Archive of SID

مطالعه فاز لرزه‌ای T وانتشار آن در آب و خشکی

مرسده فامیلی[1] ،دکترغلام جوان دولوئی[2]ودکتر احمد سدید خوی[3]

خلاصه:

امواج T در کانالی به نام سوفارکه انرژی آکوستیک را در اقیانوسها عبور می دهد با حداقل میزان سرعت در عمق 1200 متری منتشر می گردد. امواج حاصل از چشمه های لرزه ای درون خشکی پس از تبدیل به انرژی آکوستیک در حد مرز لایه های مایع- جامد می توانند امواج T را بوجود آورند و به دلیل خصوصیات ویژه این فاز، می توان با استفاده از آن بینشی از چشمه های لرزه ای درون محیط اقیانوسی فراهم آورد. باملاحظه کاربرد این فاز در ردیابی زلزله های کوچک در بستر دریایی وایجاد توانایی در بدست آوردن اطلاعاتی درباره گسیختگی چشمه و امکان ردیابی زیردریایی ها با استفاده از انفجارات کوچک ایجاد شده در دریا و تحلیل این فازو همچنین استفاده از این فاز در مدل سازی زلزله های سونامی، مطالعه برروی این نوع موج ضروری است.مطالعه برروی موج T نشان می دهداین فاز به امواج P وS یا امواج سطحی دور از ساحل تبدیل می شود و بنابراین می تواند صدها کیلومتر در خشکی مسیر را طی کند که درصورتیکه دامنه به اندازه کافی زیاد باشد برای افراد کنار ساحل قابل احساس است حتی اگر زلزله هزاران کیلومتر دورتر اتفاق افتاده باشد. باتوجه به عدم اینگونه مطالعات در ایران، قراردادن ایستگاههایی به منظور ثبت امواج T ومطالعه آن میتواند فرصت جدیدی را برای تحقیق برروی چشمه های آکوستیکی مانند زلزله ها در محیط اقیانوس را فراهم آورد.

کلید واژه ها: امواج T، انرژی آکوستیک ، کانال سوفار،چشمه های آکوستیک

1- دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (mer30_fa@yahoo.com)

2- پژوهشگاه بین المللی زلزله و مهندسی زلزله (javandoloi@iiees.ac.ir)

3- موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (asadid@ut.ac.ir)

www.SID.ir

Archive of SID

Study on seismic T phase and it's propagation in water and land

Mercedeh Famili, Dr.Gholam Javandoloi and Dr.Ahmad Sadidkhuy

Abstract

T waves propagate in the so-called SOFAR channel of minimum sound velocity centered on 1200 meters depth acting as a waveguide for acoustic energy in the world's oceans. They can be excited by sources in the solid earth such as earthquakes through conversion of seismic energy into acoustic waves at the solid- liquid interfaces. As a particular form of seismic waves emanating from an earthquake, T waves can provide insight into seismic sources in the ocean environment. Considering the application of this phase to detect small earthquakes in marine basins and ability to yield information on source rupture and detect submarines by using the small explosion and analysis of this phase and also using of this phase in modeling of Tsunami earthquake study on T waves is an essential. Study on T waves shows p and s or surface waves conversions occurs offshore. So it can be travel hundreds of kilometers away from the coastline. Indeed, when the seismic waves resulting from receiver-side conversion is of sufficient amplitude, it can be felt by the population close to shore even though the source of the acoustic energy maybe thousands of kilometers away. For instance, large earthquake in Sumatra in 2004 on Maldives was occurred was this group. Remarking that there is no study of T waves in Iran, investigation of this phase can open up new opportunities for the investigation of acoustic sources, including earthquakes, in the ocean environment.

