

## برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک با استفاده از فاز ریلی لرزه‌نگاشتهای SRO مشهد

مصطفی نقی‌زاده، عبدالرحیم جواهریان، احمد سدیدخوی

موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

javahe@ut.ac.ir

(دریافت: ۸۱/۱۲/۳؛ پذیرش: ۸۲/۶/۱۱)

### چکیده

با وجود کوچک بودن مقدار بزرگی‌های امواج سطحی حاصل از انفجارها، آزاد شدن کرنش تکتونیکی در بعضی انفجارها، حضور مدهای بالاتر امواج سطحی و نیز امواج سطحی بازتاب شده از موانع طبیعی برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیر زمینی با استفاده از امواج سطحی به دلیل پراکندگی کم بزرگی‌های محاسبه شده از امواج ریلی و نیز عدم تاثیرپذیری این امواج از تغییرات کوچک مقیاس زمین و تغییرات کم‌دوام چشمه لرزه‌ای مزینهای زیادی را دارا می‌باشد.

در این مقاله از بین ۵۲ لرزه‌نگاشت مولفه قائم دوره بلند مربوط به انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی سمیپالاتینسک واقع در شرق قزاقستان که در مشهد ثبت شده بود تعداد ۱۵ لرزه‌نگاشت که دارای کیفیت و بزرگنمایی مناسب بودند و نیز مولفه حاصل از کرنش تکتونیکی در آنها وجود نداشت، انتخاب شدند. ابتدا بزرگی‌های امواج سطحی در حیطه زمان ( $M_S$ ) این انفجارها از روی لرزه‌نگاشتهای آنالوگ محاسبه گردید.  $M_S$  محاسبه شده از رابطه IASPEI به مقادیر گزارش شده برای رویدادها نزدیکتر بود. در ادامه با توجه به مقادیر معلوم قدرت انفجارها یک رابطه بین بزرگی‌های امواج سطحی در حیطه زمان و قدرت رویدادها برآزش داده شد. شیب رابطه بدست آمده نزدیک به یک است. در ادامه لرزه‌نگاشتهای مولفه قائم رقمی شدند. لرزه‌نگاشتهای رقمی شده با توجه به نرخ نمونه‌برداری صورت گرفته به حیطه فرکانس تبدیل شدند و دامنه متوسط گستره فرکانسی ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ هرتز محاسبه شد. سپس بزرگی امواج سطحی در حیطه فرکانس ( $M_{SF}$ ) نیز محاسبه شد. یک رابطه بزرگی قدرت نیز بین  $M_{SF}$  و قدرتهای معلوم انفجارها برآزش داده شد. در نهایت با مقایسه ضریب همبستگی دو رابطه و نیز با توجه به اینکه هدف بدست آوردن رابطه‌ای خاص برای SRO مشهد بود، رابطه  $M_S = 1.079 \log(Y) + 1.714$  بمنظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک در ایستگاه SRO مشهد تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: بزرگی امواج سطحی، برآورد قدرت، انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی، فاز ریلی،

SRO مشهد، سمیپالاتینسک.

## مقدمه

پیمان منع آزمایشات آستانه‌ای (Threshold Test-Ban Treaty) TTBT بین ایالات متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق که در سال ۱۹۷۶ منعقد شد قدرت آزمایشات هسته‌ای زیرزمینی را تا ۱۵۰ کیلوتن محدود کرد. به همین علت، برآورد دقیق قدرتهای موثر در تغییرات دامنه‌های لرزه‌ای اهمیت بارزی یافت. این موضوع باعث شکوفایی زمینه‌ای برای برآورد قدرتهای انفجار با استفاده از امواج سطحی شد. این برآورد قدرتها سپس به عنوان یک کنترل انطباقی با دیگر فازها استفاده می‌شوند یا با دیگر برآوردها برای بدست آوردن یک قدرت مشخص و دقیق با استفاده از همه اندازه‌گیری‌ها در زمان یکسان ترکیب می‌شوند (Stevens and Murphy, 2001).

