

# برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک با استفاده از موج P

## لرزه‌نگاشتهای SRO مشهد

نوشته: مازیار حقیقی\*، دکتر عبدالرحیم جواهریان\* و احمد سدیدخوی\*

### Yield Estimation of Semipalatinsk Nuclear Explosions Using P- Waves from SRO, Mashhad

By: M. Haghighi\*, Dr. M. Javaherian\* & A. Sadikhoy\*

#### چکیده

استفاده از موج P در برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی، اجتناب ناپذیر است، چرا که این موج، تنها موجی است که در یک انفجار، به یقین تولید می‌شود. در بعضی شرایط، ممکن است فازهای دیگر مانند Lg ثبت نشوند. با توجه به اینکه مقدار کمی از کل انرژی یک انفجار هسته‌ای به موج کشسان تبدیل می‌شود، بنا بر این کالیبره کردن، جزء جدایی ناپذیر برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی است. از سوی دیگر، مقدار موج کشسان تولید شده در یک انفجار، وابسته به محیط در برگیرنده انفجار می‌باشد که این موضوع نیز بر لزوم کالیبره کردن هر محل انفجار تأکید می‌کند.

در این مقاله، از میان حدود ۵۰ لرزه‌نگاشت، تعداد ۲۵ لرزه‌نگاشت مؤلفه قائم کوتاه دوره مربوط به انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی سمیپالاتینسک که در ایستگاه SRO (Seismic Research Observatory) مشهد ثبت گردیده است مورد پردازش قرار گرفت. در این نگاشتها، قدرت انفجار معلوم و نسبت سیگنال به نویز، بالا بوده است. با توجه به اینکه تنها یک ایستگاه گیرنده در دسترس است و نمی‌توان اثر پدیده تمرکز/واتمرکز را از بین برد، بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که از رابطه دامنه - قدرت به جای بزرگی - قدرت استفاده شود، هر چند رابطه بزرگی - قدرت نیز محاسبه شده است. استفاده از دامنه فاز "b" به دلیل آلودگی کمتر با فاز pP، پاسخ مناسب‌تری نسبت به "بیشینه دامنه برای چند ثانیه اول" به دست داده و در نتیجه استفاده از فاز "b" برای برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای توصیه می‌شود. در این مطالعه، برای به دست آوردن رابطه دامنه - قدرت از روش کمترین مربعات استفاده شده است. رابطه به دست آمده چنین است:

$$\log(A) = 0.807 \log(Y) + 1.049, R2 = 0.8014$$

**کلید واژه‌ها:** موج P، برآورد قدرت، انفجارهای هسته‌ای، سمیپالاتینسک، SRO، فاز b.

#### Abstract

Explosion-generated seismic signals have been of interest for many years, especially in connection with geophysical studies for scientific and industrial purposes. Increasing the yield of an explosion in a given type of rock does not necessarily mean a proportional increase in the seismic-signal amplitude. The geological environment in which a nuclear explosive is emplaced has a major influence on the strength of seismic signals.

Estimating the yield of underground nuclear explosions from far-field seismic waves is a difficult problem, since accurate estimates require a detailed accounting for source-region and travel-path differences between known and unknown yield events. For short-period P- waves, the first problem is to obtain an unbiased measure of the far-field energy. Conventional  $m_b$  seems unsatisfactory because of the large scatter in station values. The dominant cause seems to be wave focusing/defocusing by complex earth structure. For yield estimation, it is important to characterize each event by an unbiased measure of the P-wave energy leaving the source region. It is clearly very difficult, and perhaps impossible, to substantially reduce the scatter in conventional  $m_b$  data. The suggestion with the best theoretical support is to use the "b phase", since it is least contaminated by pP and other later arriving energy.

The data used in this study were taken from 25 Semipalatinsk test site explosions recorded by SRO located at Mashhad. Reasons for selecting 25 records from 50 total records was based on signal to noise ratio and availability of announced yields. For each event the amplitude of short-period vertical component of the records were read. Also magnification was removed from all records. With attention to epicentral distance (about 19 degrees) the first arrival is the direct P-wave passed through

the mantle. Since with one station we cannot remove focus/defocus effect, it is better to use the amplitude instead of the magnitude in order to estimate the yield. However, the yield-magnitude relationship was calculated. We could obtain better results when using "b phase" rather than the other phases. It is concluded that "b phase" is a good tool for decreasing scattering of the data. The derived relationship is:  $\log(A) = 0.807 \log(Y) + 1.049$ ,  $R^2 = 0.8014$ . So, this formula is recommended for calculating the yield of Semipalatinsk explosions recorded in SRO station, at Mashhad.

