاد می‌کند که توسط لرزه نگارها ثبت می‌شود. نگاشت انفجار، ویژگی‌های خاصی دارد که با زلزله تکتونیکی متفاوت است، بنابراین امکان پنهان‌کاری در زمینه آزمایش هسته‌ای، وجود ندارد. تفاوت‌های کلی زمین‌لرزه و انفجار بدین شرح است؛ ۱- زلزله شکسته شدن سنگ است و نیاز به یک جفت نیرو است که سنگ را بشکند. اما انفجار، شکسته شدن نیست و از همه جهات بر کانون فشار وارد می‌شود. ۲- انفجار، عمق کمتری دارد. ۳- نوع، دامنه امواج و بزرگی انفجار با زمین‌لرزه متفاوت است. ۴- مکانیزم چشمه آن‌ها نیز تفاوت دارد. تاکنون مطالعات مختلفی در مورد تشخیص زمین‌لرزه از انفجار، انجام شده است (بلاندفورد، ۱۹۹۷) و روش‌های متفاوتی برای تشخیص این دو از هم وجود دارد. در این مطالعه، نتایج بررسی‌های انجام گرفته به کمک روش برگردان شکل موج (درگر، ۲۰۱۷)، روی آزمایش هسته ای کره شمالی در سپتامبر ۲۰۱۷ که منجر به ایجاد یک زلزله $M_b = 6.3$ شد را تحلیل می‌کنیم. این ششمین و قوی‌ترین آزمایش هسته ای کره شمالی بوده و قدرت انفجاری ۱۰۰ کیلو تن تی‌ان-تی داشت که ۱۰ برابر قوی‌تر از آزمایش قبلی این کشور بوده است. آزمایش‌های پیشین کره شمالی در اکتبر ۲۰۰۶، مه ۲۰۰۹، فوریه ۲۰۱۳، ژانویه و سپتامبر ۲۰۱۶ انجام شده که به ترتیب، زمین لرزه‌هایی با بزرگی‌های 4.2 ، 4.7 ، 4.7 ، 4.7 ، 5.1 ، 5.3 ، و انرژی‌هایی معادل 1 ، $2/8$ ، $6/5$ ، $4-5$ و 10 کیلو تن تی‌ان‌تی را ایجاد کرده بودند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت آزمایش‌های هسته ای انجام گرفته در کره شمالی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی.

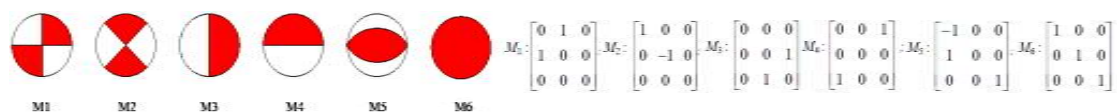
۲ معرفی روش برگردان شکل موج و حل تانسور ممان لرزه ای برای تعیین سازو کار یک رویداد لرزه ای:

برای تعیین سازوکار کانونی زلزله با کمک لرزه‌نگاشت، از روش‌های مبتنی بر قطبیت حرکت اولیه موج P و روش‌های دیگر بر پایه مدل‌سازی شکل امواج حجمی و سطحی استفاده می‌شود که بر اساس تعیین تانسور گشتاور و برگردان آن، برای تعیین مشخصات چشمه لرزه‌ای هستند. مدل‌سازی شکل موج، بر اساس بکارگیری کل شکل موج و یا بخشی از آن است. در سال ۲۰۰۱، زاهدانیک (Zahradnik) و همکاران، روشی به نام ایزولا (ISOLA (Isolated Asperities)) ارائه کردند که از کل شکل موج استفاده می‌کند. تانسور ممان مرکزوار، برای تعریف مکان بهترین چشمه بدست آمده از برگردان همزمان مکان، زمان و شکل موج زلزله تعریف شده و برای محاسبه‌اش، از روش‌هایی مانند حل CMT هاروارد و ایزولا استفاده می‌شود. ایزولا بر اساس نمایش چشمه نقطه ای و واهمیخت تکراری، برای رکوردهای دور لرز کار می‌کند و توابع گرین، بر اساس روش عددی موج گسسته بوشن، محاسبه می‌گردند. در نرم افزار ایزولا، ابتدا مولفه‌های تانسور ممان، سپس مقادیر بردارهای ویژه تانسور که پارامترهای کانونی‌اند (امتداد، شیب و ریک)، تعیین می‌گردند. تانسور ممان اسکالر و تجزیه تانسور به قسمت‌های دو زوج نیرو، غیر دو زوج نیرو و حجمی، از بردارهای ویژه، نتیجه می‌شود. برای تعیین مشخصات چشمه، تانسور ممان را از روی لرزه‌نگاشت، برگردان می‌کنیم. یک نگاشت، شامل هم‌آمیخت چشمه، محیط و دستگاه است. ابتدا باید اثر دستگاهی را حذف و مشخصات محیط را معلوم در نظر گرفت تا بتوان مشخصات چشمه را با کمک برگردان، بدست آورد. اگر نگاشت را تحت توابع خطی مولفه‌های تانسور بنویسیم (رابطه ۱)، عملیات برگردان، ساده می‌شود:

