

استفاده از روش توموگرافی لرزه‌ای برای تعیین پتانسیل نشت از تکیه‌گاه‌های سد بختیاری

یوسف شرقی^{۱*}، فیروز علی نیا^۱ و حمیدرضا سیاه‌کوهی^۲

^۱دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
^۲دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران
 موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۲/۱۱

چکیده

توموگرافی از زمان اولین رسید برای ارایه تصویری از ساختار سرعتی زیر زمین از امواج لرزه‌ای استفاده می‌کند. این روش به‌طور وسیع در علوم زمین و زمین‌شناسی مهندسی به کار می‌رود. زمان سیر امواج حاصل از چشمه لرزه‌ای که توسط گیرنده‌ها دریافت می‌شوند، برای مطالعه محدوده بین چشمه و گیرنده‌ها به کار می‌رود. این نوشتار، برداشت‌های توموگرافی انجام یافته در ساختگاه سد بختیاری را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف این بررسی، پیدا کردن زون‌های کم‌سرعتی است که منطبق با بخش‌های درزه‌دار با پتانسیل نشت در جناحین ساختگاه است. برای تجزیه و تحلیل داده‌های برداشت شده در سد بختیاری، تحلیل توموگرافی سه بعدی انجام شده است. توانایی تحلیل سه بعدی برای مقابله با مسئله عدم یکتایی جواب در داده‌های توموگرافی، یک برتری بسیار بالا به‌شمار می‌رود برای ردیابی پرتو و محاسبه زمان رسید در هر تکرار، از روش ارائه شده توسط Um (1987) & Thurber استفاده شده و عملیات وارون با استفاده از تکنیک SIRT صورت گرفته است. در این مطالعه، میانگین سرعت در بیشتر مقاطعی که برداشت توموگرافی در آنها انجام شده در حدود ۳ km/s به دست آمده است. با استناد به رابطه Barton (2006) می‌توان گفت که نفوذپذیری تکیه‌گاه‌های سد، در مجموع پایین است. در جناح راست و در افاق‌های بالاتر از ۶۹۰ متری، یک زون کم‌سرعت دیده می‌شود که نشان‌دهنده گسترش زون‌های ضعیف موجود در سطح تا این ژرفا است. با وجود حضور زون‌های ضعیف در برخی از توموگرام‌ها، کیفیت توده سنگ ساختگاه در مجموع خوب است و با طراحی پرده آب‌بند مناسب می‌توان از نشت آب از این زون‌ها جلوگیری کرد.

کلید واژه‌ها: توموگرافی لرزه‌ای، توموگرام، سد، نشت، لرزه‌نگاری، وارون‌سازی، لوژن، نفوذپذیری

E-mail: YSharghi@sut.ac.ir

*نویسنده مسئول: یوسف شرقی

۱- مقدمه

توموگرافی لرزه‌ای زمان سیر (Travel time tomography) یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده در علوم زمین و زمین‌شناسی مهندسی به کار می‌رود. این نوع توموگرافی بیشتر در مناطقی که دو چاه یادو گالری هم‌جوار در دسترس باشد برای تعیین ویژگی‌های مهندسی ساختگاه و کاربردهای ژئوتکنیکی (Angioni et al., 2003; Hyndman et al., 1996)، اکتشافات معدنی (Greenhalgh et al., 2003; Wong, 2000)، پیش‌بینی خطرات احتمالی معدنکاری (Hanson et al., 2002)، توصیف مخازن نفتی (Williams et al., 1997) و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در توموگرافی لرزه‌ای، هدف، تهیه یک نقشه دقیق از تغییرات سرعت زیرسطحی با استفاده از چشمه‌ها و گیرنده‌های سطحی و زیرسطحی است. این روش برای تکمیل داده‌های حفاری برای تفسیر مناطق پیچیده از نظر زمین‌شناسی و یا برای تعیین پراکندگی دقیق سازندهای ضعیف (کم‌سرعت) و قوی (پرسرعت) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این روش همچنین می‌تواند برای تعیین تغییرات زمانی در سرعت سازندها (به‌طور مثال برای ارزیابی مناطق سست در دیواره یک تونل، پیش و پس از حفاری) مورد استفاده قرار گیرد (Angioni et al., 2003). این روش دقت بالایی دارد و انتظار می‌رود در آینده نیز بهبود یابد.