**Key words:** P- wave, yield estimation, nuclear explosions, Semipalatinsk, SRO, b phase

## مقدمه

در سال ۱۹۶۲) حدود یک پنجم همین دامنه برای انفجار هاردا (Hardhat) (۵ کیلوتن انجام شده در گرانت در NTS در سال ۱۹۶۲) بود. تحلیل‌های دیگر نشان داد که دامنه اولین نیم دورتناوب موج P برای گرانت و نمک تقریباً یکسان، برای توف متخلخل نصف دامنه گرانت و نمک، و برای آبرفت خشک حدود یک دهم دامنه گرانت و نمک است.

برای برآورد قدرت، می‌توان از دامنه یا بزرگی فازهای موج P (در حیطه زمان یا فرکانس) استفاده کرد. برای این منظور، ابتدا باید بزرگی یا دامنه مربوط به انفجار تعیین شود. سپس با توجه به وابستگی خطی بین بزرگی (یا لگاریتم دامنه) و لگاریتم قدرت، ارتباط این دو را می‌توان به دست آورد. افزون بر این، روش‌های جدیدتری همچون انطباق طیفی (template matching) توسط Taylor & Dowla (1991)، روش حد بیشینه توسط Khalturin et al (1998) و استفاده از طیف موج تراکمی در فاصله دور توسط Murphy & Barker (2001) ارائه شده است.

### عوامل تأثیر گذار بر موج P

در حالت کلی می‌توان عوامل تأثیر گذار بر روی موج دریافتی را بر حسب قابل پیش بینی بودن آن، به دو دسته عوامل قابل تصحیح و عوامل تصادفی تقسیم کرد.

### عوامل تأثیر گذار قابل تصحیح

این عوامل شامل ساختار پوسته و گوشته در نزدیکی چشمه و ایستگاه گیرنده، ساختار پوسته و گوشته در مسیر حرکت بین چشمه و گیرنده، ژرفای چشمه و اثر پاسخ دستگاه می‌شوند. دلیل اهمیت ساختار پوسته و گوشته در نزدیکی محل چشمه و ایستگاه گیرنده، به خاطر پدیده جذب در این دو محل است که در حقیقت ابتدا و انتهای مسیر حرکت موج می‌باشند. در زیر به تعدادی از این عوامل و شیوه تصحیح آنها اشاره می‌شود.

موج P تولید شده توسط انفجارها همیشه مورد توجه بوده است، زیرا تنها موجی است که با اطمینان می‌توان گفت در یک انفجار تولید می‌شود. از سوی دیگر، به دلیل اینکه موج P، موجی حجمی است، بنابراین از ویژگی‌های فیزیکی محیطی که در آن منتشر می‌شود، تأثیر می‌پذیرد که نتیجه این اثر، تغییر دامنه و در نتیجه آلودگی در انرژی محاسبه شده حاصل از انفجار می‌باشد. این به این معنی نیست که این موج کنار گذارده شود، بلکه باید به دنبال روشهایی بود که بتوان اثر عوامل تأثیر گذار و منشأ آلودگی دامنه را کاهش داد. بنابراین به شرطی می‌توان با این موج به ویژگی‌های چشمه انفجاری، مانند قدرت، پی برد که بتوان اثر محیط را از روی سیگنال دریافتی حذف کرد. اگر محیط کشسان کامل باشد، در بررسی کاهش دامنه موج گسترش هندسی مورد توجه قرار می‌گیرد. اما اگر محیط کشسان کامل نباشد، پدیده جذب نیز افزون بر گسترش هندسی باید در نظر گرفته شود. از آنجا که هدف، برآورد قدرت (مقدار کل انرژی آزاد شده) انفجارهاست، پس حالت آرمانی این است که موج دریافتی کاملاً دست نخورده باشد. اما در واقع، موج دریافتی همان موج تولیدی نیست و باید به دنبال راههایی بود که بتوان اثر محیط انتشار و دیگر عوامل را از روی موج دریافتی حذف کرد. یکی از راهکارها می‌تواند استفاده از امواج دیگر، مانند امواج سطحی،  $P_L$  و کدا باشد، اما این امواج ممکن است در برخی شرایط تولید نشوند. برای مثال زمانی می‌توان فاز  $P_L$  را دریافت کرد که بین چشمه و گیرنده، پوسته اقیانوسی وجود نداشته باشد. به هر حال با وجود این که برآورد قدرت از راه استفاده از موج P پراکندگی بیشتری نسبت به دیگر روشها نشان می‌دهد، استفاده از این موج به دلیل اهمیت آن اجتناب ناپذیر است.

