

## برآورد قدرت انفجار هسته‌ای زیرزمینی ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان

عبدالرحیم جواهریان<sup>\*</sup>، احمد سدیدخوی<sup>\*</sup>، مصطفی نقی‌زاده<sup>\*</sup> و مازیار حقیقی<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>مرسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

دریافت مقاله: ۸۰/۸/۳۰ پذیرش مقاله: ۸۲/۱۰/۲۳

### چکیده

برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی از راه دور با بررسی فازهای مختلف لرزه‌نگاشت‌ها امکان‌پذیر است. بدین منظور لازم است ارتباط بین کمیت‌های لرزه‌ای انفجارها و قدرت‌های معلوم آنها تعیین شود تا بتوان با استفاده از روابط به‌دست آمده، قدرت نامعلوم یک انفجار را برآورد نمود. مهم‌ترین کمیت‌های لرزه‌ای در این خصوص عبارت‌اند از: دامنه موج ثبت شده و بزرگی محاسبه شده از امواج حجمی ( $m_b$ ) و یا امواج سطحی  $M_s$ . از آن‌جا که قبل از انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان، انفجار هسته‌ای دیگری در این کشور انجام نشده بود، بنابراین روابطی بین کمیت‌های لرزه‌ای انفجارها و قدرت آنها برای این منطقه وجود نداشت. بنابراین، برای برآورد قدرت انفجار یادشده، از ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری بلند دوره ایران (ILPA)، تنها راه، استفاده از روابط بین کمیت‌های لرزه‌ای و قدرت انفجارهای نزدیک‌ترین منطقه یعنی سمیپالاتینسک (STS) واقع در شرق قزاقستان است. بدین منظور ابتدا روابط بین کمیت‌های لرزه‌ای انفجارهای STS در ایلیا و قدرت این انفجارها تعیین شد. سپس با استفاده از این روابط قدرت انفجار پاکستان برآورد شد. امواج P و ریلی لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در ایلیا مربوط به انفجارهای STS که قدرت آنها را ورچینو (۱۹۸۹)، توربر و همکاران (۱۹۹۳) و استیونس و مورفی (۲۰۰۱) اعلام کرده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله، با استفاده از دامنه موج P، بزرگی امواج حجمی ( $m_b$ )، بزرگی امواج سطحی در حیطه زمان ( $M_{st}$ ) و بزرگی امواج سطحی در حیطه بسامد ( $M_{st}$ ) لرزه‌نگاشت‌های شبکه بلند دوره ایران چهار رابطه بین کمیت‌های لرزه‌ای انفجارهای STS در ایلیا و قدرت آنها به‌دست آمد و از این روابط قدرت انفجار پاکستان برآورد شد. روابط به‌دست آمده عبارت‌اند از:

$$\log(Y) = 2.80 + 1.21 \log(A)$$

$$m_b = 1.05 \log(Y) + 3.90$$

$$M_s = 0.69 \log(Y) + 2.36$$

$$M_{st} = 0.80 \log(Y) + 2.68$$

که در آنها،  $A$  دامنه موج P بر حسب میکرون و  $Y$  قدرت انفجار بر حسب کیلوتن می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از برآورد قدرت انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان از رابطه فوق برای محیط‌های انفجاری آبرفت، توف، نمک و گرانیب تطابق خوبی با یکدیگر دارند. میانگین قدرت این انفجار حدود ۱۴ کیلوتن با خطای  $\pm ۲۰$  درصد به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی، سمیپالاتینسک، پاکستان، شبکه لرزه‌نگاری بلند دوره ایران، موج P، موج ریلی

### ۱ مقدمه

ثبات و عامل‌های دیگر است (بیچ، ۱۹۸۲). کمیت‌های دیگر لرزه‌ای مانند بزرگی موج‌های حجمی و بزرگی موج‌های سطحی را نیز می‌توان به منظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی مورد استفاده قرار داد. بنابراین انتخاب یکی از این کمیت‌ها و روش به‌کارگرفته شده مستلزم آگاهی از دقت آن روش در برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی است. با توجه به این‌که تعیین میزان دقت هر روش مشکل است، به‌نظر

قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی از فاصله‌های دور با استفاده از روش‌های لرزه‌ای برآورد می‌شود. بدین منظور لازم است رابطه بین کمیت‌های مختلف لرزه‌ای و قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی تعیین شود. یکی از مهم‌ترین کمیت‌ها، دامنه موج ثبت شده روی لرزه‌نگاشت‌هاست که این خود تابعی از قدرت انفجار، مشخصات محیط دربرگیرنده محل انفجار، فاصله محل انفجار تا ایستگاه لرزه‌نگاری، ضریب جذب زمین، مشخصات دستگاه‌های

KS36000 هستند، درون چاه نیمه عمیق قرار دارند و با توجه به فیلترهای موجود قابلیت تولید لرزه‌نگاشت‌های کوتاه دوره و بلند

جدول ۱. تغییرات ضریب تبدیل کل انرژی انفجار هسته‌ای زیرزمینی به انرژی لرزه‌ای برای محیط‌های مختلف انفجار (بلت، ۱۹۷۶).

ضریب تبدیل انرژی	محیط انفجار
0.001	آبرفت خشک
0.002	آبرفت اشباع با آب
0.003	توف
0.008	نمک
0.01	گرانیت

دوره با نسبت سیگنال به نوفه بالا را دارند. بنابراین برای برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی مناسب‌اند. مختصات ایستگاه‌های ایلیا در جدول ۲ آمده است. در این مقاله، ابتدا روابط مختلف بین کمیت‌های لرزه‌ای ایلیا و قدرت انفجارهای گزارش شده STS به دست آمد، سپس با استفاده از این روابط، قدرت انفجار هسته‌ای ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان برآورد شد.

جدول ۲. مختصات ایستگاه‌های ایلیا (عکاشه و همکاران، ۱۹۷۶).