دامنه‌های امواج سطحی حاصل از چشمه‌های انفجاری برای یک رخداد مشخص دارای تغییرات کمتری نسبت به دامنه‌های امواج درونی می‌باشند. بنابراین انتظار طبیعی می‌رود که برآوردهای قدرت حاصله از امواج سطحی دقیق‌تر از برآوردهای قدرت با استفاده از امواج درونی باشد (Bache, 1982). به هر حال، برآورد قدرت با امواج سطحی، با حضور آزادی کرنش تکتونیکی پیچیده می‌شود، که این کرنشها به مثابه یک یا چند چشمه لرزه ای واقع شده در بالای انفجار عمل می‌کنند (Day et al., 1987). هر چند که معکوس سازی تانسور ممان می‌تواند برای برداشتن و حذف مولفه تکتونیکی امواج سطحی استفاده شود، ولی معکوس سازی تانسور ممان برای چشمه‌های کم عمق، منحصر به فرد نیست (Stevens & McLaughlin 2001). بنابراین ممان همسانگرد انفجار به وسیله این روش با دقت لازم نمی‌تواند تعیین شود. انفجارات در جزیره و یا نزدیک یک شیب کوهستانی، امواج سطحی غیرعادی مشابه با آنهایی که توسط آزادی کرنش تکتونیکی ایجاد می‌شوند را نشان می‌دهد (Stevens et al., 1993). دامنه‌های امواج سطحی می‌توانند به عنوان یک بزرگی موج سطحی،  $M_s$ ، که به عنوان لگاریتم دامنه باضافه یک تصحیح فاصله تعریف می‌شود بیان شوند. در حالت کلی روابطی برای  $M_s$  در مقابل قدرت برای یک مجموعه داده بدست آورده می‌شود و دقت این برآوردها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مقاله، ابتدا مختصری درباره بزرگی و مفاهیم آن صحبت می‌شود، سپس  $M_s$  رخدادهای با استفاده از دو رابطه تعیین بزرگی امواج سطحی از روی لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم دوره‌بلند ایستگاه SRO مشهود محاسبه شده و با یگدیگر مقایسه و بهترین رابطه برای تعیین  $M_s$  در این ایستگاه انتخاب می‌شود. از بزرگی‌های امواج سطحی بدست آمده جهت تعیین رابطه برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک استفاده شده است.

### تعریف بزرگی

در حالت کلی می‌توان فرمول محاسبه بزرگی را به صورت زیر نوشت (Bath, 1974):

$$\left. \begin{matrix} m \\ M \end{matrix} \right\} = q(\Delta, h) + \log\left(\frac{A}{T}\right) \quad (1)$$

تابع تصحیح  $q$  به فاصله رو مرکز و عمق کانونی و همچنین نوع موج ( $R, S, P$ ) و مؤلفه استفاده شده ( $H$  یا  $Z$ ) بستگی دارد. غالباً تا مدت زیادی همه تعیین بزرگی‌ها در عمل، تنها از نسبت حداکثر دامنه جابجایی زمین ( $A$ ) بر زمان تناوب آن ( $T$ ) در داخل هر گروه موج انجام می‌شد. پس بزرگی بر روی یک رکورد لرزه‌ای از روی اندازه‌گیری‌های نقاط بسادگی محاسبه می‌شود. اغلب شگفت‌آور است که این روش ساده، نتایجی با دقت کافی بدست می‌دهد. روش در حقیقت به محدوده‌ای از دقت می‌رسد که خود زمین آن را ایجاد کرده است و جابجا کردن این محدوده دقت حتی با روش‌های خیلی پیچیده مشکل می‌باشد.

تصمیم‌گیری بر اساس  $A/T$  حداکثر، نیاز به طیف باند پهن دارد. تلاش‌هایی در این راستا انجام شده است. هرچند که با وسایلی ساده این کار صورت گرفته است. وقتی یک دستگاه باند باریک استفاده می‌شود مثلاً یک لرزه نگاشت با دوره کوتاه،  $A/T$  حداکثر به دست آمده از رکوردهای آن می‌تواند به طور قابل توجهی کمتر از  $A/T$  حداکثر واقعی برای هر موج داده شده باشد، که در نهایت منجر به بزرگی‌های خیلی پایین می‌شود، مگر اینکه تصحیحات خاصی بکار برده شود.