برای بررسی پتانسیل نشت از پی و جناحین یک ساختگاه سد، باید میزان نفوذپذیری برجای آن را تعیین کرد. نفوذپذیری تأیید کننده آسانی جریان سیال در محیط متخلخل است که بیشتر، با افزایش تراکم و باز شدگی درزه‌ها افزایش می‌یابد. برای تعیین نفوذپذیری برجای توده سنگ بیشتر از آزمایش‌های لوژن استفاده می‌شود. اطلاعات به دست آمده از این آزمایش، تنها محدود به اطراف گمانه است. همچنین، چنانچه درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها به‌طور مؤثر توسط گمانه قطع نشوند، اطلاعات به دست آمده از درستی کافی برخوردار نخواهند بود. افزایش تراکم و باز شدگی درزه‌ها در توده سنگ، سرعت انتشار امواج لرزه‌ای را در آن کاهش می‌دهد. بنابراین، کاهش سرعت می‌تواند تأیید کننده افزایش نفوذپذیری و افزایش امکان نشت از ساختگاه، پس از آبگیری سد باشد. مطالعات لرزه‌ای توموگرافی

نسبت به آزمایش‌های لوژن، محدوده و حجم بیشتری را در بر می‌گیرند و هزینه آنها نیز به مراتب از هزینه‌های حفاری و آزمایش‌های لوژن کمتر است. بنابراین، پیش از اقدام به افزایش حفاری‌ها در منطقه و برای کسب اطلاعات کلی از وضعیت ساختگاه، بیشتر مطالعات توموگرافی در مراحل اولیه و با استفاده از حفاری‌های موجود صورت می‌گیرد. مطالعات مختلفی برای بررسی ارتباط بین عدد لوژن و سرعت انتشار موج در سنگ، صورت گرفته است. بررسی‌های انجام شده بر روی پی‌های سخت توسط Barton (2006)، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت امواج (V_p) در سنگ، مقادیر لوژن (L) به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند $L \approx 10^{(3.5-V_p)}$. بر اساس این رابطه، اگر V_p در یک توده سنگ، برابر ۲/۵ km/s باشد، مقدار لوژن حدود ۱۰ خواهد بود؛ این مقدار لوژن و مقادیر بالاتر، بیشتر نشان‌دهنده پتانسیل نشت بالا بوده و این مناطق در طراحی تزریق مورد توجه قرار می‌گیرند. این نوشتار، برداشت‌های توموگرافی انجام یافته در ساختگاه سد بختیاری را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از این سد، از توموگرافی سه بعدی که برتری‌های ویژه‌ای دارد، استفاده شده است. هدف از این بررسی، پیدا کردن مناطق کم‌سرعتی است که منطبق با بخش‌های درزه‌دار با پتانسیل نشت در جناحین ساختگاه است.

ساختگاه سد بختیاری در بخش پایین دست رودخانه بختیاری در استان لرستان و بخش جنوب باختری ایران در دامنه‌های جنوب باختری کوه‌های زاگرس چین‌خورده و در ۵ کیلومتری شمال باختر ایستگاه تنگ پنج در مسیر راه آهن تهران- اهواز قرار دارد. سد از نوع بتنی دو کماتی نازک و به بلندی ۳۳۰ متر از بستر رودخانه طراحی شده است که از نظر بلندی، بلندترین سد کماتی جهان به‌شمار می‌رود.

۲- مبانی نظری روش توموگرافی

توموگرافی برای ارایه تصویر، نیازمند مدل ریاضی برای یافتن متغیرهای مدل (مجهولات)

مستقیم یا به روزآوری اطلاعات زمان سیر در مرحله ردیابی پرتو (Ray tracing) است. به‌طور معمول، این مرحله از کار بیش از ۹۵ درصد زمان اجرای برنامه را به خود اختصاص می‌دهد (Bai & Greenhalgh, 2005). ردیابی پرتو، یک مسئله با دو مقدار مرزی است، نقاط پایانی مشخص هستند (موقعیت چشمه و گیرنده)، و مسیر انتشار و زمان بایستی تعیین شوند. روش‌های متداول زیادی برای ردیابی پرتو وجود دارد که همگی اصل فرما را تأمین می‌کنند. روش‌های ردیابی پرتو به انواع زیر دسته‌بندی می‌شوند: روش‌های تک نقطه (روش‌های پرتابی)، روش‌های دو نقطه (روش‌های انحنایی) و روش‌های میدانی (روش‌های شبکه) (Gheslaghi, 1997).