Site No	Lat. (N)	Long. (E)	Elev. (m)
1	35 24 58.3'	50 41 19.5'	1,346.6
2	35 39 46.1	50 53 51.5	1,172.1
3	35 28 34.5	51 01 25.5	1,106.4
4	35 14 19.3	50 54 04.2	1,373
5	35 12 46.2	50 34 52.0	1,350.2
6	35 28 25.2	50 25 32.2	1,540.2
7	35 42 10.1	50 36 32.0	1,305.1
CRS	35 45 10.1	51 23 19.6	1,461.7

۲ ارتباط بین کمیت‌های لرزه‌ای ایلیا و قدرت انفجارهای

### STS

برای تعیین ارتباط بین کمیت‌های لرزه‌ای لرزه‌نگاشت‌های ایلیا و قدرت انفجارهای STS از چهار روش استفاده شد که عبارت‌اند از: دامنه و بزرگی موج  $p$ ، بزرگی امواج سطحی در حیطه زمان و بزرگی امواج سطحی در حیطه بسامد که به آن‌ان اشاره می‌شود.

می‌رسد که مناسب باشد برای این منظور از چند روش استفاده شود. به‌هرحال از هر روش که استفاده شود آگاهی از نوع سنگ محیط چشمه انفجار در قدرت برآورد شده یا کل انرژی آزاد شده نقش زیادی دارد.

میزان تبدیل کل انرژی آزاد شده از یک انفجار هسته‌ای زیرزمینی به انرژی لرزه‌ای، به عوامل مختلف بستگی دارد و از مهم‌ترین آنها نوع رسوبات یا سنگ‌هایی است که انفجار در آنها انجام شده است. اگر انفجار در سنگ‌های گرانیت و نمک صورت پذیرد، درصد تبدیل انرژی انفجار به انرژی لرزه‌ای زیاد و اگر در آبرفت و توف صورت پذیرد، درصد تبدیل کم خواهد بود (بلت، ۱۹۷۶). رابطه بین کل انرژی یک انفجار هسته‌ای زیرزمینی که از طریق رادیوشیمیایی به دست می‌آید و انرژی لرزه‌ای حاصل از آن در محیط‌های مختلف انفجار از سوی بلت (۱۹۷۶) مطابق رابطه (۱) ارائه شده است.

$$E_s = \eta E_c \quad (1)$$

که در آن،  $E_s$  و  $E_c$  به ترتیب کل انرژی انفجار و انرژی لرزه‌ای حاصل از آن و  $\eta$  ضریب تبدیل انرژی است که تغییرات آن در جدول ۱ آمده است. والاس (۱۹۹۸) اعلام داشته است که جنس محیط انفجار هسته‌ای زیرزمینی ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان از نوع محیط سخت است.

محققین زیادی با استفاده از روابط شناخته شده بین کمیت‌های لرزه‌ای و قدرت‌های گزارش شده، مناطق دیگر قدرت انفجار هسته‌ای زیرزمینی ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان را برآورد کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به والاس (۱۹۹۸) اشاره کرد. در مورد انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان چون پیش از این در این ناحیه انفجار هسته‌ای انجام نشده بود، لذا تنها راه برآورد قدرت از روش لرزه‌ای، استفاده از روابط مربوط به نواحی دیگر است. در ایران سه ایستگاه فعال شبکه لرزه‌نگاری بلند دوره ایران (ILPA) انفجار یاد شده را ثبت کردند. دستگاه‌های لرزه‌سنج ایلیا که از نوع

## ۱-۲ استفاده از موج P در برآورد قدرت

برای به دست آوردن رابطه دامنه - قدرت یا بزرگی - قدرت با استفاده از موج P، راه‌های مختلفی وجود دارد که به صورت کلی شامل استفاده از محیطه زمان و محیطه بسامد است. در این مطالعه، با توجه به این که داده‌های مربوط به انفجارهای STS در ایلبا آنالوگ بودند، بنابراین فقط استفاده از محیطه زمان امکان‌پذیر بود. در این روش ابتدا بزرگی انفجار در محیطه زمان محاسبه می‌شود. نحوه به دست آوردن بزرگی به این صورت است که دامنه بیشینه برای چند ثانیه اول موج P به همراه دوره تناوب ظاهری آن از روی لرزه‌نگاشت قرائت می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۲) مقدار بزرگی محاسبه می‌شود (لای و والاس، ۱۹۹۵).

$$m_b = \log\left(\frac{A}{T}\right) + B(\Delta, h) \quad (2)$$

که در آن، A دامنه بیشینه (peak to peak) برحسب نانومتر که اثر بزرگ‌نمایی دستگاه برای دوره تناوب T از روی آن حذف شده است، T دوره تناوب ظاهری برحسب ثانیه و  $B(\Delta, h)$  تصحیح مربوط به اثر فاصله است که در برگیرنده دو عامل گسترش هندسی و پدیده جذب در فاصله چشمه تا گیرنده است. با توجه به این که هدف به دست آوردن انرژی حاصل از انفجار است، بنابراین تصحیح فاصله ضروری است. دانشمندان زیادی  $B(\Delta, h)$  را به دست آورده‌اند که مهم‌ترین آنها را ویث و کلاوسون (۱۹۷۲) ارائه کرده است.