اهمیت اساسی بزرگی در فراهم آوردن یک طبقه‌بندی از چشمه‌های لرزه‌ای بر اساس انرژی کلی آزاد شده در امواج لرزه‌ای می‌باشد. طبیعی است که بزرگی به پارامترهای متعدد دیگری مرتبط شده که انواع متفاوت دینامیک چشمه را بیان می‌کنند. در بعضی از این مطالعات، طیف امواج یک نقش اساسی بازی می‌کنند. روابط بزرگی را با عوامل زیر می‌توان بررسی کرد: (۱) زمان تناوب موج غالب، (۲) سازوکار چشمه و (۳) انرژی موج لرزه‌ای. بیشتر لرزه شناسان نشان داده‌اند که زمان تناوب بیشینه طیفی برای امواج درونی و سطحی با بزرگی رخداد افزایش می‌یابد. در حقیقت اثرات چشمه، اثرات مسیر و اثرات گیرنده بر روی دوره تناوب تاثیرگذار می‌باشند و بزرگی یک نمایش تقریبی از تابع زمان چشمه می‌باشد. همچنین ارتباط معنی‌داری نیز بین سازوکار چشمه و بزرگی‌های محاسبه شده وجود دارد. آنچه که در برآورد قدرت انفجارها اهمیت دارد ارتباط بزرگی با انرژی موج لرزه‌ای است. انرژی کلی منتشره به عنوان امواج لرزه‌ای می‌تواند توسط روابط انرژی - بزرگی برآورد شود. در بدست آوردن چنین روابطی،

بزرگی عموماً در شکل معمول آن همانند معادله (۱) محاسبه می‌شود در حالی که انرژی متناظر باید با استفاده از روش‌های مستقل محاسبه شود (Bath, 1974).

### محاسبه $M_s$ در حیطه زمان و مقایسه آن با $M_s$ منتشر شده

به منظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک، ابتدا از روی فهرست انفجارهای هسته‌ای کل دنیا، رخدادهایی که در منطقه سمیپالاتینسک روی داده بود مشخص و سپس لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم دوره‌بلند SRO مشهود مربوط انتخاب گردید. از بین این لرزه‌نگاشت‌ها، آنهایی که نسبت سیگنال به نوفه بالایی داشتند و نیز با توجه به شکل موج که تنها رسید یک اوج را نشان می‌دادند انتخاب شدند. شکل موجی که دارای تنها یک اوج در لرزه‌نگاشت ثبت شده باشد می‌تواند دلیلی بر عدم آزادی کرنش تکتونیکی در رخداد مورد نظر باشد. بنابراین از بین ۵۲ لرزه‌نگاشت مولفه قائم دوره‌بلند، ۱۵ لرزه‌نگاشت که مناسب بودند انتخاب و سپس بیشینه دامنه‌ها به‌مراه دوره تناوب آنها از روی لرزه‌نگاشت‌های انتخابی قرائت شد. شکل ۱ یکی از لرزه‌نگاشت‌های خوب انتخابی را به‌مراه کمیت‌های اندازه‌گیری شده بر روی آن نشان می‌دهد. در شکل ۲ دو نمونه از لرزه‌نگاشت‌های غیر قابل استفاده آورده شده است که یکی از لرزه‌نگاشت‌ها به علت وجود نوفه زیاد و دیگری به علت آزاد شدن کرنش تکتونیکی یا همزمانی با یک زلزله و رسیدن چندین بسته موج، از مجموعه لرزه‌نگاشت‌های انتخابی حذف شده‌اند. همچنین به منظور تصحیح گسترش هندسی، فاصله بین ایستگاه لرزه‌نگاری از رخداد مورد نظر برحسب کیلومتر و درجه محاسبه گردید. در ادامه با اعمال تصحیح مربوط به بزرگنمایی دستگاه لرزه‌نگار دامنه واقعی جابجایی بدست آمد. با در دست داشتن A (دامنه صفر تا peak) بر حسب نانومتر، T دوره تناوب دامنه غالب بر حسب ثانیه و  $\Delta$  فاصله رومرکز رخداد تا ایستگاه بر حسب درجه، از دو رابطه زیر برای تعیین بزرگی امواج سطحی استفاده شد (Stevens and Murphy, 2001):

$$M_s = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 \log(\Delta) + 0.3 \quad (2)$$

$$M_s = \log\left(\frac{A}{T}\right) + \frac{1}{3} \log(\Delta) + \frac{1}{2} \log(\sin(\Delta)) + 0.0046\Delta + 2.370 \quad (3)$$

رابطه‌های (۲) و (۳) به ترتیب توسط IASPEI و Rezapour and Pearce (1998) منتشر شده‌اند. بزرگی‌های امواج سطحی گزارش شده (Stevens & Murphy (2001) و بزرگی‌های محاسبه شده از روی لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم دوره بلند SRO در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر بدست آمده از روابط (۲) و (۳) با مقادیر منتشر شده مقایسه و در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به جدول ۱ و شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌گردد که بزرگی‌های امواج