Keywords: T waves, acoustic energy, SOFAR channel

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه:

زمین‌لرزه‌ها نمایشی توانمند از رها شدن ناگهانی انرژی واتنش که طی مدت مدیدی در قسمت بالایی زمین ذخیره شده است، می‌باشند. در اثر زمین لرزه‌ها انواع مختلف موجهای لرزه‌ای تولید و انتشار می یابد. این موجها از درون زمین عبور و در فاصله‌های گوناگون توسط دستگاه‌های حساسی که در نزدیکی سطح زمین قرار داده شده‌اند، ثبت می‌شوند. نمای یک لرزه نگاشت واقعی، بازتاب‌کننده‌ی اثر ترکیبی چشمه، مسیر انتشار، سرشتی دستگاه ثبت و نوفه‌های محیطی ناشی از شرایط خاص در یک محل ثبت می‌باشند. برای درک طبیعت بالقوه پیچیده ردهای لرزه نگاشت ها، شناخت از فیزیک چشمه‌ی لرزه‌ای و محیط انتشار موجهای لرزه‌ای ضروری است. اولین موج حاصل از زمین‌لرزه امواج اولیه، فشارشی یا P نامیده می‌شود و دومین موج، ثانویه یا S نامیده می‌شود. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری جزیره‌ای و ساحلی موج سومی را گزارش کرده‌اند به نام امواج T یا (Tertiary) که پس از امواج P و S می‌رسند و سرشتی انتشار آن در اقیانوس شبیه امواج صوتی است. این نوع موج در طول خشکی به صورت امواج P و S ویا سطحی باسرعتی بیش از سرعت سیر آن در آب سیر می کند و مطالعه آن بینشی ازچشمه های لرزه ای در محیط اقیانوسی را ایجاد می کند. در این مقاله امواج هدایت شده Tدر آبهای اقیانوسهای آزاد در کانالی که صوت با حداقل میزان سرعت مسیرش را طی می کند مورد بررسی قرار می گیرد.

در شرایط ساده سرعت امواج آکوستیک در آب با متغیرهای ترمودینامیک مانند فشار و دما کنترل می شود. تحت شرایط اقیانوسی سرعت صوت با فشار با نرخ حدود $۱/۸\times۱۰^{-۶}$ $m/s.pa$ودما با نرخ حدود $۲/۱\ m/s.k$ افزایش می یابد. در ستونهای اقیانوسی فشار هیدروستاتیکی به صورت خطی باعمق به شکل گرادیان مثبت سرعت $۱/۸m/s$ در صد مترستون اقیانوسی تعریف می شود. گرادیان دما دراقیانوس به صورت فصلی و جوی تغییر می کندو حرارت در لایه های گرماشیب به طور چشمگیری افت می یابد.به طور کلی

www.SID.ir

Archive of SID

فشارو حرارت در عمق به نحوی مؤثر است که منجر به ایجاد کانال کم سرعت که توانایی به تله انداختن انرژی آکوستیک با طول موجهای کوتاه را دارد ،می شود (Dmowsks,2008).

آکوستیک آبهای کم‌عمق

در کانال آبهای کم‌عمق امواج آکوستیک با پرش از سطح و کف مسیر مستقیمی را طی می‌کنند. ما می‌توانیم با ساده سازی پارامترهای محیط تخمین نا مطلوبی از انتشار سیگنال‌های آکوستیک در طول کانال آبهای کم‌عمق داشته باشیم با فرض سرعت صوت تقریباً ثابت و سطح و کف هموار می‌توانیم به طور هندسی مسیرانتشار را برای امواج آکوستیک محاسبه نمائیم. با تخمین مسیرانتشار قادر خواهیم بود سیگنال‌های رسیده و توان انتقالی سیگنال را و همچنین مکان چشمه و مقصد را تخمین بزنیم.

در کانال کم‌عمق با توجه به شکل(۱) عمق آب ۱۰۰ متر و فاصله‌ی بین چشمه و گیرنده ۱۰۰ متر است برای ساده کردن شرایط فرض می کنیم چشمه و گیرنده در عمق ۲۰ متری قرار دارند امواج صوتی از مسیرهای متفاوت که در شکل(۱) مشاهده می شود به گیرنده می‌رسند. اگر یک پالس با مدت دوام $T\,(ms)$ و دامنه‌ی $A\,(v)$ ارسال شود می‌توانیم سیگنال رسیده را محاسبه نماییم (Porter and Reiss,1984). این عمل با استفاده ازمراحل زیر امکان پذیر است:

الف- محاسبه‌ی طول مسیر انتشار

ب- محاسبه‌ی زمان رسید به گیرنده با فرض ثابت بودن سرعت صوت

ج- محاسبه‌ی اتلاف در انتقال که مجموع همه‌ی اتلاف‌ها در اثر انعکاس و انتشارمی‌باشد.