$$U = G M \quad (1)$$

در معادله ۱، U ، لرزه نگاشت، G ، توابع گرین و M ، مولفه‌های تانسور ممان و مجهول‌های مسئله هستند. معادله ۱، با استفاده از روش خطی حداقل مربعات، حل و مولفه‌های تانسور تعیین می‌شوند. در واقع نگاشت‌ها، توابعی خطی از مولفه‌های تانسور

ممان‌اند که می‌توان آن‌ها را با وارون‌سازی، برای محاسبه مؤلفه‌های تانسور ممان و محاسبه پارامترهای چشمه به کار برد. شش تانسور ممان پایه در شکل ۲ نشان داده شده که سازوکار کانونی ششم، نشانگر تغییرات حجمی و غیربرشی در کانون است (مثل انفجار).

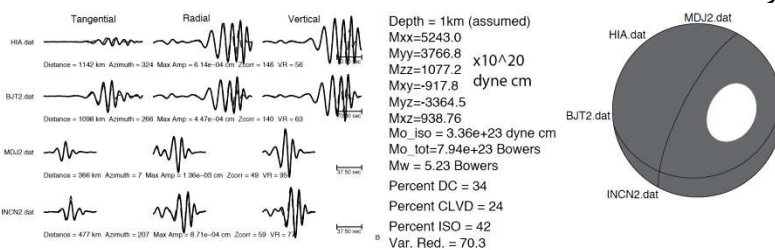


شکل ۲. شش تانسور ممان پایه و نمایش سازوکار آن‌ها.

به طور کلی، چشمه‌های لرزه‌ای به چشمه همسانگرد و چشمه جابجایی یا شکستگی، تقسیم می‌شوند. چشمه انفجار همسانگرد است. مجموع عناصر قطر اصلی تانسور ممان چشمه همسانگرد، مخالف صفر است که به معنی تغییر حجم در این چشمه است. چشمه شکستگی برشی (دو زوج نیرو) نیز مربوط به یک زلزله تکتونیکی است و در این مورد یک صفحه گسل داریم. مجموع عناصر قطر اصلی تانسور ممان چشمه زمین‌لرزه، صفر است و تغییر حجم ندارد.

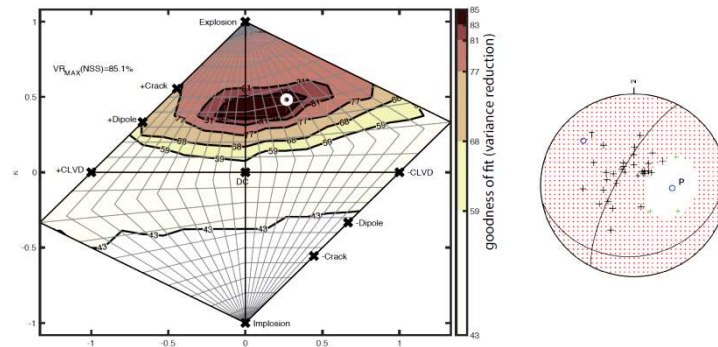
۳ مطالعه آزمایش هسته ای کره شمالی در ۳ سپتامبر ۲۰۱۷ و بررسی آن با استفاده از برگردان شکل موج