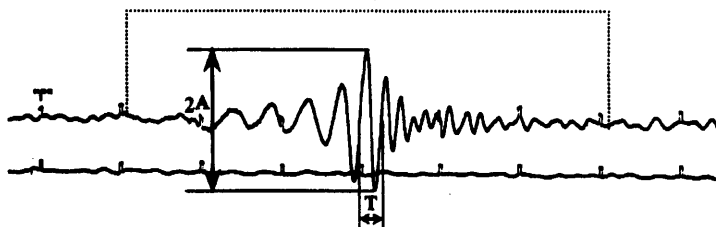
سطحی بدست آمده از رابطه (۲) دارای ضریب همبستگی بهتری نسبت به بزرگی‌های امواج سطحی گزارش شده می‌باشند. بنابراین در تعیین روابط برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی سمیپالاتینسک در SRO مشهود از رابطه (۲) بمنظور تعیین بزرگی  $M_s$  استفاده می‌شود.

جدول ۱- بزرگی‌های امواج سطحی محاسبه شده از روابط (۲) و (۳) و مقایسه آنها با بزرگی امواج سطحی گزارش شده توسط (Stevens & Murphy 2001).

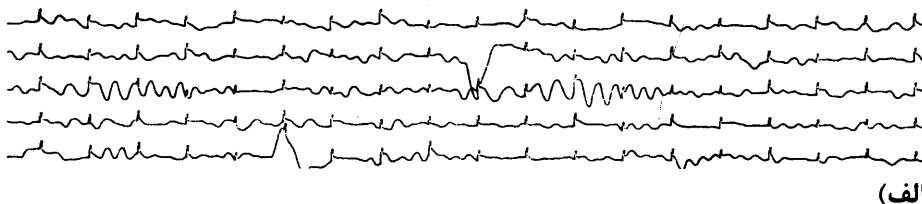
No	*Year	*Day	$M_s$ compu. From Eq.(2)	$M_s$ compu. from Eq.(3)	** $M_s$ an.
1	1978	258	3.89	4.1	3.83
2	1978	308	3.70	3.91	3.82
3	1978	333	3.89	4.09	3.98
4	1979	174	3.94	4.15	3.97
5	1979	216	4.05	4.25	4.11
6	1979	230	4.12	4.33	3.92
7	1979	301	3.97	4.17	4.12
8	1979	357	3.85	4.06	3.93
9	1980	164	3.24	3.45	3.35
10	1980	181	3.42	3.63	3.49
11	1980	258	4.12	4.33	3.94
12	1980	286	4.05	4.25	4.03
13	1988	258	4.18	4.39	4.28
14	1988	352	3.39	3.6	4.11
15	1989	22	4.16	4.36	4.26

\* (Yang *et al.*, 2000)

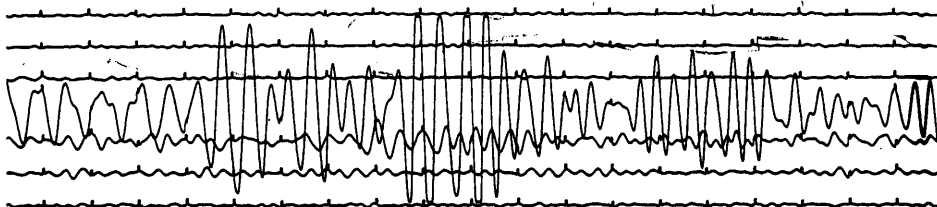
\*\* (Stevens & Murphy 2001)



شکل ۱- لرزه‌نگاشت مولفه قائم دوره‌بلند مربوط به رخداد روز ۲۱۶ سال ۱۹۷۹ با قدرت ۱۵۳ کیلو تن (TNT) که در ایستگاه SRO مشهود وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ثبت شده است. دامنه بیشینه و دوره تناوب مربوط به آن به ترتیب با A و T نشان داده شده‌اند.