از آنجایی که مقدار کمی از انرژی یک انفجار هسته‌ای به امواج کشسان لرزه‌ای تبدیل می‌شود و بقیه انرژی آن به صورت‌های دیگر انرژی تبدیل می‌شود، بنابراین نمی‌توان فقط با محاسبه بزرگی به کل انرژی حاصل از انفجار (قدرت) دست یافت. حال نوبت آن رسیده است که نحوه به دست آوردن انرژی کل از راه بزرگی (یا دامنه) بیان شود. برای نیل به این هدف باید محل انفجار را با استفاده از چندین انفجار با قدرت‌ها و عمق‌های متفاوت کالیبره کرد. نحوه انجام این کار به این صورت است که

برای هر انفجار قدرت واقعی آن باید از طرف انجام دهندگان گزارش شود و دامنه‌های ثبت شده یا بزرگی‌های محاسبه شده از راه لرزه‌نگاشت‌ها تعیین شود. سپس نموداری تهیه می‌شود که روی محور افقی لگاریتم قدرت به کیلوتن و روی محور قائم آن بزرگی (یا لگاریتم دامنه) قرار می‌گیرد. آنگاه برای هر انفجار میانگین، بزرگی‌های (یا دامنه‌های) به دست آمده از همه ایستگاه‌ها برحسب لگاریتم قدرت، رسم می‌شود و این کار برای همه انفجارها انجام می‌شود. با این حساب، به تعداد انفجارها، روی نمودار نقطه خواهد بود. این نقاط دارای وابستگی خطی هستند، به این معنا که این دو کمیت مستقل از یکدیگر نیستند. پس می‌توان یک تابع به دست آورد که این دو را به یکدیگر ارتباط دهد. تابعی که این دو کمیت را به یکدیگر ارتباط می‌دهد تابعی خطی با فرمول عمومی زیر است (سیکا و همکاران، ۲۰۰۰)

$$m_b = a + b \log(Y) \quad (3)$$

که در آن a و b دو ضریب ثابت برای هر محل و Y قدرت انفجار بر حسب کیلوتن تی‌ان‌تی هستند. بعد از رسم بزرگی‌ها (یا دامنه‌ها) در برابر لگاریتم قدرت‌ها، با استفاده از روش حداقل مربعات، ضرایب a و b بدست می‌آیند. a و b ثابت‌هایی هستند که بیان‌کننده اثر محل انفجار، مسیر انتشار موج و غیره‌اند. ضریب b در اکثر محیط‌ها در محدوده تقریبی باریکی از ۰/۷۵ تا ۰/۸۵ تغییر می‌کند که به عوامل یادشده بستگی دارد (سیکا و همکاران، ۲۰۰۰). با به دست آوردن این ضرایب، رابطه بزرگی - قدرت (یا دامنه - قدرت)، مربوط به منطقه موردنظر به دست می‌آید. حال اگر در این منطقه، انفجاری صورت گیرد، بدون داشتن قدرت انفجار، فقط از راه بزرگی (یا دامنه) و قرار دادن بزرگی (یا دامنه) آن در رابطه به دست آمده برای این منطقه، می‌توان قدرت انفجار را برآورد کرد.

به دلیل متفاوت بودن رابطه بزرگی - قدرت یا دامنه - قدرت برای محیط‌های انفجار مختلف، از رابطه مربوط به هر منطقه باید

جدول ۳. فهرست انفجارهای STS برای محاسبه رابطه برآورد قدرت با استفاده از موج P.

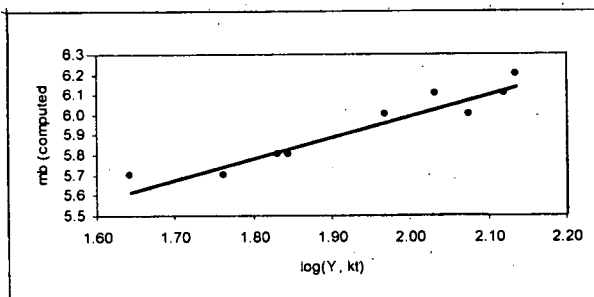
NO.	*Year	*Day	**Yield pub.	mb com.	*mb pub.
1	1977	248	78	5.8	5.7
2	1978	241	119	6	6.0
3	1978	308	44	5.7	5.6
4	1978	162	58	5.7	5.9
5	1979	336	93	6	6.0
6	1979	357	137	6.2	6.2
7	1988	125	132	6.1	6.1
8	1988	258	108	6.1	6.1
9	1988	352	68	5.8	5.9
10	1989	292	70	5.8	5.7

\* یانگ و همکاران (۲۰۰۰) و \*\* استیونس و مورفی (۲۰۰۱).

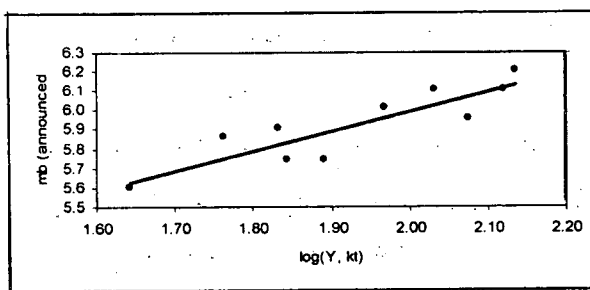
برای آن منطقه استفاده شود. در غیر این صورت ممکن است خطای بزرگی در محاسبه قدرت صورت گیرد. علت این امر مربوط به این است که عوامل اثر گذار (جذب، ساختمان پوسته و گوشته بالایی، تداخل در محیط انفجار و ...) از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت است.

### ۱-۱-۲ استفاده از $m_b$

ابتدا ۲۵ انفجار STS که  $m_b$  و قدرت آنها را استیونس و مورفی (۲۰۰۱) گزارش کرده‌اند انتخاب شد. سپس لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم دوره کوتاه ایستگاه ۱ ایلبا که بهتر از سایر ایستگاه‌ها این انفجارها را ثبت کرده بود، مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه آن لرزه‌نگاشت‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند که نسبت سیگنال به نوفه آنها بیشتر از ۲ بود. فهرست این انفجارها در جدول ۳ آمده است، قدم بعدی محاسبه فاصله بین ایستگاه ۱ ایلبا و منطقه STS است که در مختصات کروی فاصله بین این دو محل حدود ۲۷ درجه است. محاسبه فاصله دو مزیت دارد. اول این که برای به دست آوردن  $B(\Delta, h)$  مورد نیاز است و دوم این که می‌توان دریافت که فازهای ثبت شده در ایستگاه مورد نظر کدام هستند. با توجه به این مطالب از جدول‌های مربوطه، مقدار  $B(\Delta, h)$  برای ۲۷ درجه  $3/25$  به دست آمد و اولین فاز دریافتی موج P مستقیم عبوری از گوشته تعیین شد. با استفاده از دامنه peak to peak فاز b (بج، ۱۹۸۲) و انجام تصحیحات لازم  $m_b$  مربوط به این انفجارها محاسبه شد. رابطه بزرگی - قدرت برای دو حالت بزرگی گزارش شده و بزرگی محاسبه شده طی روابط (۴) و (۵) به دست آمد که این ارتباط در شکل‌های ۱ و ۲ دیده می‌شود.