عوامل زیادی بر دامنه موج تراکمی تولید شده توسط یک انفجار اثر گذار است که یکی از مهم‌ترین آنها محیط انفجار می‌باشد. تأثیر محیط در برگیرنده انفجار در شدت (strength) موج تراکمی بسیار اهمیت دارد. برای مثال، Werth & Herbth (1963) یافتند که دامنه اولین نیم دورتناوب موج P برای انفجار فیشر (Fisher) (۱۳/۵ کیلوتن انجام شده در آبرفت در NTS Nevada Test Site)

### جذب در ناحیه گیرنده و تصحیح آن

دامنه و طول سیگنالهای لرزه‌ای ثبت شده در یک ایستگاه برای فاصله دور، به شدت تحت تأثیر ساختار پوسته و گوشته بالایی زیر ایستگاه است. اهمیت تصحیح جذب برای گیرنده، روشن است چرا که باعث می‌شود یک منبع آلودگی دامنه از بین برود. برای انجام این تصحیح باید نیمرخ ژرفای سرعت در زیر هر گیرنده در دسترس باشد. سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار  $\Delta m_b$  به دست می‌آید (Marshall et al, 1979).

$$\Delta m_b = m_{b2} - m_{b1} = \left( \frac{Q_{a1}^{-1} - Q_{a2}^{-1}}{T a} \right) \pi \log_{10} e \quad (1)$$

که معمولاً اندیس ۲ اشاره به مرجع (مناطق سیر)،  $m_b$  بزرگا،  $Q_a$  ضریب کیفیت مؤثر،  $R/a$  زمان سیر تا ژرفای مورد نظر (که برای امواج در فاصله دور ژرفای ۷۰۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود) و  $T$  دوره تناوب است.

### جذب در ناحیه چشمه و تصحیح آن

این تصحیح مانند تصحیح برای گیرنده است با این تفاوت که باید از مدل پوسته و گوشته مربوط به محل چشمه استفاده شود.

### ژرفای چشمه و تصحیح آن

با توجه به مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که ژرفای چشمه در دامنه سیگنال دریافتی و در نتیجه در بزرگای حاصله اثر گذار است. مهم‌ترین علت این تأثیر، تداخل بین فاز  $pP$  و  $P$  است که می‌تواند سازنده، مخرب یا بدون تداخل باشند. تصحیح ژرفا، حداکثر حدود ۰/۲ واحد بر مقدار بزرگای محاسبه شده اثر گذار است (Marshall et al, 1979). شیوه این تصحیح این گونه است که ابتدا باید نسبت تصحیح ژرفا (depth correction ratio) با رابطه زیر محاسبه شود.

$$DCR = \frac{pP - P \text{ interval (in seconds)}}{P - \text{wave period (in seconds)}} \quad (2)$$

سپس با توجه به نمودار موجود در شکل ۱ مقدار تصحیح ژرفا را می‌توان به دست آورد.

### عوامل تأثیر گذار تصادفی

مهم‌ترین عامل تصادفی که باید تصحیح شود، مربوط به توزیع سرعت در مسیر حرکت موج، به خصوص در محل ایستگاه است. با توجه به اینکه توزیع سرعت، کنترل کننده مسیر حرکت پرتو است، یعنی بسته به نوع توزیع، سرعت پرتوها ممکن است به یکدیگر نزدیک یا از هم دور شوند، که به این پدیده به ترتیب تمرکز/واتمرکز (focus/defocus) گفته می‌شود. چون با افزایش پرتوها در واحد سطح، در واقع انرژی در واحد

یکدیگر را خنثی می‌کنند.

$$m_{\text{corrected for F/D}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (3)$$

که  $m_{\text{corrected for F/D}}$  بزرگی تصحیح شده برای پدیده تمرکز/واتمرکز،  $n$  تعداد ایستگاهها و  $m_i$  بزرگی در ایستگاه  $i$ ام است.

### استفاده از موج P در بر آورد قدرت انفجارهای هسته‌ای

برای به دست آوردن رابطه بزرگا-قدرت با استفاده از موج  $P$ ، راههای مختلفی وجود دارد که به طور کلی، شامل استفاده از حیطه زمان و حیطه فرکانس می‌شوند. در این مطالعه، با توجه به آنالوگ بودن داده‌های انفجارها، تنها استفاده از حیطه زمان امکان پذیر بود. در این روش، ابتدا بزرگای انفجار در حیطه زمان محاسبه می‌شود. شیوه به دست آوردن بزرگا به این صورت است که بر اساس شکل ۲، دامنه بیشینه برای چند ثانیه اول موج  $P$  به همراه دوره تناوب ظاهری آن از روی لرزه نگاشت برداشت شده و سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار بزرگا محاسبه می‌شود.

$$m_b = \log_{10} \frac{A}{T} + B(\Delta, h) \quad (4)$$

که در آن،  $A$  دامنه بیشینه بر حسب نانومتر که اثر بزرگنمایی دستگاه برای دوره تناوب  $T$  از روی آن حذف شده،  $T$  دوره تناوب ظاهری به ثانیه  $B(\Delta, h)$  تصحیح مربوط به اثر فاصله است که در بر گیرنده دو عامل گسترش هندسی و پدیده جذب در فاصله چشمه تا گیرنده می‌باشد. با توجه به اینکه هدف، به دست آوردن انرژی حاصل از انفجار است بنابراین، این تصحیح ضروری می‌باشد. دانشمندان زیادی  $B(\Delta, h)$  را به دست آورده‌اند که مهم‌ترین آنها توسط Weith & Clawson (1972) ارائه شده است، که در هر حال بهتر است برای فواصل کمتر از ۲۰ درجه،