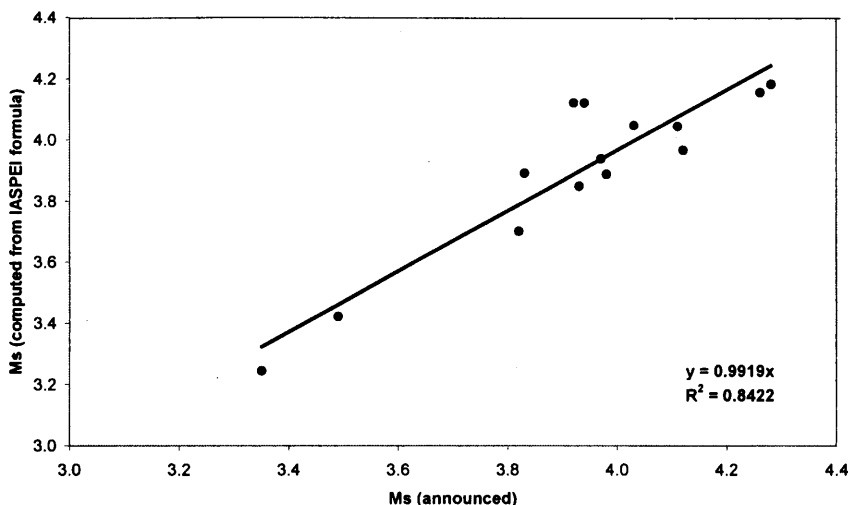


(الف)

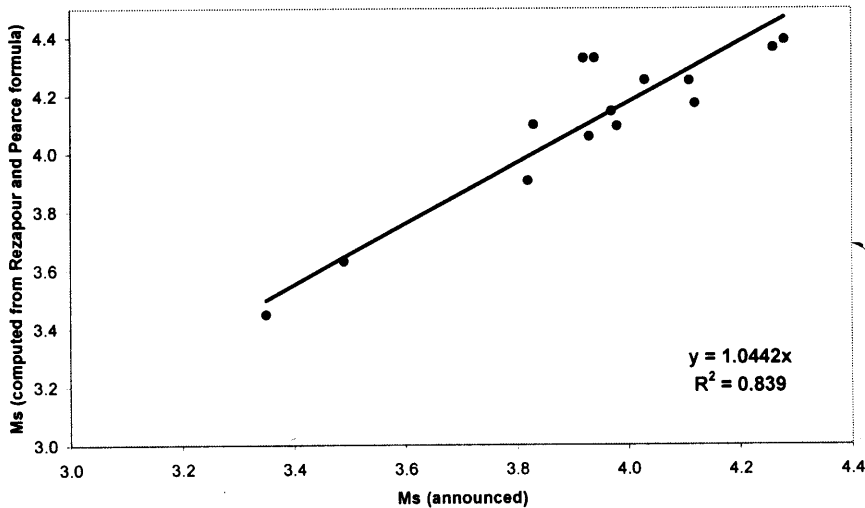


(ب)

شکل ۲- نمونه‌ای از لرزه‌نگاشت‌های مربوط به رخدادهایی که از محاسبات حذف شده‌اند. (الف) لرزه‌نگاشتی که به علت داشتن نوفه بالا امکان خواندن دقیق دامنه بیشینه وجود ندارد. (ب) لرزه‌نگاشت مربوط به رخدادی که آزادی کرنش تکتونیکی و یا همزمانی با یک زلزله در آن رخ داده است و در نتیجه شکل موجهای مختلفی بر روی لرزه‌نگاشت ثبت شده مشاهده می‌شود.



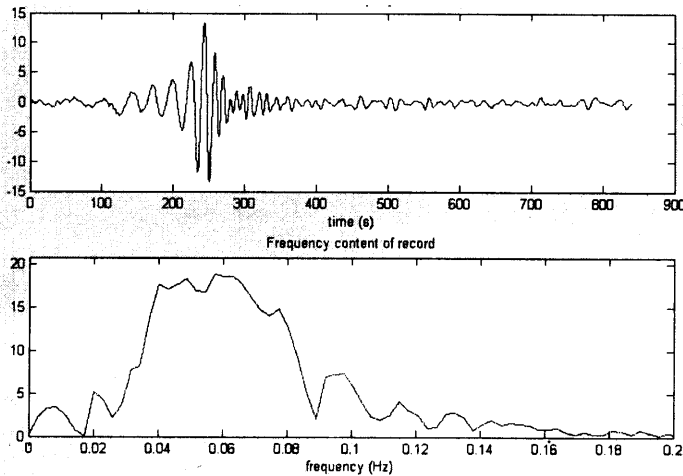
شکل ۳- مقایسه بزرگی‌های سطحی محاسبه شده از رابطه (۲) با بزرگی سطحی گزارش شده توسط (Stevence & Murphy (2001)



شکل ۴- مقایسه بزرگی‌های سطحی محاسبه شده از رابطه (۳) با بزرگی سطحی گزارش شده توسط (Stevence & Murphy (2001).