شکل ۱. ارتباط بین  $m_b$  گزارش شده و قدرت‌های گزارش شده مربوط به ۱۰ انفجار STS. اطلاعات مربوط به  $m_b$  از سوی یانگ و همکاران (۲۰۰۰) و قدرت انفجارها از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) گزارش شده است که در جدول ۳ آمده است.



شکل ۲. ارتباط بین  $m_b$  محاسبه شده از روی لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم کوتاه دوره ایستگاه ۱ ایلبا و قدرت‌های گزارش شده مربوط به ۱۰ انفجار STS.  $m_b$  بر اساس فاز b محاسبه شده است. قدرت انفجارها را استیونس و مورفی (۲۰۰۱) گزارش کرده‌اند که در جدول ۳ آمده است.

$$m_b = 1.02 \log(Y) + 3.96, R^2 = 0.77 \quad (4)$$

$$m_b = 1.05 \log(Y) + 3.90, R^2 = 0.89 \quad (5)$$

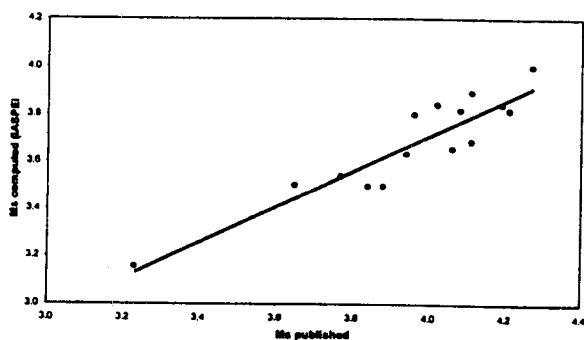
۲-۲-۱ استفاده از  $M_{st}$

از بین ۵۶ لرزه‌نگاشت مولفه قائم بلند دوره، ۱۵ لرزه‌نگاشت که دارای بزرگ‌نمایی مناسب بودند و نیز روی آنها اثری از تداخل امواج دیگر مشاهده نمی‌شد، انتخاب شدند. سپس بیشینه دامنه به همراه دوره تناوب آن از روی لرزه‌نگاشت انتخابی قرائت شد. به منظور تصحیح گسترش هندسی، فاصله بین ایستگاه لرزه‌نگاری ایلیا از انفجار STS محاسبه شد. با اعمال تصحیح مربوط به بزرگ‌نمایی دستگاه ثبات دامنه واقعی جابه‌جایی به دست آمده با داشتن دامنه جابه‌جایی  $2A$  برحسب نانومتر، دوره تناوب دامنه غالب برحسب ثانیه و  $\Delta$  فاصله ایستگاه ایلیا از رومرکز انفجار STS برحسب درجه، از دو فرمول زیر برای تعیین بزرگی امواج سطحی در حیطه زمان استفاده شد.

$$M_{st} = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 \log(\Delta) + 0.3 \quad (۸)$$

$$M_{st} = \log\left(\frac{A}{T}\right) + \frac{1}{3} \log(\Delta) + \frac{1}{2} \log(\sin(\Delta)) + 0.0046\Delta + 2.370 \quad (۹)$$

رابطه‌های (۸) و (۹) به ترتیب از سوی IASPEI و رضاپور و پیرس (۱۹۹۸) ارائه شده‌اند (استیونس و مورفی، ۲۰۰۱).



شکل ۳. مقایسه بزرگی امواج سطحی محاسبه شده از رابطه (۸) با بزرگی امواج سطحی گزارش شده از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱).

بزرگی‌های محاسبه شده از لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم بلند دوره مجموعه ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ ایلیا و بزرگی گزارش شده از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) در جدول ۴ آورده شده است.

۲-۱-۲ استفاده از بیشینه دامنه موج P

جواهریان و نوروزیان (۱۳۷۳) با اندازه‌گیری بیشینه دامنه موج P لرزه‌نگاشت‌های ایلیا مربوط به انفجارهای STS که قدرت آنها را ورجینو (۱۹۸۹) گزارش کرده است، رابطه (۶) را براساس کم‌ترین مربعات به دست آوردند.

$$\log(Y) = 2.63 + 1.24 \log(A) \quad (۶)$$

که در آن،  $Y$  قدرت انفجار برحسب کیلوتن و  $A$  بیشینه دامنه موج P مجموع ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ برحسب میکرون است. براساس فهرست ۱۷ انفجار STS که نوربر و همکاران (۱۹۹۳) آن را منتشر کرده‌اند، با قرائت بیشینه دامنه موج P ایستگاه ۱ ایلیا و اعمال تصحیحات لازم، نقاط بیشتری نسبت به آنچه که جواهریان و نوروزیان (۱۳۷۳) انجام داده بودند در این مطالعه به دست آمد که نتیجه آن در رابطه (۷) آمده است.