د- برآورد SIL (شدت صوت دریافتی)

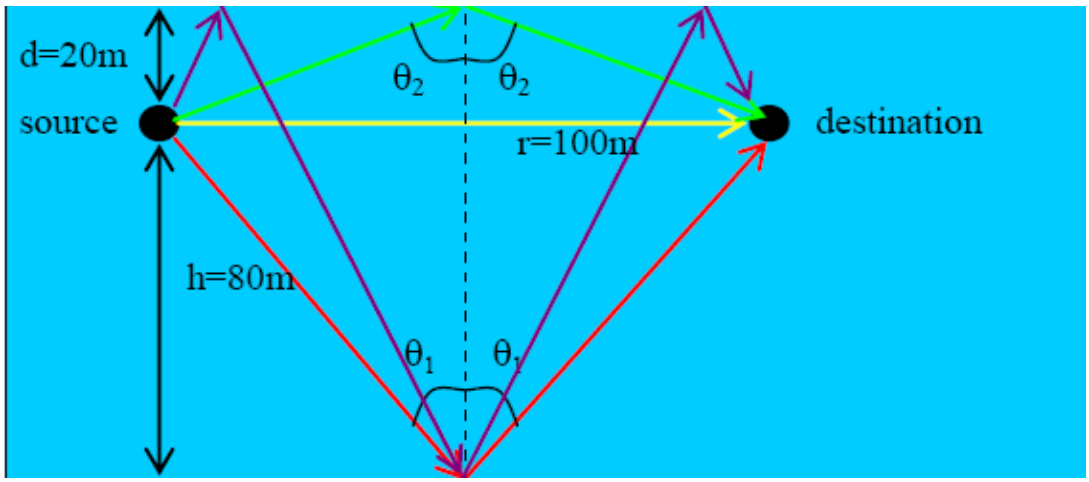
ه- تعیین SIL دریافتی درگیرنده برای هر مسیر تخمینی

و- تعیین ولتاژ خروجی

ز- تکرار محاسبات برای برد وسیع‌تر

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۱: کانال آب کم عمق با برد کوتاه

محاسبه‌ی برد چشمه

برد چشمه با اندازه‌گیری پالس دریافتی صورت می‌گیرد

$$p(t)=A\sin(2\pi f_c t) \qquad 0<t<T_s$$

(T_s مدت دوام پالس) در غیر اینصورت صفر است اگر سیگنال دریافتی نوعی سیگنال انتقالی با تأخیر باشد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$r(t)=B\sin(2\pi f_c(t-\tau)) \qquad \text{و}$$

$$\tau<t<(T_s+\tau)$$

از کرولیشن سیگنال دریافتی و انتقالی می‌توان برآوردی از زمان تاخیر داشت.

تعیین جهت انتشار:

اگر دو هیدروفن به فاصله‌ی d از هم قرار داشته باشند با استفاده از زمان انتشار در هر دو هیدروفن می‌توان گفت کدام هیدروفن به چشمه نزدیک‌تر است. در صورت دقت بالا در زمان اندازه گیری انتشار می‌توان زاویه‌ی چشمه را نیز تعیین کرد

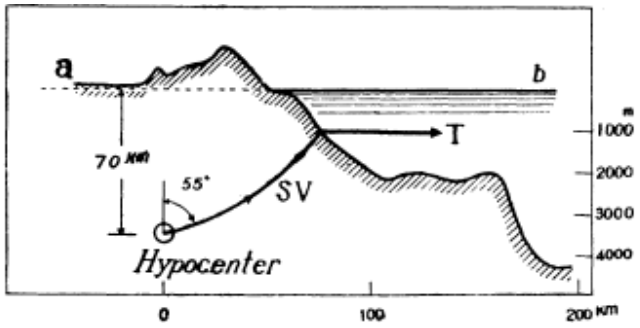
فازلرزه‌ای T ونحوه‌ی ایجاد:

فاز T یا موج T یک فاز آکوستیکی از یک زمین‌لرزه به وقوع پیوسته در اقیانوس است. فاز T یا Tertiary بعد از امواج P (اولیه) و S (ثانویه) وارد ایستگاه لرزه نگاری می‌شود و چون زمان رسید آن کندتر است به عنوان سومین فاز ثبت می‌شود. اساساً وقتی یک زلزله در پوسته‌ی زمین زیر اقیانوس اتفاق می‌افتد

www.SID.ir

Archive of SID

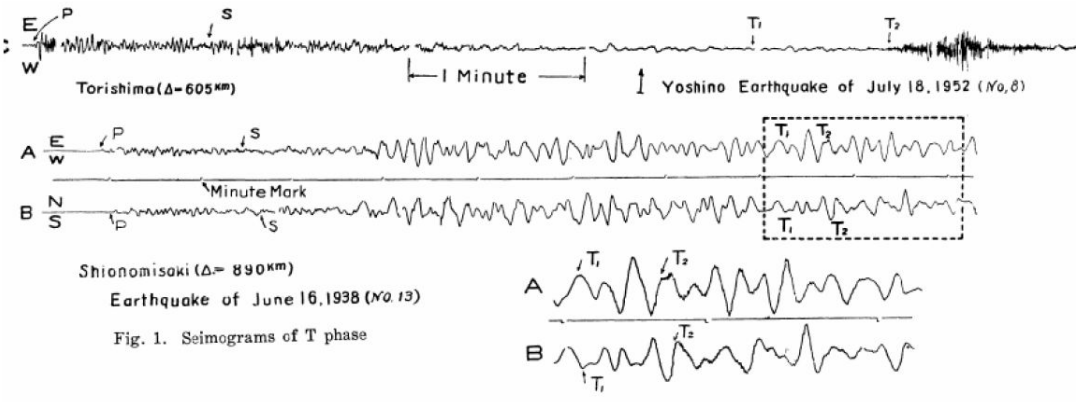
فازهای پوسته‌ای معمول مانند امواج p و s تولید می‌شوند. بخشی از این انرژی در اقیانوس به صورت انرژی آکوستیک وارد آب می‌شود که امواج T می‌باشند. منبع تولید فاز T زمین‌لرزه‌ها، انفجارات زیر آب و آتشفشانهای زیردریایی و چشمه‌هایی که انرژی امواج حجمی آنها تبدیل به انرژی آکوستیک زیرآب می‌گردند، می‌باشند. اما همه‌ی زمین‌لرزه‌های درون اقیانوس امواج T تولید نمی‌کنند ولازم است که چشمه‌ی زمین‌لرزه نزدیک به سطح آب باشد. امواج T توسط هیدروفن‌ها ثبت می‌شوند اما در برخی جزایر گاهی اوقات لرزه نگارها سیگنالهای امواج T را که تبدیل به فازهای پوسته‌ای شده‌اند (زمانی که به جزیره یا خشکی برخورد می‌کند) ، ثبت می‌کنند. بطور مشابه گاهی اوقات زلزله‌های بزرگی را در هاوایی می‌بینیم علت آن، این است که انرژی زمین‌لرزه‌ای تبدیل به امواج T در اطراف جزیره شده است(شکل۲). دستگاه‌های بکار گرفته شده در خشکی امواج T واضحی را پس از تبدیل آب- خشکی موجهای صوتی به صورت امواج P و S ویا موجهای سطحی که در قسمت خشکی کل مسیر ارسال، منتشر شده را ثبت می‌کنند. نمونه‌ای از نگاشت ثبت شده در شکل۳ نشان داده شده است.