غیر این صورت، ممکن است خطای بزرگی در به‌دست آوردن قدرت صورت گیرد. علت این امر متفاوت بودن عوامل اثر گذار (جذب، ساختار پوسته و گوشته بالایی، تخلخل در محیط انفجار و...) بر رابطه بزرگا- قدرت از یک منطقه به منطقه دیگر است. با رسم داده‌های حاصل از بزرگا (یا دامنه) در برابر قدرت معادل آنها برای یک دسته انفجار، معمولاً پراکندگی داده‌ها نسبتاً زیاد است (در حد یک تا دو واحد بزرگی). دانشمندان مختلف برای کاهش این پراکندگی راه‌های زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

(۱) استفاده از فاز "b". علت کم شدن پراکندگیها در استفاده از این فاز این است که در این حالت کمترین آلودگی فاز اصلی با فاز p وجود دارد.

(۲) انجام تصحیحات مربوط به ژرفای چشمه، جذب ناحیه چشمه و جذب ناحیه ایستگاه گیرنده.

(۳) استفاده از حیطه فوریه در تعیین بزرگا.

برای داده‌های استفاده شده در این مقاله، تنها استفاده از قسمت (۱) امکان‌پذیر بود که نتایج رضایت بخشی نیز به‌دست آمد و در نمودارهای رسم شده آورده شده است. به گونه‌ای که در شکل ۴ دیده می‌شود مقدار ضریب وابستگی خطی  $0.80$  است که نتیجه مطلوبی به نظر می‌رسد.

### روش کار

در این بررسی، ابتدا ۲۵ انفجار با بزرگا و قدرت معلوم (با توجه به مقادیر قدرت منتشر شده توسط Stevens & Murphy (2001) و  $m_b$  محاسبه شده از روی لرزه نگاشت‌های مؤلفه قائم دوره کوتاه SRO مشهود) از میان حدود ۵۰ انفجار انتخاب شدند. در این مطالعه لرزه نگاشت‌هایی انتخاب شدند که قدرت انفجار آنها معلوم و نسبت سیگنال به نوفه آنها بیشتر از ۲ بود. فهرست این انفجارها در جدول ۱ آمده است.

گام بعدی محاسبه فاصله بین ایستگاه SRO مشهود و منطقه سیمپلایزینگ است که در مختصات کروی فاصله رومرکز بین این دو محل حدود ۱۹ درجه به‌دست آمده است. به‌دست آوردن فاصله دو مزیت دارد، نخست اینکه برای تعیین  $B(\Delta, H)$  لازم است و دوم اینکه می‌توان دریافت که فازهای ثبت شده در ایستگاه مورد نظر کدام هستند. با توجه به این مطالب از روی جدولهای مربوطه  $B(\Delta, H)$  برای ۱۹ درجه  $2.79$  و اولین فاز دریافتی موج P مستقیم عبوری از گوشته تعیین شد. بنابراین، از این به بعد هر جا موج P ذکر می‌شود منظور موج P است.

قدم بعدی قرائت دامنه فاز مورد نظر است که برای هر انفجار دو برابر دامنه فاز "b" و قله تا قله بیشینه دامنه فاز P برای چند ثانیه اول قرائت شد. برای مشخص شدن نحوه قرائت یک نمونه لرزه نگاشت در شکل ۳ آورده شده است.

از منحنیهای محلی مربوط به آن منطقه استفاده شود. در به‌دست آوردن رابطه بزرگا- قدرت باید به این نکته توجه شود که تعداد ایستگاههای گیرنده، زیاد و از پراکندگی خوبی برخوردار باشند تا بتوان اثر پدیده تمرکز/واتمرکز را حذف کرد. چنانچه تعداد ایستگاهها بسیار اندک باشد، بهتر است که رابطه دامنه- قدرت تعیین شود.

از آنجا که مقدار کمی از انرژی یک انفجار هسته‌ای به امواج کشسان تبدیل می‌شود و بقیه انرژی آن به شکلهای دیگر انرژی تبدیل در می‌آید، بنابراین نمی‌توان تنها با محاسبه بزرگا به کل انرژی حاصل از انفجار (قدرت) دست یافت.