در روش‌های پرتابی، ابتدا یک مجموعه از زاویه‌های خروجی ممکن برای پرتو انتخاب می‌شوند. مسیر درست و مناسب موج با درون‌یابی مسیرهای انتخاب شده و طی یک فرایند تکرار تعیین می‌شود. این روش‌ها امواج سر (head wave) را در بر نمی‌گیرند و برای پرتوهای پراش و مناطق سایه قابل استفاده نیست (Gheslaghi, 1997). در روش‌های شبکه، ابتدا مجموعه‌ای از گره‌ها به داخل مدل سرعتی اختصاص داده می‌شود و سپس زمان سیر برای بخش‌های مختلف محاسبه می‌شود و در نهایت، با جستجوی گرافیکی بهترین مسیر تعیین می‌شود. عیب این روش‌ها این است که زاویه شکست ممکن است همزمان با زاویه برخورد تغییر پیدا نکند. همچنین، این روش‌ها زمان محاسبه و حافظه قابل توجهی را نیاز دارند (Gheslaghi, 1997).

روش‌های انحنایی همیشه به جوابی همگرا هستند و پرتوهای پراش یافته و پرتوهای مربوط به زون‌های سایه توسط آنها قابل ردیابی است. از میان روش‌های انحنایی موجود، الگوریتم ارائه شده توسط Um & Thurber (1987) دقت بالایی دارد و مسیر درست را با سرعت بیشتری نسبت به روش‌های معمول پرتو یابی پیدا می‌کند. با توجه به برتری‌های بالای الگوریتم Um & Thurber، در این مطالعه برای ردیابی پرتو و محاسبه زمان رسید در هر تکرار از این روش استفاده شده است.

۴- وارون‌سازی

در مرحله وارون‌سازی، هدف تعیین مقدار متغیرهای مدل S مطابق الگوریتم شکل ۲ است، به طوری که تا حد امکان داده‌های حاصل از مدل با داده‌های مشاهده شده اختلاف کمتری داشته باشند. حالت ایده آل، آن است که چون خود مسئله غیر خطی است، برای حل آن نیز از الگوریتم‌های غیر خطی استفاده شود.

برای حل مسایل غیر خطی، می‌توان از روش‌های وارون ماتریسی استفاده کرد. روش‌های ماتریسی متنوع بوده و از نظر محاسباتی، کارایی خوبی دارند با این حال، در این روش‌ها، میزان محاسبات بالا است و حافظه زیادی را می‌طلبند. با توجه به کارایی روش تفکیک مقادیر تکین (Singular Value Decomposition) در مواجهه با ماتریس‌های تکین یا تقریباً تکین، برای حل مسایل ماتریس کوچک یا متوسط این روش ترجیح داده می‌شود (Liu, 2005). مقادیر تکین کوچک می‌توانند خطاهای بزرگی در فرایند حل مسئله تولید کنند و موجب ناپایداری جواب شوند. با به کارگیری شیوه‌های متفاوت تنظیم (regularization)، متغیرهایی به مسئله اضافه می‌کنند تا بدین صورت، بد شرطی (ill condition) مسئله را کاهش دهند (Li, 2005).

برای دستگاه معادلات خطی با ماتریس‌های بزرگ مانند معادله $LS=At$ برای پرهیز از مسایل مربوط به ماتریس‌های تکین به‌ندرت از محاسبات ماتریسی استفاده می‌شود. در این گونه مسایل، الگوریتم‌های تکراری همچون روش بازسازی جبری (ART) یا روش بازسازی جبری همزمان (SIRT) کارایی خوبی دارند. این روش‌ها سریع، قوی و انعطاف پذیر (Gu et al., 2006) و از نقطه نظر پردازش و ذخیره اطلاعات قابل اجرا و بسیار مؤثر هستند و همچنین مطابقت خوبی با مسایل غیرخطی دارند (Santamarina & Fratta, 2005).