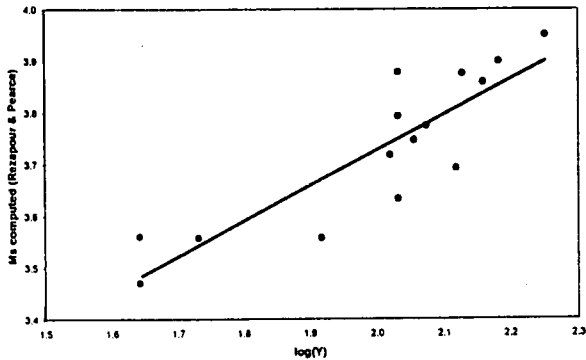
$$\log(Y) = 2.80 + 1.21 \log(A) \quad (۷)$$

۲-۲ استفاده از موج ریلی در برآورد قدرت

یکی دیگر از روش‌های برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی، یافتن رابطه‌ای بین بزرگی امواج سطحی و قدرت انفجار است. محققین نشان داده‌اند که زمین‌شناسی محل انفجار، دمای پوسته پایینی، مشخصات جبهه بالایی زیر محل انفجار بر تضعیف دامنه موج تراکمی تأثیر اساسی دارند. در حالی که این عوامل تأثیر کم‌تری بر دامنه موج ریلی دارند. بنابراین، تعیین رابطه بزرگی موج ریلی و قدرت انفجار هسته‌ای برای برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای نامعلوم مناسب است. بیچ (۱۹۸۲) نشان داد که بزرگی موج ریلی به دست آمده در حیطه بسامد ( $M_{sf}$ ) نسبت به بزرگی موج ریلی در حیطه زمان ( $M_{st}$ ) دارای خطای میانگین کم‌تری به منظور برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای است. بنابراین از هر دو روش در این مطالعه استفاده شده است.

تصحیح ژرفا که تقریباً برابر  $0.008h$  (برحسب کیلومتر) است. جواهریان و سدیدخوی (۱۳۷۴) با محاسبه  $M_{sf}$  انفجارهای STS که ایستگاه‌های ایلیا ثبت کرده‌اند، رابطه (۱۲) را به منظور برآورد قدرت این انفجارها به دست آوردند.

$$M_{sf} = 0.80 \log(Y) + 2.68 \quad (12)$$



شکل ۵. ارتباط بین بزرگی امواج سطحی و قدرت انفجارهای STS بزرگی امواج سطحی با استفاده از رابطه (۹) از لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم بلند دوره مجموع ایستگاه‌های ۱ تا ۳ ایلیا محاسبه شده است. اطلاعات مربوط به قدرت از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) گزارش شده است که در جدول ۴ آمده است.

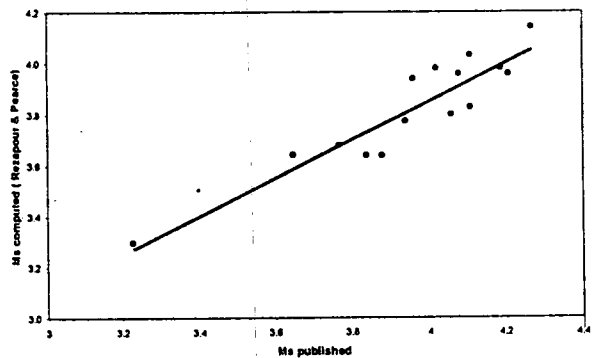
جدول ۴. بزرگی امواج سطحی محاسبه شده از روابط (۸) و (۹) و مقایسه آنها با بزرگی امواج سطحی گزارش شده از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱).

No	*year	*day	**Pub.Yield	Ms (8)	Ms (9)	**Ms pub.
1	1977	149	44	3.33	3.47	3.11
2	1978	241	119	3.63	3.77	3.48
3	1978	308	44	3.42	3.56	3.65
4	1979	216	153	3.76	3.90	4.02
5	1979	230	179	3.81	3.95	3.74
6	1979	336	93	3.81	3.95	4.11
7	1979	357	137	3.46	3.60	3.77
8	1982	115	145	3.72	3.86	3.96
9	1983	163	138	3.92	4.06	4.27
10	1983	333	101	3.07	3.21	3.23
11	1984	50	49	3.74	3.88	4.08
12	1984	89	83	3.42	3.56	3.88
13	1987	107	86	3.92	4.06	4.05
14	1988	125	132	3.55	3.69	3.94
15	1989	43	63	3.76	3.90	4.19

\* یانگ و همکاران (۲۰۰۰) و \*\* استیونس و مورفی (۲۰۰۱).

مقادیر به دست آمده از روابط (۸) و (۹) با مقادیر گزارش شده مقایسه و نتیجه به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به جدول ۴ و شکل‌های ۳ و ۴، ملاحظه می‌شود که بزرگی امواج سطحی به دست آمده از رابطه (۹)، دارای ضریب همبستگی بیشتری نسبت به بزرگی امواج سطحی به دست آمده از رابطه (۸) است. بنابراین در تعیین رابطه برآورد قدرت انفجارهای STS به کمک موج ریلی ایستگاه‌های ایلیا، از رابطه (۹) به منظور تعیین  $M_{st}$  استفاده شده است. پس از محاسبه  $M_{st}$  مربوط به ۱۵ انفجار جدول ۳ و در نظر گرفتن قدرت‌های گزارش شده از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱) رابطه  $M_{st}$  و  $Y$  با برازش بهترین خط براساس کم‌ترین مربعات، مطابق رابطه (۱۰) و شکل ۵ به دست آمد.

$$M_{st} = 0.69 \log(Y) + 2.36, R^2 = 0.76 \quad (10)$$



شکل ۴. مقایسه بزرگی امواج سطحی محاسبه شده از رابطه (۹) با بزرگی امواج سطحی گزارش شده از سوی استیونس و مورفی (۲۰۰۱).