برای به‌دست آوردن انرژی کل از راه بزرگا (یا دامنه) یا به بیان دیگر، برای انجام کالیبراسیون، باید محل انفجار را با استفاده از چندین انفجار با قدرتها و ژرفاهای متفاوت کالیبره کرد. شیوه این کار چنین است که قدرت واقعی هر انفجار، باید توسط انجام دهندگان اعلام شود و بزرگا (یا دامنه)های ثبت شده از راه لرزه نگاشت‌ها نیز محاسبه شود. سپس نموداری تهیه می‌شود که بر روی محور افقی لگاریتم قدرت به کیلوتن (هر کیلوتن TNT معادل  $10^{11}$  کالری (Rodean, 1971)) و بر روی محور قائم بزرگا (یا لگاریتم دامنه) قرار می‌گیرد. آنگاه برای هر انفجار میانگین، بزرگا (یا دامنه)های به‌دست آمده از همه ایستگاهها بر حسب لگاریتم قدرت رسم می‌شود و این کار برای همه انفجارها انجام می‌گیرد. با این حساب به تعداد انفجارها بر روی نمودار، نقطه پیاده می‌شود. این نقاط دارای وابستگی خطی هستند، و در واقع این دو کمیت مستقل از یکدیگر نیستند، بنابراین می‌توان تابعی به‌دست آورد که این دو را به یکدیگر ارتباط دهد. تابعی که این دو کمیت را به یکدیگر ارتباط می‌دهد، یک تابع خطی با فرمول عمومی زیر است (Sikka et al, 2000).

$$m_b = a + b \log(Y) \quad (5)$$

که در آن،  $a$  و  $b$  دو ضریب ثابت برای هر محل هستند. بعد از رسم بزرگا (یا دامنه)ها در برابر لگاریتم قدرت، با استفاده از روش کمترین مربعات، ضرایب  $a$  و  $b$  به‌دست می‌آیند.  $a$  و  $b$  ثابتهای بیان کننده محل انفجار هستند. ضریب  $a$  وابسته به محل انفجار و ضریب  $b$  در یک محدوده تقریبی باریک از  $0.75$  تا  $0.85$  تغییر می‌کند که آن هم وابسته به محل انفجار است. با به‌دست آمدن این ضرایب، رابطه بزرگا- قدرت (یا دامنه- قدرت)، مربوط به منطقه مورد نظر به‌دست می‌آید. اکنون اگر در این منطقه انفجاری صورت گیرد، بدون دانستن قدرت انفجار و تنها از بزرگا (یا دامنه) و قرار دادن بزرگا (یا دامنه) آن در رابطه به‌دست آمده برای این منطقه، می‌توان قدرت انفجار را به‌دست آورد.

به دلیل متفاوت بودن رابطه بزرگا- قدرت برای محیطهای انفجار مختلف، از رابطه مربوط به هر منطقه، تنها باید برای آن منطقه استفاده شود در

### ارتباط قدرت و دامنه فاز "b"

۱- برای هر منطقه باید از رابطه قدرت- بزرگای مربوط به همان منطقه استفاده شود. در صورت استفاده از روابط به دست آمده برای مناطق دیگر، ممکن است خطاهای بزرگی رخ دهد.

۲- چنانچه هدف، تنها محاسبه قدرت باشد و با شرط اینکه محل چشمه و ایستگاهها تغییر نکنند، می توان به جای بزرگا از دامنه استفاده کرد. به بیان دیگر، به جای رابطه بزرگا- قدرت می توان رابطه دامنه- قدرت را به کار برد.

۳- برای به دست آوردن رابطه دقیق تری از ارتباط دامنه- قدرت مربوط به انفجارهای هسته‌ای استفاده از فاز "b" توصیه می گردد. رابطه به دست آمده از راه این فاز عبارت است از:

$$\log(A) = 0.807 \log(Y) + 1.049, R^2 = 0.8014$$

که در برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمپالائینسک در ایستگاه مشهد، استفاده از آن توصیه می شود.

۴- ایستگاههای ثبت کننده امواج لرزه‌ای باید پراکندگی مکانی خوبی داشته باشند، چرا که باید اثر مربوط به پدیده تمرکز / واتمرکز را با میانگین گیری بتوان از بین برد در غیر این صورت نمی توان بزرگی واقعی را به دست آورد. به همین خاطر در این مقاله استفاده از رابطه دامنه- قدرت پیشنهاد شده است.

### تشکر و قدردانی

این مطالعه در قالب طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران به شماره ۶۵۲/۳/۸۱۸ با عنوان برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی خاور قزاقستان با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های پایگاه لرزه‌نگاری SRO مشهد انجام شده است. بنابراین از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران، حوزه معاونت پژوهشی موسسه ژئوفیزیک و گروه فیزیک زمین تشکر و قدردانی می شود. همچنین از مرکز لرزه‌نگاری کشوری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و کارکنان این مرکز به ویژه آقای محمد حسین حسن نیا به خاطر در اختیار قرار دادن لرزه‌نگاشت‌های مربوط به رخدادها تشکر و قدردانی می شود.