این مدل ریاضی بیانگر ارتباط بین داده‌ها و مجهولات است. از آنجا که اندازه‌گیری‌های انجام شده بیشتر گسسته هستند، بنابراین حل آنها مستلزم گسسته‌سازی مدل ریاضی است. مرسوم‌ترین گسسته‌سازی مدل در توموگرافی لرزه‌ای، تقریب زمین پیوسته با بلوک‌هایی با سرعت (کندی) ثابت است (شکل ۱). روش‌های توموگرافی برای شروع محاسبه نیازمند یک برآورد اولیه برای متغیرهای مدل هستند. با به کارگیری برآورد اولیه برای متغیرهای مدل، از راه محاسبات مستقیم (Forward calculation) و روش‌های ردیابی مسیر پرتو، اولین سری از داده‌های زمان اولین رسید محاسبه می‌شوند. فرض کنید t_1, t_2, \dots, t_m یک مجموعه از زمان‌های مشاهده شده برای m زوج چشمه-گیرنده در یک محیط با کندی تعریف شده توسط $s(x)$ باشد؛ اگر π مسیر انتشار موج i امین زوج چشمه و گیرنده باشد، با صرف نظر کردن از خطای مشاهده‌ای می‌توان نوشت

$$\int_{p_i} s(x) dl = t_i \quad i=1, \dots, m \quad (1)$$

در رابطه غیرخطی (۱) برای یک مدل بلوک‌بندی شده، اگر l_{ij} طول مسیری i ام در سلول j ام باشد، به‌صورت زیر خواهد بود

$$l_{ij} = \int_{p_i \cap cell_j} dl \quad (2)$$

برای مدلی با n سلول رابطه (۱) را در شکل گسسته‌اش می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\sum_{j=1}^n l_{ij} s_j = t_i \quad i=1, \dots, m \quad (3)$$

با تعریف بردارهای ستونی s و t و ماتریس L رابطه (۳) را می‌توان به صورت ماتریس زیر بازنویسی کرد.

$$LS = t \quad (4)$$

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \dots & l_{mn} \end{pmatrix}, \quad t = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_m \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix}$$

در ادامه، با انتخاب یکی از روش‌های وارون، مقادیر متغیرهای مدل، طی یک فرایند تکراری آن چنان نسبت به برآورد اولیه بهبود می‌یابد که همخوانی بهتری با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشند.

در این مطالعه، برای انجام توموگرافی از وارون غیرخطی استفاده شده است. در وارون‌سازی غیر خطی فقط t مشخص است (همراه با موقعیت چشمه‌ها و گیرنده‌ها) و هدف به‌دست آوردن s و در خیلی از موارد L است. در اینگونه مسایل وابستگی مسیر پرتو به تغییرات کندی محیط به شدت در طراحی الگوریتم وارون تأثیر می‌گذارد. روش غیر خطی، بیشتر برای حل مسایلی با تغییرات کندی شدید در ناحیه مورد مطالعه، به کار می‌رود. در چنین محیط‌هایی، مسیر پرتو، خطوطی با انحنای خیلی زیاد خواهند بود. در وارون‌سازی خطی، مقادیر t و L معلوم بوده و هدف تعیین s است. فرضی که در حالت خطی به کار می‌رود این است که مسیر پرتو از پیش مشخص است و بیشتر، مسیر پرتو را خطوط مستقیمی که چشمه و گیرنده را به هم وصل می‌کنند، در نظر می‌گیرند (Golami, 2005).

در وارون‌سازی غیر خطی بیشتر، یک الگوریتم بازگشتی برای یافتن جواب تقریبی s نیاز است. ساختار پایه چنین الگوریتمی در شکل ۲ نشان داده شده است. این الگوریتم برای مدل‌هایی با اختلاف کندی کم به یک نتیجه مطلوب همگرا خواهد شد.