### محاسبه $M_S$ در حیطه فرکانس

به منظور تحلیل فرکانسی بر روی لرزه‌نگاشتهای مولفه قائم دوره بلند SRO مشهود، لرزه‌نگاشتهای انتخابی توسط نرم‌افزاری که به منظور رقمی نمودن لرزه‌نگاشتها تهیه شده بود به صورت رقمی در آورده شدند. سپس با توجه به فاصله نمونه‌برداری و طول لرزه‌نگاشتها با استفاده از روش FFT سریهای زمانی مربوط به لرزه‌نگاشتها به حیطه فرکانس تبدیل شدند. بدین ترتیب در حیطه فرکانس دامنه‌های مربوط به محدوده  $0/04$  تا  $0/06$  هرتز میانگین‌گیری شدند. مقدار دامنه میانگین این گستره فرکانسی به منظور برآورد بزرگی امواج سطحی  $M_S$  در رابطه IASPEI قرار داده شد. شکل ۵ یک نمونه از لرزه‌نگاشتهای رقمی شده به همراه محتوی فرکانسی تعیین شده برای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۵- بالا) لرزه‌نگاشت مولفه قائم دوره بلند رقمی شده مربوط به رخداد روز ۲۱۶ سال ۱۹۷۹ با قدرت ۱۵۳ کیلو تن (TNT) که در ایستگاه SRO مشهود ثبت شده است. پایین) محتوی فرکانسی بدست آمده برای سری زمانی بالا با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع (FFT). مشاهده می‌شود که بیشینه دامنه بدست آمده پس از تحلیل فرکانسی در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ هرتز قرار دارد.

### تعیین رابطه برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای

با توجه به اینکه امواج سطحی، از روی لرزه‌نگاشت‌های دوره بلند اندازه‌گیری می‌شوند، بنابراین از تغییرات کم دوام چشمه لرزه‌ای متاثر نمی‌شوند و دامنه‌های آنها تقریباً متناسب با قدرت انفجار است و شیب منحنی بزرگی - قدرت نزدیک به یک می‌باشد (Stevens & Murphy, 2001). یعنی می‌توان نوشت  $M_S = \log(Y) + C$ ؛ که  $Y$  قدرت برحسب کیلو تن و  $C$  یک ثابت است که می‌تواند به محیط چشمه بستگی داشته باشد، ولی مستقل از قدرت انفجار است. برای مثال (Stevens & Murphy, 2001) از بررسی ۷۴ انفجار هسته‌ای صورت گرفته در سمیپالاتینسک رابطه  $M_S = \log(Y) + 2.09 \pm 0.26$  را برای برآورد قدرت انفجارهای این منطقه ارائه دادند. همچنین می‌توان روابطی بین بزرگی امواج سطحی و قدرت انفجارها بدست آورد که شیب غیر یک داشته باشند و به صورت  $M_S = a \log(Y) + b$  باشد که  $a$  و  $b$  مقادیر ثابتی هستند. (Marshall et al., 1979) رابطه  $M_S = 1.06 \log(Y) + 1.88$  را برای همه انفجارات که مسیرهایشان شامل رخداد‌های با جفت‌شدگی کم در بالای سطح ایستابی باشد ارائه داده‌اند.



در این مقاله، پس از محاسبه بزرگی امواج سطحی از طریق رابطه (۲)، با در دست داشتن مقدار بزرگی  $M_S$  و قدرت منتشر شده انفجارها رابطه‌ای بین قدرت و بزرگی انفجارها برآزش داده شد. رابطه‌ای که در نهایت پس از برآزش بر اساس حداقل مربعات بدست آورده شد به قرار زیر می‌باشد:

$$M_S = 1.079 \log(Y) + 1.714, \quad R^2 = 0.69 \quad (4)$$

که در آنها،  $R^2$  ضریب همبستگی است. در ادامه با استفاده از بزرگی‌های امواج سطحی در حیطه فرکانس ( $M_{Sf}$ ) و نیز قدرتهای معلوم هر یک از رخدادها رابطه بزرگی-قدرت دیگری نیز با برآزش دادن خط بهینه به این داده‌ها بدست آورده شد:

$$M_{Sf} = 0.819 \log(Y) + 2.117, \quad R^2 = 0.64 \quad (5)$$

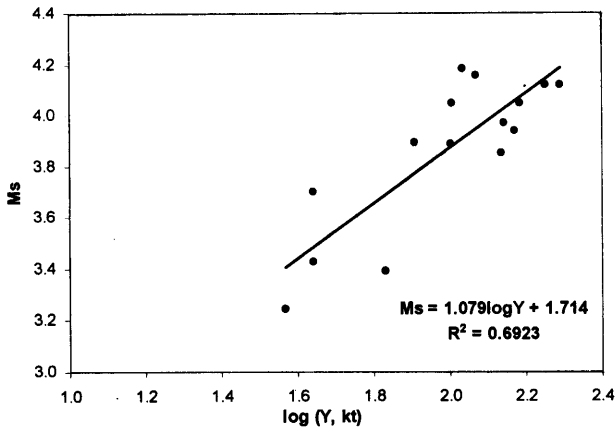
با توجه به روابط (۴) و (۵)، قدرتهای انفجارهای هسته‌ای منطقه سمیپالاتینسک برآورد شد و با مقادیر قدرت منتشر شده Stevens & Murphy (2001) مقایسه گردید که نتایج در جدول ۲ و شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. از این شکلها ملاحظه می‌شود که رابطه قدرت-بزرگی بدست آمده در رابطه (۴) دارای ضریب همبستگی بیشتری نسبت به رابطه (۵) می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود شیب خط در رابطه (۴) نیز نزدیک به یک می‌باشد. در نهایت بمنظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای منطقه سمیپالاتینسک در SRO مشهد رابطه (۴) تایید می‌شود.

جدول ۲- مقایسه قدرتهای برآورد شده از طریق روابط (۴) و (۵) بدست آمده با قدرتهای گزارش شده توسط (Stevence & Murphy 2001).

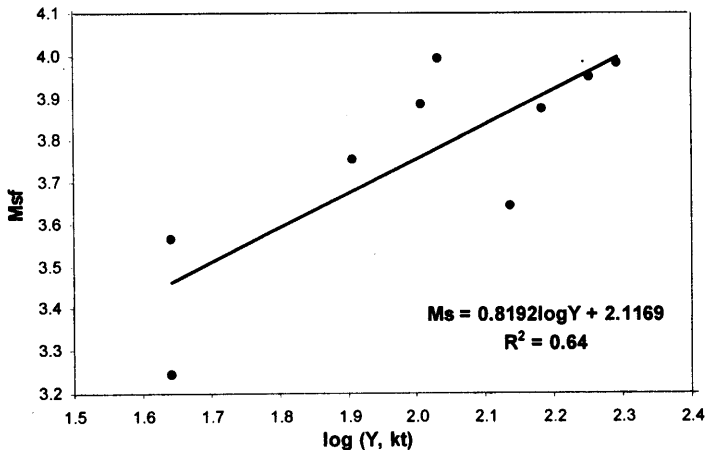
No	*Year	*Day	Y compu. From Eq.(4)	Y compu. from Eq.(5)	**Y An. (kt)
1	1978	258	104	99	81
2	1978	308	69	58	44
3	1978	333	103	---	101
4	1979	174	115	---	149
5	1979	216	144	139	153
6	1979	230	170	173	179
7	1979	301	122	---	139
8	1979	357	95	73	137
9	1980	164	26	---	37
10	1980	181	38	24	44
11	1980	258	170	189	196
12	1980	286	145	143	102
13	1988	258	194	194	108
14	1988	352	36	---	68
15	1989	22	183	---	118

\* (Yang et al., 2000)

\*\* (Stevens & Murphy 2001)



شکل ۶- ارتباط بین بزرگی امواج سطحی در حیطهٔ زمان ( $M_s$ ) و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی منطقهٔ سمیپالاتینسک. بزرگی امواج سطحی با استفاده از رابطهٔ (۲) از لرزه‌نگاشت مولفهٔ قائم دوره‌بلند ایستگاه SRO مشهود محاسبه شده است. اطلاعات مربوط به قدرت توسط (Steven & Murphy 2001) منتشر شده که در جدول ۲ آمده است.



شکل ۷- ارتباط بین بزرگی امواج سطحی در حیطهٔ فرکانس ( $M_{sf}$ ) و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی منطقهٔ سمیپالاتینسک. بزرگی امواج سطحی در حیطهٔ فرکانس با استفاده از دامنهٔ میانگین گسترهٔ فرکانسی ۰/۴ تا ۰/۰۶ Hz از لرزه‌نگاشت‌های مولفهٔ قائم دوره‌بلند ایستگاه SRO مشهود محاسبه شده است. اطلاعات مربوط به قدرت توسط (Steven & Murphy 2001) منتشر شده که در جدول ۲ آمده است.