بعد از قرائت قله تا قله فاز "b" و تبدیل آن به نانومتر، می توان به حذف اثر بزرگنمایی دستگاه پرداخت که این عمل برای همه لرزه‌نگاشت‌ها صورت گرفت. بین دامنه و قدرت با توجه به روش کمترین مربعات، رابطه زیر به دست آمد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$\log(A) = 0.807 \log(Y) + 1.049, R^2 = 0.8014 \quad (5)$$

که R2 ضریب همبستگی خطی و A قله تا قله فاز "b" است.

### ارتباط قدرت و بیشینه دامنه

روش کار دقیقاً شبیه بخش پیش است با این تفاوت که در اینجا، باید از دامنه بیشینه به جای دامنه فاز "b" استفاده شود. بین بیشینه دامنه و قدرت با توجه به روش کمترین مربعات، رابطه زیر به دست آمده که در شکل ۵ آورده شده است.

$$\log(A_{max}) = 0.744 \log(Y) + 1.305, R^2 = 0.6362 \quad (6)$$

که در آن، Amax قله تا قله بیشینه دامنه برای چند ثانیه اول می باشد

### ارتباط قدرت و بزرگا

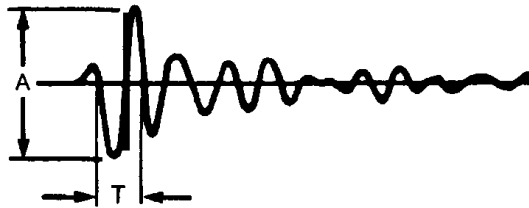
با توجه به اینکه تنها یک ایستگاه در دسترس است بهتر است دامنه بیشینه به بزرگا تبدیل نشود و از روابط مربوط به دامنه استفاده شود، چرا که نمی توان پدیده تمرکز/واتمرکز را از بین برد. به هر حال بزرگا برای هر انفجار محاسبه شد. ارتباط بین قدرت و بزرگا برای دو حالت بزرگای اعلام شده و بزرگای محاسبه شده، به ترتیب در زیر آمده است که نمودار آنها نیز در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب آورده شده است.

$$m_b = 0.660 \log(Y) + 4.660, R^2 = 0.7516 \quad (7)$$

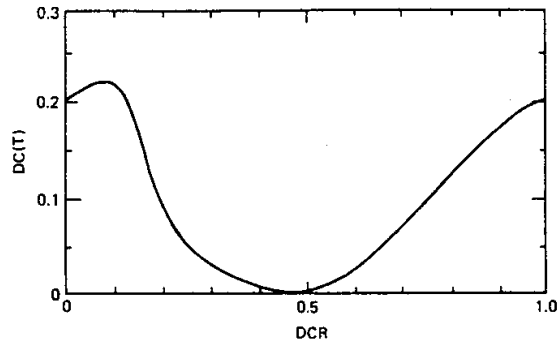
$$m_b = 0.744 \log(Y) + 4.192, R^2 = 0.6362 \quad (8)$$

### نتیجه گیری

در بررسی برآورد قدرت با استفاده از موج P برای انفجارهای هسته‌ای سمپالائینسک نتایج زیر به دست آمد:



شکل ۲- شیوه اندازه‌گیری دوره تناوب غالب و دامنه آن برای محاسبه بزرگی در حیطه زمان (Gibbons, 1998).



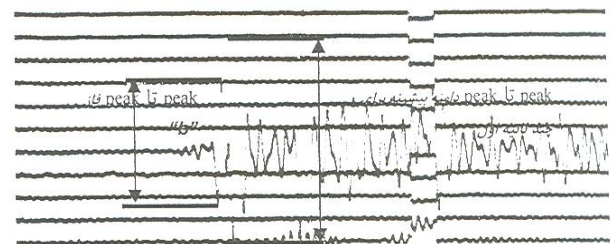
شکل ۱- نمودار تصحیح بزرگی برای ژرفای چشمه. بعد از محاسبه DCR می‌توان DC را از روی نمودار پیدا کرد (Marshall et al, 1979).

جدول ۱- فهرست انفجارهای هسته‌ای زیر زمینی منطقه سمیپالاتینسک برای محاسبه رابطه برآورد قدرت با استفاده از موج P.