۳- ردیابی پرتو

مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین بخش محاسباتی در توموگرافی زمان سیر، بخش محاسبات

است. در سمت شمال خاوری تاقدیس سیاه کوه که تحت تأثیر گسل F1 قرار گرفته است، بخشی از لایه‌های SV3 که بی‌فاصله زیر گسل قرار دارند، به شدت چین خورده و چین‌های زیگ‌زاگ تقریباً همگنی را تشکیل داده‌اند. این زون‌ها به صورت نواحی با چین‌خوردگی جناغی (Chevron fold zone) در روی نقشه‌های زمین‌شناسی نشان داده شده‌اند (شکل ۶). در هسته تاقدیس سیاه کوه سه زون شکنجی (Kink Band) در داخل لایه‌های واحدهای SV2 و SV3 در دو طرف دره دیده می‌شود. زون‌های شکنجی آشفته در هسته تاقدیس سیاهکوه به احتمال زیاد در هنگام چین‌خوردگی ساختار تاقدیسی و به دلیل نبود فضای کافی برای جابه‌جایی لایه‌ها در هسته تاقدیس ایجاد شده‌اند. با توجه به خردشدگی و شکستگی‌های موجود آمده در این زون‌ها، این بخش‌ها، به‌عنوان مناطق ضعیف و مستعد نشت پس از احداث سد شناخته شده‌اند. واحد SV4 و SV5 این دو واحد از آهک‌های متوسط تا سبتر لایه حاوی گرهک (نودول)‌های سیلیسی تشکیل شده است.

از نظر عوارض ساختمانی، زمین ساخت شدید در محدوده طرح، موجب توسعه و گسترش انواع چین‌ها از جمله چین‌خوردگی‌های جناغی و چین‌خوردگی‌های شکنجی، گسل‌های متعدد و پیدایش چندین دسته درزه (سه دسته درزه اصلی و تعدادی درزه‌های تصادفی) شده است (Dietler et al., 2008). واحد SV6 و SV7 این دو واحد از لایه‌های سبتر آهک و آهک‌های مارنی با میان لایه‌های نازک مارنی تشکیل شده‌اند (شکل ۳).

۶- داده‌برداری لرزه‌ای

برداشت‌های توموگرافی در محدوده محور سد، در دو تکیه‌گاه چپ و راست اجرا شده است. از ۱۱ برداشت توموگرافی لرزه‌ای، ۵ مقطع در تکیه‌گاه چپ و ۶ مقطع در تکیه‌گاه راست واقع شده است. داده‌برداری به‌صورت ترکیبی از برداشت‌های گالری به گالری با منبع انفجاری و در درون خود گالری‌ها (در مقطع افقی) با منبع چکش، اجرا شده است. شکل ۴، موقعیت گالری‌های چشمه و گیرنده‌رادر تعدادی از این برداشت‌ها نشان می‌دهد. هدف از انجام مطالعه، بیشتر تعیین ساختار سرعتی محدوده بین گالری‌ها برای شناسایی وضعیت کلی توده‌سنگ و تعیین موقعیت و نحوه گسترش زون‌های ضعیف بوده است. با توجه به موقعیت نسبی گالری‌ها با یکدیگر، از توموگرافی سه بعدی استفاده شده است. در این روش، توانایی تحلیل سه بعدی داده‌ها برای مقابله با مسئله عدم یکتایی جواب در داده‌های توموگرافی، یک برتری بسیار بالا به شمار می‌رود.

۷- نتایج و بحث

با توجه به اینکه ارایه تصویر توموگرافی مربوط به تمام مقاطع برداشت شده در این مقاله با توجه به حجم آنها امکان‌پذیر نیست، فقط ۳ مقطع از جناحین تکیه‌گاه برای توصیف کلی ساختار آورده شده است. در تصاویر سه‌بعدی در بلوک‌هایی که پرتو موج از آنها عبور نکرده است، از مقدار میانگین سرعت انتشار موج (حاصل از زمان سیر میانگین زوج چشمه و گیرنده‌ها) استفاده شده است.