شکل ۲:نحوه ایجاد موج Tدرزلزله یوشینوتاریخ زلزله ۱۸جولای ۱۹۵۲وتوپوگرافی منطقه رومرکز (Wadati and Inouye, 1953)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳: نمونه ای از لرزه نگاشت زلزله ۱۶ ژوئن ۱۹۸۳(Δ= ۸۹۰km) فازT در این شکل داخل مربع خط چین نشان داده شده است (Wadati and Inouye,1953)

خصوصیات فاز لرزه‌ای T در طی مسیر از سیال به جامد:

امواج T، امواج کوتاه دوره، با دوره‌هایی کمتر از یک ثانیه می‌باشند که منحصراً توسط لرزه‌نگاشت‌های کوتاه دوره ثبت می‌شوند. بر روی لرزه‌نگاشت‌ها اغلب به صورت تک‌فام با افزایش و کاهش تدریجی دامنه در کل مدت، تا چندین دقیقه حضور دارند. بطور کلی می‌توان گفت در طی انتقال موج از آب به خشکی فرکانس‌های بالا بیشتر از فرکانس‌های پایین‌تر پراکنده می‌شوند و در شکل موجهای ساحلی فرکانس‌های بالا بیشتر میرا می‌شوند. شکل موج در روی خشکی پیچیده‌تر است و مدت دوام طولانی‌تری نسبت به شکل موج در آب دارند و به علاوه کاهش با معنی دامنه نسبت به فرکانس در طیف خشکی وجود دارد. دامنه‌ی امواج حجمی وقتی به ساحل خیلی نزدیک هستیم کم است و به علاوه امواج سطحی قویتری نزدیک به ساحل بوجود می‌آیند که از امواج سطحی فرکانس بالا توقع داریم که به سرعت با فاصله میراشوند(Stevens et al.2001). بنابراین از سنسورهای فاز T در مناطق ساحلی استفاده می‌شود زیرا از امواج T توقع داریم کمتر دستخوش میرایی گردند به خصوص در

www.SID.ir

Archive of SID

فرکانس‌های بالا برای رد یابی فاز T باند فرکانسی پهن یک ضرورت است زیرا خصوصیات طیفی رویدادهایی که بطور طبیعی رخ می‌دهند از انفجارات متفاوت است به علاوه مدت دوام سیگنال ناشی از انفجارات هسته ای کمتر از مدت دوام سیگنال ناشی از زمین لرزه های طبیعی است.این فاز نتیجه‌ی اثرات متقابل میدان موج آکوستیک با شیب قاره‌ای می‌باشد و منطقه عمیق کم سرعت در اقیانوس به نام SOFAR شرایط مطلوبی را برای انتشار این نوع موج فراهم می سازد (Bullen and Bolt,1985).

مشاهده این فاز در فاصله‌هایی به بزرگی ۸۰ درجه گزارش شده است. آنالیز بیشینه دامنه ها و مدت دوام این نوع فاز لرزه ای مقادیر کم Q را برای جنس مواد در طول مسیر خشکی که این فاز می پیماید را نشان می دهد . به نظر می رسد Q در آب دریا ده برابر بیش از آنچه که در خشکی است می باشد(Shapira, 1981) .

ضرورت مطالعه فاز لرزه‌ای T:

مطالعه بر روی زلزله‌ها نشان داده است که این نوع موج خسارات بسیاری به مناطق ساحلی حتی دورتراز ساحل وارد کرده است. در نتیجه فاز T مانند امواج P می‌تواند مسیر طولانی را در مناطق ساحلی طی کند. پس با مطالعه این فاز در مناطق دور از ساحل و تحلیل سرعت انتشار آن نسبت به تبدیلهای احتمالی آن می‌توان آگاهی یافت.