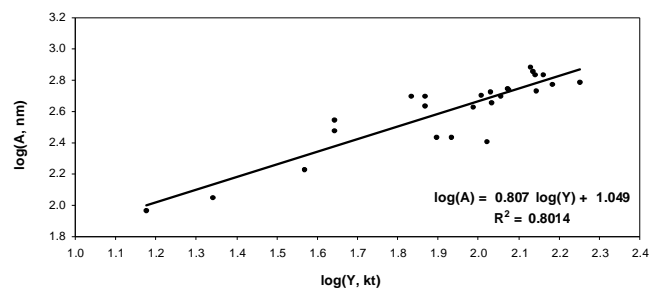
No.	*Year	*Day	*O.T. (h:m:s)	*Lat. (deg)	*Long. (deg)	*mb (announced)	**Yield (announced, kt)
1	1978	308	05:05:59.8	50.0400	78.9410	5.6	44
2	1979	188	03:46:59.8	50.0320	78.9890	5.8	97
3	1979	216	03:56:59.6	49.9000	78.9000	6.1	153
4	1979	230	02:51:59.6	49.9490	78.9370	6.1	179
5	1979	301	03:16:59.5	49.9820	78.9960	6	139
6	1980	164	03:27:00.1	49.9860	78.9980	5.6	37
7	1980	181	02:33:00.2	49.9510	78.8150	5.7	44
8	1980	286	03:34:16.6	49.9670	79.0260	5.9	102
9	1981	291	03:57:05.1	49.9270	78.8540	6.1	107
10	1982	115	03:23:07.9	49.9120	78.9060	6.1	145
11	1982	339	03:37:15.0	49.9240	78.8120	6.1	119
12	1983	163	02:36:46.0	49.9200	78.9140	6.1	138
13	1983	299	01:55:07.3	49.9120	78.8280	6.1	114
14	1984	196	01:09:13.0	49.9010	78.8790	6.2	135
15	1984	337	03:19:08.9	49.9930	79.0090	5.9	79
16	1984	351	03:55:05.1	49.9300	78.8160	6.1	137
17	1984	363	03:50:13.1	49.8750	78.7000	6	105
18	1985	115	00:57:09.0	49.9210	78.8990	5.9	74
19	1985	181	02:39:05.1	49.8570	78.6590	6	86
20	1985	201	00:53:16.9	49.9430	78.7830	6	74
21	1988	258	04:00:00.0	49.8788	78.8225	6.1	108
22	1988	317	03:30:06.3	50.0480	78.9600	5.4	15
23	1988	352	04:18:09.2	49.8790	78.9240	5.9	68
24	1989	022	03:57:09.0	49.9340	78.8150	6.1	118
25	1989	189	03:47:00.0	49.8690	78.7750	5.6	22

\*Yang et al.(2000)

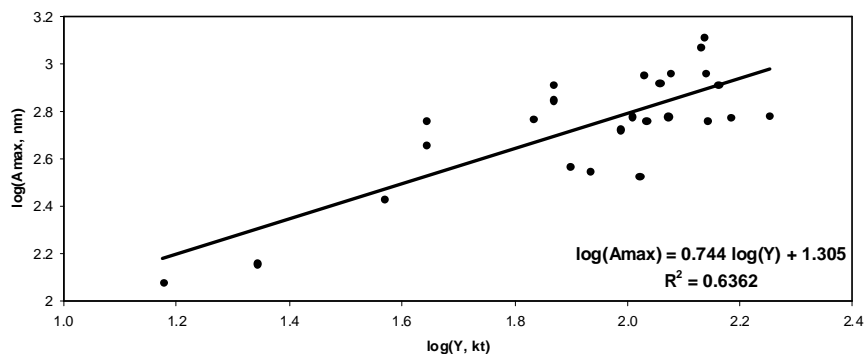
\*\*Stevens & Morphy(2001)



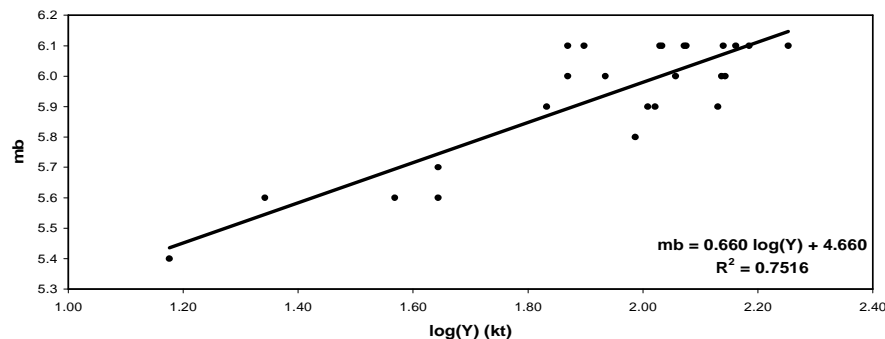
شکل ۳- لرزه نگاشت مؤلفه قائم دوره کوتاه مربوط به انفجار هسته‌ای روز ۳۳۹، سال ۱۹۸۲ سمیپالاتینسک که در ایستگاه SRO مشهود ثبت شده است. قله تا قله فاز "b" و قله تا قله دامنه بیشینه فاز P برای چند ثانیه اول بر روی شکل مشخص شده است (مقیاس غیر واقعی).