از آنجا که ترکیب سنگی منطقه، بیشتر، از سنگ آهک و یا ترکیبات نزدیک به آن تشکیل شده است، بنابراین، سرعت سیر موج در واحدهای مختلف، مشابه هم خواهد بود. آزمایش‌های انجام شده برای تعیین سرعت موج P در نمونه‌های متعدد، نشان می‌دهد سرعت میانگین ماده سنگ (سنگ بدون درزه) در واحدهای مختلف سازند سروک نزدیک به ۶/۱ km/s است (Dietler et al., 2008). همچنین مطالعات زمین‌آب‌شناسی انجام شده و مشاهداتی که از گالری‌ها، گمانه‌های اکتشافی و رخنمون‌های سطحی صورت گرفته است، هیچ‌گونه پدیده کارستی را نشان نمی‌دهد. بنابراین با توجه به وضعیت

مبنای روش‌های تکراری، روش Kaczmarz solution در حل معادلات خطی است که در آنها ویژگی‌های ماتریس‌های پراکنده به کار گرفته می‌شوند. در این روش‌ها، محاسبات ماتریسی به صورت ردیف به ردیف انجام می‌گیرند و احتیاجی به ذخیره کردن کلیه عناصر ماتریس نیست.

- حل مسئله وارون به روش SIRT توسط الگوریتمی با ترتیب زیر صورت می‌گیرد.
- ردیابی پرتو (با استفاده از روش‌های موجود مثل روش Um و Thurber).
- محاسبه طول قطعات پرتو در سلول‌هایی که پرتو ارسالی از فرستنده به گیرنده از آنها عبور می‌کند.
- محاسبه زمان باقی مانده برای پرتو (زمان مشاهده شده منهای زمان محاسبه شده). با استفاده از وضعیت پراکندگی کندی در محیط و ذخیره کردن نتایج.
- تکرار مراحل ۱ تا ۳ برای همه پرتوها.
- اصلاح کندی هر سلول با در نظر گرفتن همه پرتوهای عبوری (تفاوت و برتری آن نسبت به روش ART)
- تکرار مرحله ۱ تا ۵ تا زمانی که مقدار باقی مانده از یک مقدار قابل قبول که در مرحله پیشین به دست آمده کمتر باشد.
- اصلاح کندی هر سلول در مرحله ۵ با استفاده از معادله زیر صورت می‌گیرد.

$$s_j^{(k+1)} = s_j^{(k)} + \frac{\sum_i^M (e_i)^{(k)} l_{i,j}}{\sum_i^N (l_{i,j})^2 + \sum_i^M l_{i,j}} \quad (5)$$

M تعداد معادلات (یا تعداد پرتوها)، N تعداد متغیرها (یا تعداد سلول‌ها)، $s_j^{(k)}$ کندی سلول j ام بعد از k امین تکرار، i شماره پرتو، j شماره سلول، k شماره تکرار، $(e_i)^{(k)}$ میزان خطا مربوط به i امین اندازه‌گیری (پرتو) پس از k امین تکرار است (Santamarina & Fratta, 2005).

به‌تازگی تلاش‌هایی برای استفاده از روش‌های تبدیلی، منطق فازی (Santamarina & Fratta, 2005)، الگوریتم ژنتیک (Boschetti et al. 1996)؛ شبکه‌های عصبی (Bachkar et al. 1998؛ Baan & Jutten, 2000) و روش‌های زمین‌آماری (Hansen et al., 2006) در حل مسائل وارون توموگرافی صورت گرفته است، با این حال، هنوز این روش‌ها معمول نشده‌اند. با توجه به برتری‌های روش‌های تکراری و سادگی اجرای آنها، در این مطالعه انجام عملیات وارون در هر تکرار با استفاده از روش SIRT صورت گرفته است.

۵- زمین‌شناسی ساختار سد

محل سد بختیاری در زون زاگرس چین‌خورده و در بخش جنوب باختری این زون قرار گرفته است. توالی سنگ‌شناسی منطقه، شامل سازندهای وابسته به کرتاسه تا میوسن است. دو سازند گرو (GR) و سازند سروک در محل احداث سد واقع شده‌اند. سازند گرو در بالا دست تنگه رخنمون داشته ولی در دره محل سد دیده نمی‌شود. سازند سروک را در ساختار سد بختیاری به ۷ گروه تقسیم‌بندی کرده‌اند که شامل واحدهای زیر است (Dietler et al., 2008).