مهمترین نکته درباره امواج T این است که امکان ردیابی زلزله‌های کوچک‌تر از آنچه که لرزه نگارها در خشکی می‌توانند ثبت کنند را می‌دهد زیرا تقریبا همه‌ی لرزه نگارها به روی خشکی به سختی می‌توانند هر رویداد کوچکی را که در اقیانوس اتفاق می‌افتد را ثبت کنند به علاوه فازلرزه‌ای T ابزار مهمی است برای تعیین عمق کانونی و مکانیسم گسلش (Ewing et al.1952) ضمن اینکه با ایجاد انفجارهای کوچک و تحلیل فاز T می‌توان از این فاز در ردیابی زیر دریایی‌ها استفاده کرد (Stevens et al.2001). به این ترتیب دربرنامه‌ریزی‌های مدیریت بحران برای تدوین برنامه های کاهش خطرات ناشی از زلزله قابل

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده است و همچنین در مدل‌سازی امواج سونامی مورد توجه خاص قرارمی‌گیرد (Ewing et al.1950).

پیشینه‌ی مطالعاتی:

Pisechia et al. (1998) مطالعاتی را برروی فاز T انجام دادند و تبدیلات این فاز از یک چشمه‌ی انفجاری در اقیانوس را مدل‌سازی کردند این عمل را با مشاهده‌ی شکل موج‌ها در جزایر Mururoa و Fangataufa در جنوب اقیانوس آرام انجام دادند. آنها از ردهای پرتوی استفاده کردند و توابع گرین را در طول مرزهای عمودی به منظور انتشار پرتوهای چشمه به سمت جزایر محاسبه نمودند و دریافتند که فاز T در خشکی شامل دو نوع موج P می‌باشد که با دو موج ریلی همراه است به صورتی که رسیدهای چندگانه به عنوان تبدیلات مختلف تولید شده شناخته می‌شوند. محاسبات برای حوزه‌ی فرکانسی 6Hz انجام گردید و در این مورد دریافتند که امواج p و ریلی محاسبه شده به لحاظ اندازه قابل قیاس هستند.

Cansi and Bethoux (1985) فازهای T را در مناطق دورتر از ساحل به صورت تبدیلات فازهای T-P و T-Sو به صورت منحنی با عمق ثابت در اقیانوس را مدل‌سازی نمودند.آنها توافق خوبی بین شکل موجهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده که تنها با امواج P و S ترکیب شده‌اند را نشان دادند.

Degroot- Hedlin and Orcutt (1998) فاز T را با محاسبه فشار در کف اقیانوس از انتشار مدهای اصلی در طول پروفیل عمق سنجی محاسبه نمودند و نشان دادند که شکل و طول مدت دنباله‌ی فازهای T از زمین لرزه‌هایAleutian می‌توانند در point sur و جزیره wake نسبتا خوب مدل‌سازی شوند.

Talandier and okal (1998) تبدیلات فاز T را روی شیب تند جزیره با استفاده از داده‌های شبکه لرزه‌ای polynesien مطالعه نمودند و دریافتند که مشاهدات و ردهای پرتوی در توافق خوبی هستند به شکلی که فاز T اساساً شامل امواج P در فواصل بیش از ۹ کیلومتراز نقطه تبدیل می‌باشند. و در فواصل نزدیک‌تر دریافتند که فاز T پیچیده‌تر است و

www.SID.ir

Archive of SID

شامل امواج S و امواج سطحی است . آنها دریافتند که تبدیل به امواج سطحی برای شیب‌های کمتر از ۱۶ درجه در فواصل کوتاه اتفاق می‌افتد.

Degroot-Hedlin and Orcutt (2001) مدل‌سازی سه بعدی امواج هیدروآکوستیک را با استفاده از امواج فاز لرزه‌ای T انجام دادند و نشان دادند که دامنه‌ی امواج T در خشکی با افزایش شیب کف اقیانوس افزوده می‌شود و به علاوه دامنه‌ی این نوع موج به سرعت با افزایش زاویه‌ی تابش فازهای آکوستیک در خطوط ساحلی کاهش می‌یابد. آنها شکل موج سرعت افقی و عمودی را برای چشمه‌ها با زاویه‌های مختلف تابش به مرزهای خشکی/ دریا شبیه‌سازی نموده ووابستگی خصوصیات سیگنال را در سرعت لرزه‌ای و جهت چشمه بررسی نمودند.