در سپتامبر ۲۰۱۷ میلادی، زمین‌لرزه‌ای به بزرگی $M_w \ 5/6 - 5/2$ ، در کره شمالی ثبت شد. شکل ۳، نتایج حاصل از برگردان شکل موج این رویداد که مشکوک به انجام یک آزمایش هسته‌ای بود، می‌باشد (درگر، ۲۰۱۷). شکل موج‌های کامل امواج با پریود بالا (۰.۰۲ تا ۰.۰۵ هرتز)، در چهار ایستگاه، مشترکاً و با کمک پلاریته‌های امواج P دورلر، برای تعیین ویژگی‌های چشمه، برگردان شده‌اند و با انجام این برگردان و به حداقل رساندن اختلاف بین نگاشت‌های مصنوعی و مشاهده‌ای، حل تانسور ممان این رویداد بدست آمده است. سمت راست شکل ۳، مؤلفه‌ها و مقادیر ویژه تانسور ممان این چشمه، درصد بخش-های برشی یا دو زوج نیرو (DC)، CLVD، بخش ایزوتروپیک تانسور ممان و مقدار کاهش واریانس پس از انجام برگردان را نشان می‌دهد. بعد از حل تانسور ممان، تصویر سازوکار کانونی رویداد، بصورت نیمکره‌ای تقریباً تک‌رنگ است که نشان‌دهنده فشارشی، همسانگرد و انفجاری بودن چشمه می‌باشد. بخش کوچک سفید رنگ، منطقه کششی است و علت وجود آن این است که سنگ‌های مجاور، در اثر عبور امواج، شکسته و انرژی تغییر شکل الاستیکی، آزاد و باعث ایجاد نمودارهایی مانند نمودارهای زمین‌لرزه، در دستگاه‌ها شده است.



شکل ۳. نتایج حاصل از برگردان شکل موج یک زمین‌لرزه مشکوک به انجام آزمایش هسته ای کره شمالی (درگر، ۲۰۱۷).

شکل ۴، نمودار هادسون است و شامل بخشهای Implosion، Explosion، CLVD، Dipole و Crack می‌باشد. این نمودار، نشان‌دهنده نوع چشمه، بعد از انجام برگردان و تطابق نگاشت‌های مصنوعی و مشاهده‌ای است. نتیجه برگردان مشترک حرکت اولیه شکل موج (از شکل موج‌های ۳ ایستگاه)، در این نمودار، ترسیم شده و دایره سفید در نقشه، بهترین و مناسب‌ترین حل است. همانطور که مشخص است، این رویداد، عمدتاً نزدیک به بخش انفجاری (Explosion) است و نمایانگر وجود یک ماده انفجاری قابل توجه می‌باشد. سمت راست شکل ۴، نشان‌دهنده بخش‌های فشارشی و کششی حاصل شده از قطبیت حرکت اولیه موج و نتایج برگردان تانسور ممان این چشمه می‌باشد. این چشمه، فشارشی است و مقدار ممان حجمی، $36 \times 10^{+23}$ dyne- $M_w = 4.95$ cm و ۴۲ درصد تانسور ممان کل می‌باشد.



شکل ۴. قرار دادن نتایج برگردان شکل موج انفجار کره شمالی در نمودار هادسون (هادسون و همکاران، ۱۹۸۹)، (شکل از درگر (۲۰۱۷)).

۳ نتیجه‌گیری

با مشاهده نتایج برگردان انجام شده شکل موج زلزله کره شمالی و حل تانسور ممان آن، دیده شد که از آن جایی که چشمه این زلزله، انفجاری است، درصد بخش ایزوتروپیک تانسور ممان، بیشتر از درصد بخش برشی می‌باشد. سازوکار بدست آمده برای این چشمه، نشاندهنده چشمه‌ای همسانگرد و فشارشی است که در تمام جهات، دامنه امواج، یکسان است و تصویر مکانیزم کانونی آن یک نیمکره تقریباً تک‌رنگ و فشارشی می‌باشد. ۸۰ درصد امواج این رویداد، مشابه انفجار و ۲۰ درصد، مانند زمین‌لرزه‌اند، چون برخی فشارهای درونی زمین، همزمان با انفجار، آزاد شده‌اند. در کانون انفجار، حرکات اولیه، فشارشی و با دامنه یکسان و در زمین‌لرزه، حرکات اولیه، فشارشی و کششی و با دامنه و قطبیت متفاوت در جهات مختلف است که بخش‌های کششی و فشارشی توسط دو صفحه اصلی و کمکی، از هم جدا شده‌اند.

منابع

- Blandford, R. R., Discrimination between earthquake and underground explosions: *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 5, 1997, 111-122.
- Dreger, D., Source-type inversion result for the DPRK nuclear test, *Incorporated Research Institutions for Seismology*, 2017, University of California, Berkeley.
- Hudson, J. A., R. G. Pearce, and R. M. Rogers, Source type plot for inversion of the moment tensor, *J. Geophys. Res.*, 94, 1989, 765-774, doi:10.1029/JB094iB01p00765.
- Zahradnik, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E. and Tselentis, G., Iterative deconvolution of regional waveforms and double-event interpretation of the 2003 Lefkada earthquake, Greece. *Bulletine of the Seismological Society of America* 95, 2005, 159-172.