واحد SV1- این واحد در محل پی سد و در محل نیروگاه سد نیز هیچ رخنمونی ندارد. رسوبات SV1 از میان‌لایه‌ای از آهک‌های مارنی متوسط تا سبتر لایه و مارن‌های ریز لایه و شیل تشکیل شده است.

واحد SV2- بخش بالایی SV2 به صورت هسته مرکزی تاقدیس سیاه کوه رخنمون داشته و بخش مرکزی سد طراحی شده روی آن قرار می‌گیرد. SV2 از آهک‌های مارنی با میان‌لایه‌های نازک از مارن و شیل تشکیل شده است. واحد SV3- این واحد از میان‌لایه‌های آهک مارنی و آهک سیلیسی تشکیل شده

نشان‌دهنده این است که در مقایسه با دیگر بخش‌های ساختمانه، این بخش بسیار ضعیف و مستعد گذردهی بالای آب است. برداشت ناپیوستگی هادر دو گالری بالا، درزه‌هایی را تراکم بالا در آنها نشان می‌دهد. که تأیید کننده حضور زون شکنجی (Kink zone) هستند. بنابراین گسترش زون شکنجی در ژرفا و در بین این دو گالری با استفاده از نتایج توموگرافی تأیید می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

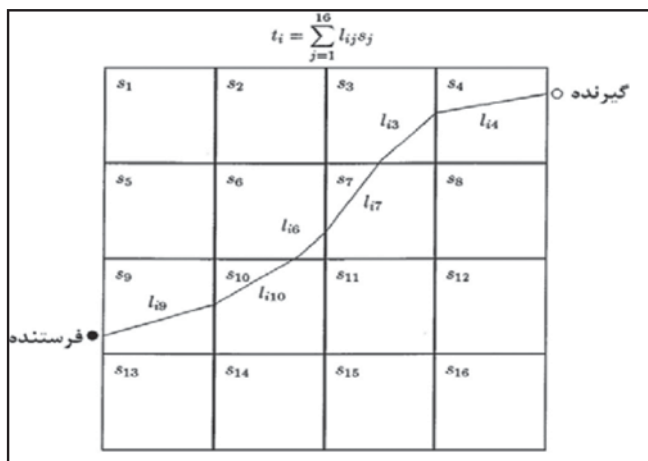
میانگین سرعت در بیشتر برش‌هایی که برداشت توموگرافی در آنها انجام شده در حدود ۳ km/s به دست آمده است. با توجه به بررسی‌های Barton، در مورد ارتباط بین سرعت و عدد لوژن، این مقدار معادل با لوژن‌های پایین و در حدود ۳ است. این مقدار نشان می‌دهد که نفوذپذیری برجای تکیه‌گاه‌های سد در مجموع پایین است. با توجه به ناپیوستگی‌های متعدد و زون‌های خرد شده ناشی از چین خوردگی در محل ساختمانه، احتمال نشت در برخی بخش‌ها وجود دارد که در برش‌های توموگرافی، این بخش‌ها با سرعت پایین خود را نشان داده‌اند.

در جناح راست و در افق‌های بالاتر از ۶۹۰ متری، میانگین سرعت در حدود ۲ km/s حاصل شده است که نشان‌دهنده حضور زونی بسیار ضعیف است و این بخش در مقایسه با کل ساختمانه، پتانسیل نشت بسیار بالایی دارد. با توجه به تراکم درزه‌ها در دو گالری GR2 و GR3 و نتایج به دست آمده از توموگرافی گسترش زون شکنجی در ژرفا تا بالای گالری GR2 تأیید می‌شود.

سرعت‌های به دست آمده از توموگرافی با مقادیر لوژن که از گمانه‌ها به دست آمده است، انطباق خوبی با هم دارند. بنابراین، از تصاویر توموگرافی می‌توان در طراحی پرده آب‌بند بهره گرفت. همچنین با توجه به مشخص بودن محل زون‌های ضعیف روی این تصاویر، می‌توان از آنها به منظور محل‌یابی گمانه‌های اکتشافی جدید و شیب و آزیموت حفر آنها استفاده کرد.