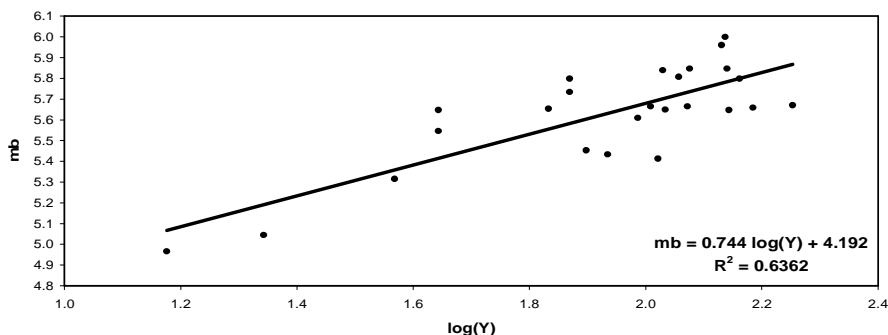
شکل ۴- ارتباط بین قله تا قله فاز "b" و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی ۲۵ انفجار منطقه سمیپالاتینسک. دامنه فاز "b" مربوط به لرزه نگاشتهای مؤلفه قائم دوره کوتاه انفجارهای مذکور ثبت شده در ایستگاه SRO مشهود می‌باشد. اطلاعات دامنه فاز "b" لرزه نگاشتهای و قدرت انفجارها در جدول آمده است. قدرت انفجارها توسط Stevens & Murphy (2001) منتشر شده است.



شکل ۵- ارتباط بین قله تا قله بیشینه دامنه فاز P و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی ۲۵ انفجار منطقه سمیپالاتینسک. دامنه فاز P مربوط به لرزه‌نگاشتهای مؤلفه قائم دوره کوتاه انفجارهای مذکور ثبت شده در ایستگاه SRO مشهود می باشد. قدرت انفجارها توسط Stevens & Murphy (2001) منتشر شده است.



شکل ۶- ارتباط بین  $m_b$  (P) منتشر شده و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی ۲۵ انفجار منطقه سمیپالاتینسک. اطلاعات مربوط به  $m_b$  (P) توسط Yang et al (2000) و قدرت انفجارها توسط Stevens & Murphy (2001) منتشر شده است.



شکل ۷- ارتباط بین  $m_b$  (P) محاسبه شده از روی لرزه‌نگاشتهای مؤلفه قائم دوره کوتاه ایستگاه SRO مشهود و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی مربوط به ۲۵ انفجار منطقه سمیپالاتینسک.  $m_b$  (P) بر اساس بیشینه دامنه فاز P محاسبه شده است. قدرت انفجارها توسط Stevens & Murphy (2001) منتشر شده است.

## References

- Bache, T. C., 1982- Estimating the yield of underground nuclear explosions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, s131-s168.
- Bolt, B. A., 1976- *Nuclear explosion and earthquakes the parted veil*, W. H. Freeman and Co., San Francisco.
- Gibbons, J. H., 1998- *Seismic verification of nuclear testing treaties*, (workshop) OTA project, May 1998, NTIS order # PB88-214853, Library of Congress Catalog Card Number 88-600523.
- Khalturin, V.I., Rautian, T.G., & Richards, P. G., 1998- The seismic signal strength of chemical explosions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 1511-1524.
- Lay, T., & Wallace, T. C., 1995- *Modern global seismology*, Academic Press, Inc., San Diego.
- Marshall, P. D., Springer, D. L., & Rodean, H. C., 1979- Magnitude correction in the upper mantle *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 57, 609-638.
- Murphy, J. R., & Barker, B. W., 2001- Application of network-averaged teleseismic p-wave spectra to seismic yield estimation of underground nuclear explosions *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2123-2171.
- Rodean, C., 1971- *Nuclear explosion seismology*, Lawrence Livermore Lab., National Technical Information Service U. S. Department of Commerce Springfield.
- Sikka, S. K., Nair, G. J., Roy, F., Kakodcar, A., & Chidambaram, R., 2000- The recent Indian nuclear tests – A seismic overview *Curr Sci*, 79, 1359-1366.
- Stevens, J. L., & Murphy, J. R., 2001- Yield estimation from surface-wave amplitudes *Pure Appl. Geophys.*, 158, 2227-2251.
- Taylor, S. R., & Dowla, F. U., 1991- Spectral yield estimation of NTS explosions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 1292-1308.
- Veith, K. F., & Clawson, G. E., 1972- Magnitude from short-period p-wave data *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 435-452.
- Werth, G. C., & Herbst, R. F., 1963- Comparison of amplitudes of seismic waves from nuclear explosions in four mediums, *J. Geophys. Res.*, 68, 1463-1475.
- Yang, X., North, R., & Romney, C., 2000- *CMR Nuclear Explosion Database (Revision 3)*, CMR Technical Report CMR-00/16.

\*مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

\*Institute of Geophysics, Tehran University.