### ۲-۲-۲ استفاده از $M_{sf}$

بزرگی  $M_s$  در حیطه بسامد ( $M_{sf}$ ) پس از تبدیل فوریه مولفه قائم لرزه‌نگاشت دوره بلند و تعیین بیشینه طیف دامنه لرزه‌نگاشت و استفاده از رابطه (۱۱) به دست می‌آید (مارشال و بشام، ۱۹۷۲)

$$M_{sf} = \log(S) + B(\Delta) + P(T) + A(h) \quad (11)$$

که در آن  $S$  بیشینه طیف دامنه لرزه‌نگاشت برحسب نانومتر،  $B(\Delta)$  تابع تصحیح فاصله برای مقادیر مختلف  $\Delta$  برحسب درجه،  $P(T)$  تابع تصحیح مسیر به مثابه تابعی از دوره برحسب ثانیه و  $A(h)$  تابع

۳ برآورد قدرت انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان

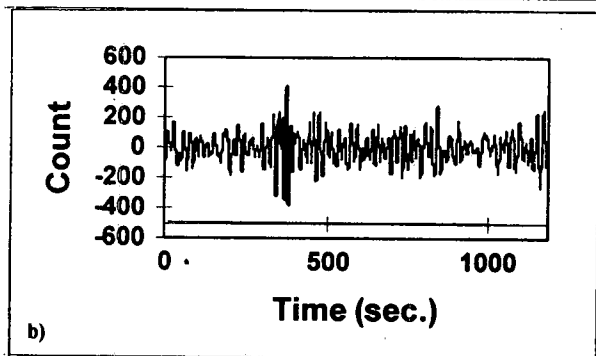
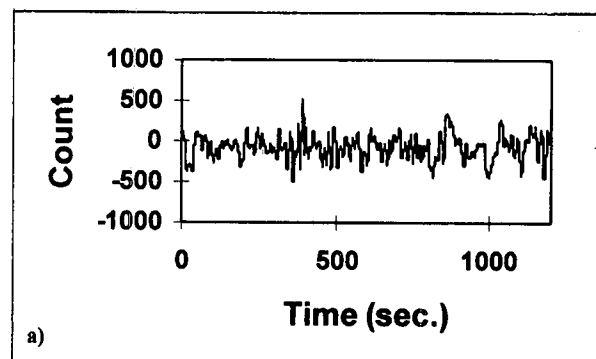
در این مطالعه از روابط (۵)، (۷)، (۱۰) و (۱۲) برای برآورد قدرت این انفجار استفاده شده است. مشخصات زمانی و مکانی این انفجار عبارتند از: زمان انفجار ۱۵/۲:۱۶:۱۰، طول شرقی  $24^{\circ} 47' 24''$  و عرض شمالی  $28^{\circ} 54' 00''$  درجه (یانک و نورث، ۲۰۰۰). بنابراین، قدرت این انفجار از چهار روش لبرزه‌ای برآورد شد که عبارت‌اند از  $m_b$ ، پیشینه دامنه موج  $P$ ،  $M_{st}$  و  $M_{sf}$  که به آنها اشاره می‌شود.

۱-۳ استفاده از موج P

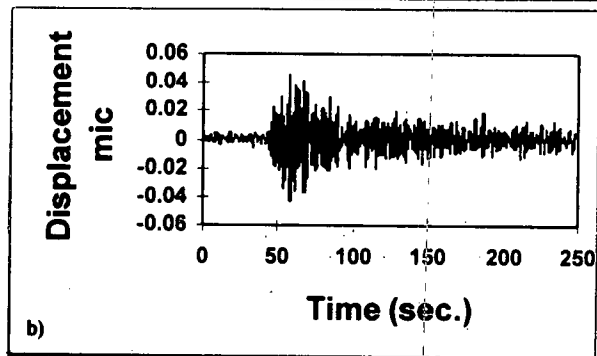
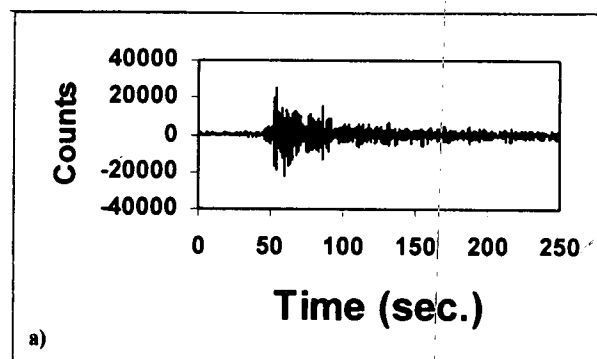
شکل ۶a مولفه قائم لرزه‌نگاشت دوره کوتاه ایستگاه ۱ ایلیا مربوط به انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان را قبل از حذف اثر دستگاه اندازه‌گیری نشان می‌دهد. به منظور حذف اثر دستگاه اندازه‌گیری از روی لرزه‌نگاشت‌های مولفه قائم دوره کوتاه ایستگاه‌های ایلیا،

لرزه‌نگاشت‌ها مورد پردازش قرار گرفتند. به‌طور کلی خروجی یک دستگاه لرزه‌نگاری نتیجه هم‌آمیختگی ورودی به لرزه‌سنج با پاسخ یک دستگاه لرزه‌نگاری در حیطه زمان است که در این جا با توجه به مطالعات انجام شده از سوی یمینی‌فرد (۱۳۷۵) این پردازش صورت پذیرفت. همچنین با توجه به این که دامنه جابه‌جایی زمین در اثر زلزله‌ها و انفجارهای هسته‌ای دور، بسیار کوچک است، هر دستگاه لرزه‌نگاری یک اثر تقویت روی جابه‌جایی ورودی اعمال می‌کند که ضرورت دارد قبل از هرگونه محاسبه‌ای حذف شود. میزان تقویت ایستگاه‌های ایلیا در قسمت کوتاه دوره با ۲۴ دسی‌بل برابر ۱۴۲۵۱۰ است (نبی‌بیدهندی، ۱۳۷۰). شکل ۶b پس از حذف اثر دستگاه اندازه‌گیری و میزان تقویت اعمال شده بر شکل ۶a را نشان می‌دهد.