Brocher (1983) فاز لرزه‌ای Tحاصل از طوفانهای زلزله (Swarm) در روی Mid-Atlantic Ridge در $31/6^{\circ}$بدست آورد. این فاز لرزه‌ای بر روی آرایه OBS ثبت شده بود و برای سی ساعت، شانزده لرزه را ثبت نموده اند. او از مدت دوام فاز لرزه‌ای T به عنوان معیاری در تعیین بزرگی لرزه‌ای و مقادیرb-value , a-value استفاده نمود.

نتیجه گیری:

به دلیل تبدیل احتمالی فاز لرزه‌ای T به فازهای لرزه‌ای دیگر در طی برخورد به ساحل و مناطق دورتر از ساحل این نوع امواج خساراتی را به مناطق ساحلی و دورتر می‌تواند وارد کند و به علاوه این نوع موج مسیر طولانی را می‌تواند در خشکی طی کند لذا با توجه به اهمیت این نوع فاز و موارد کاربرد آن، مطالعه این فاز می‌تواند زمینه جدیدی در شناخت محیط انتشار و همچنین بالا رفتن دقت در تحلیل با استفاده‌ی بهینه از لرزه‌نگاشت ها ایجاد نماید. در این صورت قرار دادن لرزه سنج در نواحی ساحلی و قرار دادن هیدروفن در مناطق دریایی به منظور بررسی محیط انتشار و چشمه علاوه بر موارد اکتشافی زمینه‌ی جدیدی در مطالعات زلزله‌شناسی و تحلیل های دقیق و کاربردی‌تری را فراهم می آورد.

www.SID.ir

Archive of SID

References:

– Brocher, T.M., 1983 ,T-phases from an earthquake swarm on the Mid-Atlantic Ridge at 31.6°N, *Mar. G. Res.*, **6**, 39-49

– Bullen. K.E. and Bolt. B. A., 1985, An introduction to the theory of seismology, Cambridge University Press, Fourth Edition , 499

– Cansi.Y. and Bethoux.N., 1985, T waves with long inland paths: Synthetic seismograms, J. Geophysics.Res., 90, 5459-5465

– Degroot- Hedlin. C. and Orcutt .J., 1998, Synthesis of earthquake generated T-waves, *Geophysics. Res.; ett.*, n v: 26, 1227-1230

– Degroot-Hedlin.C. and Orcutt. J., 2001, T-phase observation in north California: Acoustic to seismic coupling at a weakly elastic boundary, 158 513-530

– Dmowsks .R., 2008, Advances in Geophysics, Vol.49, Elsevier, First Edition, 1-65

– Ewing .M., Tolstoy.I. and Press .F., 1950,Proposed use of T-phase in tsunami warning system, BSSA , Vol.40, 53-58

– Ewing. M., Press. F. and Wolrzel.J. L., 1952, further study of T- phase, BSSA, Vol.42, no.1, 37-51

– Piserchia.P.F.,Virieux.J., Rodriguesues. D. and Talandier. J., 1998, Hybrid numerical modeling of T-wave propagation: Application to the mid-plate experiment, Geophysics .J. Int., 133,789-800

– Porter. M. and Reiss. E.L., 1984, a numerical method for ocean acoustic normal modes, J. Acoustic. Soc. Am.76, 244-252

– Shapira .A.,1981, T-phase from under water explosion off coast of Israel, BSSA, Vol.71, no.4, 1049-1059

– Stevens. J.L., Baker G.E., Cook. R.W., D'spain. G.L., Berger .L.P. and Day.S., 2001، Empirical and numerical modeling of T- phase propagation from ocean to land, Pure. Appl. Geophysics, 158,531-565

www.SID.ir

Archive of SID

– Talandier .J. and Okal. E.A., 1998, on the mechanism of conversion of seismic waves to and from T-waves in the vicinity of island shores, *Bull Seism. Soc. Am*., 88, 621

– Wadati.K.and Inouye. W.,1953, On the T phase of seismic waves observed in Japan, Proceeding of Japan Academy ,Vol.29, no.2, 47-54

www.SID.ir