## نتیجه گیری

با بررسی ۵۲ لرزه‌نگاشت مولفه قائم دوره بلند SRO مشهد به منظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای سمیپالاتینسک نتایج زیر بدست آمد:

۱. با وجود اینکه کوچک بودن مقدار بزرگی محاسبه شده برای امواج سطحی حاصل از انفجارها، آزاد شدن کرنش تکتونیکی در بعضی از انفجارها و رسیدن همزمان امواج ریلی بازتابی از موانع طبیعی و یا حضور مدهای بالاتر امواج سطحی در رکوردهای لرزه‌ای مشکلاتی را برای برآورد قدرت از طریق بزرگی امواج سطحی ایجاد می‌کنند، ولی با توجه به پراکندگی کم بزرگی‌های محاسبه شده از امواج سطحی و نیز عدم تاثیرپذیری امواج سطحی از تغییرات کوچک مقیاس زمین و تغییرات کم دوام چشمه لرزه‌ای برآورد قدرت از طریق امواج سطحی توصیه می‌گردد.
۲. بزرگی  $M_s$  بدست آمده از رابطه IASPEI با توجه به فاصله کمتر از ۲۰ درجه سمیپالاتینسک و SRO به مقادیر گزارش شده  $M_s$  نزدیکتر بوده و لذا برای تعیین بزرگی  $M_s$  در SRO از رابطه IASPEI استفاده گردید.
۳. با رقمی نمودن داده‌ها و تبدیل سریهای زمانی لرزه‌نگاشتها به حیطه فرکانس می‌توان گستره فرکانسی خاصی را که در امواج سطحی مد نظر می‌باشد در تعیین بزرگی امواج سطحی در حیطه فرکانس بکار برد. بدین ترتیب می‌توان رابطه‌ای نیز برای برآورد قدرت با استفاده از بزرگی امواج سطحی در حیطه فرکانس بدست آورد.
۴. با توجه به اینکه رابطه قدرت- بزرگی که در حیطه زمان بدست آورده شد دارای ضریب همبستگی بالایی نسبت به رابطه بدست آمده در حیطه فرکانس بود، بنابراین رابطه  $M_s = 1.079 \log(Y) + 1.714$  به منظور برآورد قدرت انفجارات هسته‌ای منطقه سمیپالاتینسک با استفاده از لرزه‌نگاشتهای SRO مشهد توصیه می‌شود.

## تشکر و قدردانی

این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه تهران به شماره ۶۵۲/۳/۸۱۸ تحت 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 موسسه ژئوفیزیک و گروه فیزیک زمین تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از مرکز لرزه‌نگاری کشوری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و کارکنان این مرکز بویژه آقای محمد حسین حسن‌نیا به خاطر در اختیار قرار دادن لرزه‌نگاشتهای مربوط به رخدادها تشکر و قدردانی می‌شود.

## References

- Bache, T. C. (1982) *Estimating the yield of underground nuclear explosions*: Bull. Seism. Soc. Am., **72**, S131-S168.
- Bath, M. (1974) *Spectral analysis in geophysics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Day, S. M., Cherry, J. T., Rimer, N., and Stevens, J. L. (1987) *Nonlinear model of tectonic release from underground explosions*: Bull. Seism. Soc. Am., **77**, 996-1016.
- Marshall, P. D., Springer, D. L., and Rodean, H. C. (1979) *Magnitude correction for attenuation in the upper mantle*: Geophys. J., **57**, 609-638.
- Rezapour, M., and Pearce, R. G. (1998) Bias in surface-wave magnitude Ms due to inadequate distance corrections: Bull. Seism. Soc. Am., **88**, 43-61.
- Stevens, J. L., and McLaughlin, K. L. (2001) Optimization of surface wave identification and measurement: Pure Appl. Geophys., **158**, 1547-1582.
- Stevens, J. L., McLaughlin, K. L., Shkoller, B., and Day, S. M. (1993) 2-D axisymmetric calculations of surface waves generated by an explosion in an island, mountain, and sedimentary basin: Geophys. J. Int., **114**, 548-560.
- Stevens, J. L., and Murphy, J. R. (2001) Yield estimation from surface-wave amplitudes: Pure Appl. Geophys., **158**, 2227-2251.
- Yang, X., North, R., and Romney, C. (2000) CMR Nuclear Explosion Database (Revision 3): CMR Technical Report CMR-00/16.