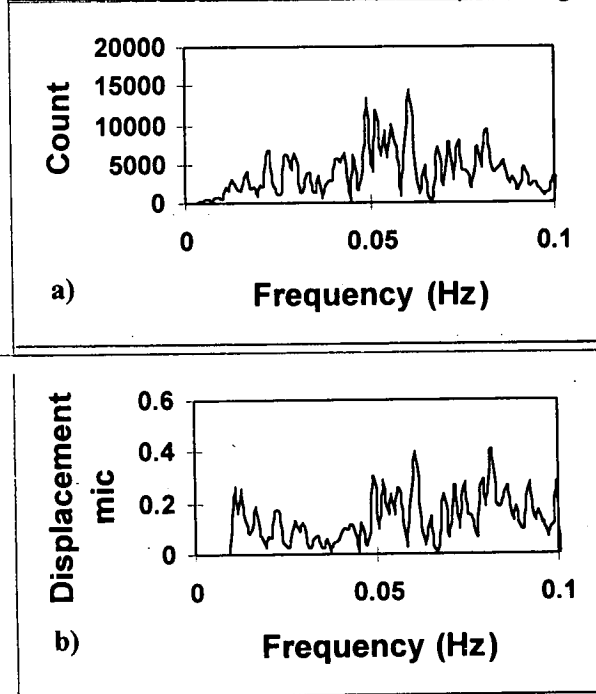
با قرائت دامنه فاز b، مولفه قائم لرزه‌نگاشت کوتاه دوره ایستگاه ۱ ایلیا مربوط به انفجار پاکستان و انجام تصحیحات لازم روی آن  $m_b$  برابر ۴/۹ به دست آمد که با به کارگیری رابطه (۵)



شکل ۷. مولفه قائم لرزه‌نگاشت بلند دوره ایستگاه ۱ ایلیا مربوط به انفجار هسته‌ای زیرزمینی ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان. (a) داده خام و (b) پس از اعمال یک صافی میان‌گذر ۰/۳ تا ۰/۵ هرتز و پنجره همینگ.



شکل ۶. مولفه قائم لرزه‌نگاشت دوره کوتاه ایستگاه ۱ ایلیا مربوط به انفجار هسته‌ای زیرزمینی ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان. (a) قبل از حذف اثر سیستم اندازه‌گیری و (b) پس از حذف اثر سیستم اندازه‌گیری و حذف میزان تقویت اعمال شده.



شکل ۸. طیف دامنه شکل ۷b (a) قبل از حذف اثر دستگاه اندازه گیری و (b) پس از حذف اثر دستگاه اندازه گیری و حذف میزان تقویت اعمال شده.

زیرزمینی با استفاده از روش‌های لرزه‌ای خطای تا  $\pm 20\%$  درصد مطلوب تلقی می‌شود (زیرا با استفاده از روش رادیوشیمیایی، نمونه‌های حاصل از محل و نوع انفجار هسته‌ای زیرزمینی، می‌توان قدرت انفجار را با حدود  $\pm 10\%$  درصد، تخمین زد، بشام و هورنر (۱۹۷۳)). بنابراین قدرت برآورد شده از چهار روش یادشده برای محیط‌های سخت بین ۱۱ تا ۱۷ کیلوتن تغییر می‌کند.

#### ۴ نتیجه‌گیری

لرزه‌نگاشت‌های آنالوگ مولفه قائم کوتاه دوره لرزه‌نگاشت‌های آنالوگ و رقمی شده مولفه قائم بلند دوره ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ ایلیپا، مربوط به انفجارهای STS که قدرت آنها را ورجینو (۱۹۸۹)، ثوربر و همکاران (۱۹۹۳) و استیونس و مورفی (۲۰۰۱) گزارش کرده‌اند مورد بررسی قرار گرفت. با تعیین کمیت‌های لرزه‌ای موج P و موج ریلی این لرزه‌نگاشت‌ها مربوط به انفجارهای STS، چهار رابطه برای برآورد قدرت این انفجارها و کمیت‌های لرزه‌ای لرزه‌نگاشت‌های ایلیپا تعیین شد و در برآورد

قدرت آن برای محیط‌های سخت برابر ۱۰ کیلوتن برآورد شد. با قرائت بیشینه دامنه فاز P مولفه قائم لرزه‌نگاشت‌های تصحیح شده کوتاه دوره ایستگاه ۱ ایلیپا و به کارگیری رابطه (۷)، قدرت انفجار پاکستان برای محیط‌های سخت برابر ۱۶ کیلوتن برآورد شد.

#### ۲-۳ استفاده از موج ریلی

شکل ۷a مولفه قائم لرزه‌نگاشت بلند دوره ایستگاه ۱ ایلیپا مربوط به انفجار هسته‌ای ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان را قبل از هرگونه پردازش نشان می‌دهد. از آن‌جا که نوفه زمینه بر روی این لرزه‌نگاشت در محدوده انفجار زیاد است ابتدا یک صافی میان‌گذر  $0.3/0.5$  تا  $0.5/0.5$  هرترز سپس یک پنجره همینگ بر روی آن اعمال شد که نتیجه در شکل ۷b آورده شده است. برای محاسبه بزرگی موج ریلی در حیطه زمان مقدار 2A برابر  $7/5$  و مقدار T برابر ۱۶ ثانیه قرائت شد که با استفاده از رابطه (۹) مقدار  $M_{st}$  برابر  $3/22$  به دست آمد. با به کارگیری رابطه (۱۰) قدرت این انفجار از این راه، ۱۶ کیلوتن برآورد شد. برای محاسبه بزرگی در حیطه بسامد طیف دامنه شکل ۷b محاسبه شد که در شکل ۸a آورده شده است. با حذف اثر پاسخ دستگاه لرزه‌نگاری مولفه قائم بلند دوره ایستگاه ۱ ایلیپا که از سوی سدیدخوی (۱۳۷۳) ارائه شده است و حذف اثر تقویت دستگاه از شکل ۸a شکل ۸b حاصل شد که از این لرزه‌نگاشت، برای محاسبه بزرگی موج ریلی در حیطه بسامد استفاده شده است. محاسبات انجام شده در این مطالعه ضرایب  $B(\Delta)$  و  $P(T)$  در رابطه (۱۱) در مورد انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان به ترتیب برابر  $1/14$  و  $-0.15$  و  $M_{sf}$  برابر  $3/57$  به دست آمد. با استفاده از رابطه (۱۲) قدرت انفجار هسته‌ای یادشده برای محیط‌های سخت، برابر ۱۴ کیلوتن برآورد شد.

با متوسط‌گیری مقدار قدرت برآورد شده از چهار روش فوق، قدرت انفجار پاکستان برای محیط‌های چشمه انفجار گرانتیت و نمک، برابر ۱۴ کیلوتن و برای محیط‌های آبرفت خشک و توف برابر ۱۳ کیلوتن برآورد شد. در برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای



قدرت انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان مورد استفاده قرار گرفت که نتایج آن بشرح زیر است.

۱- استفاده از روابط به دست آمده برای برآورد قدرت انفجارهای STS از ایستگاه‌های ایلبا مناسب‌تر از روابط جهانی برای برآورد قدرت انفجار ۲۸ مه ۱۹۹۸ پاکستان است.

۲- رابطه رضاپور و پیرس (۱۹۹۸) مناسب‌تر از رابطه IASPEI برای محاسبه بزرگی موج ریلی در حیطه زمان انفجارهای STS از لرزه‌نگاشت‌های ایلبا است.

۳- میانگین قدرت برآورد شده انفجار پاکستان با استفاده از موج P و موج ریلی برای محیط‌های سخت، برابر ۱۴ کیلوتن و برای محیط‌های آبرفت خشک و توف، برابر ۱۳ کیلوتن برآورد شد. با توجه به این که دقت برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای، در فاصله‌های دور، با استفاده از روش‌های لرزه‌ای تا  $\pm 20\%$  درصد منطقی است بنابراین قدرت انفجار هسته‌ای پاکستان برای سنگ‌های سخت حدود ۱۱ تا ۱۷ و برای سنگ‌های سست، حدود ۱۰ تا ۱۶ کیلوتن برآورد می‌شود.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله در قالب طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران به شماره ۶۵۱/۱/۳۶۱ تحت نام برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی هندوستان و پاکستان با استفاده از ثبت‌های لرزه‌نگاری کشور با اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است. از حوزه معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به این لحاظ تشکر می‌شود. از مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک و کارکنان این مرکز به ویژه آقای اردوان آریایی‌نژاد به خاطر در اختیار قرار دادن لرزه‌نگاشت‌های مربوط به رخدادها تشکر و قدردانی می‌نماید.

#### منابع

جواهریان، ع. و سدیدخوی، ا.، ۱۳۷۴، برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی شرق قزاقستان: ن. فیزیک زمین و فضا، ۲۲، ۲۰-۱۳.

جواهریان، ع. و نوروزیان، ن.، ۱۳۷۳، برآورد قدرت انفجارهای هسته‌ای زیرزمینی شرق قزاقستان با استفاده از دامنه موج P لرزه‌نگاشت‌های کشور: ن. فیزیک زمین و فضا، ۲۱، ۱-۱۰.

سدیدخوی، ا.، ۱۳۷۳، محاسبه  $M_s$  در حوزه بسامد: ن. فیزیک زمین و فضا، ۲۱، ۳۰-۵۳.

نی‌بیدهندی، م.، ۱۳۷۰، بررسی منحنی بزرگنمایی شبکه لرزه‌نگاری قم - ساوه - کرج (اری)، گزارش علمی شماره ۷۶ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه.

یمینی‌فرد، ف.، ۱۳۷۵، تحلیل پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه منجیل - رودبار (۳۱ خرداد ۱۳۶۹) براساس داده‌های رقمی ایلبا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک - مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Akasheh, B., Eshghi, I., and Soltanian, R., 1976, The Iranian Long Period Array (ILPA): J. Geophys., 42, 159-162.

Bache, T. C., 1982, Estimating the yield of underground nuclear explosions: Bull. Seism. Soc. Am., 72, s131-s168.

Basham, P. W., and Horner, R. B., 1973, Seismic magnitudes of underground nuclear explosions: Bull. Seism. Soc. Am., 63, 105-131.

Bolt, B. A., 1976, *Nuclear explosions and earthquakes, the parted Veil*: W. H. Freeman and Co.

Lay, T., and Wallace, T. C., 1995, *Modern global seismology*: Academic Press, Inc., San Diego.

Marshal, P. D., and Basham, P. W., 1972, Discrimination between earthquakes and underground explosions employing an improved  $M_s$  scale: Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 28, 431-458.

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.

- Sikka, S. K., Nair, G. J., Roy, F., Kakodcar, A., and Chidambaram, R., 2000, The recent Indian nuclear tests – A seismic overview: *Curr Sci*, **79**, 1359-1366.
- Stevens, J. L., and Murphy, J. R., 2001, Yield estimation from surface-wave amplitudes: *Pure Appl. Geophys.*, **158**, 2227-2251.
- Thurber, C. H., Quin, H. R., and Richards, P. G., 1993, Accurate locations of nuclear explosions in Balapan, Kazakhstan, 1987 to 1990: *Geophys. J. Letters*, **20**, 399-402.
- Veith, K. F., and Clawson, G. E., 1972, Magnitude from short-period p-wave data: *Bull. Seism. Soc. Am*, **62**, 435- 452.
- Vergino, E. S., 1989, Soviet test yields: *EOS*, **70**, 1511-1525.
- Wallace, T. C., 1998, The May 1998 India and Pakistan nuclear tests: *Seismic Research Letters*, **69**, 386-393.
- Yang, X., North, R., and Romney, C., 2000, CMR Nuclear Explosion Database (Revision 3): CMR Technical Report CMR-00/16.