۹- سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانم از شرکت‌های محترم آب نیرو، صحراکاو، مشایر (طرح بختیاری) و بویژه آقایان مهندس موسوی و مهندس هفتانی که امکانات و اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش را فراهم کرده‌اند تشکر کنم. همچنین از آقای علی غلامی دانشجوی دکتری موسسه ژئوفیزیک که در ابتدای کار، مطالب ارزشمندی را در اختیار اینجانب قرار دادند، نهایت سپاس را دارم.

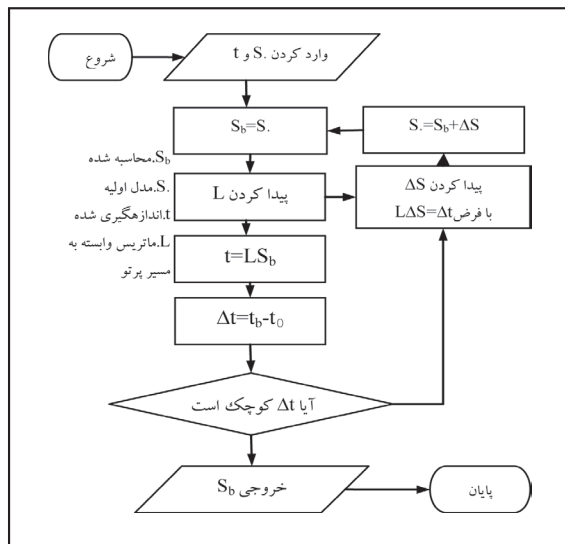


شکل ۱- توصیف نمادینی از مسیرهای پرتو لرزه‌ای از میان یک مدل گسسته با میزان کندی‌های ثابت در سلول‌ها (Berryman, 2000).

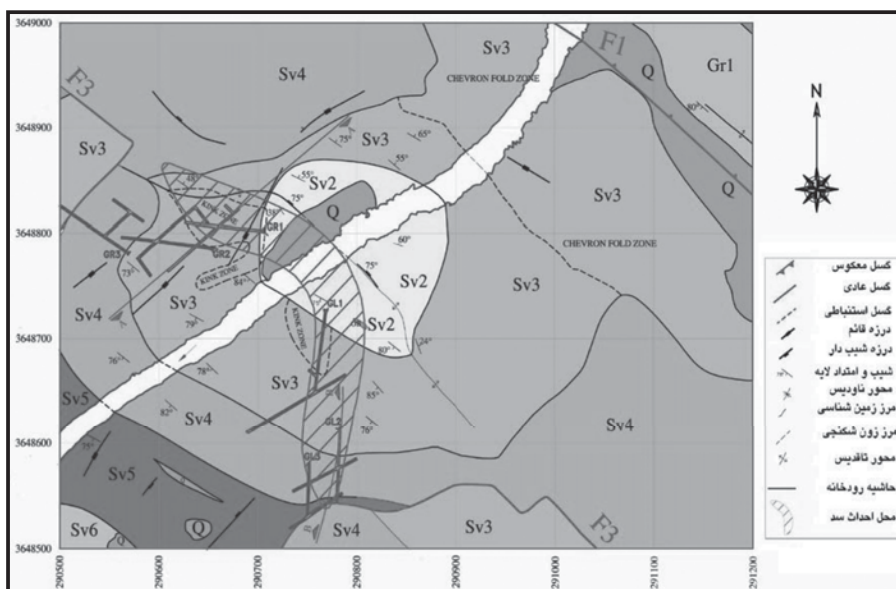
زمین‌شناسی ساختمانی محل احداث سد می‌توان گفت محتمل‌ترین عامل در کاهش سرعت امواج P در بخش‌های مختلف، حضور زون‌های ضعیف مثل سطوح لایه‌بندی، درزه‌ها، زون‌های گسلی و زون‌های خرد شده ناشی از عملکرد چین خوردگی بوده است. شکل ۵، تصویر سه بعدی توزیع سرعت بین دو گالری GL2-GL3 مربوط به جناح چپ ساختمانه را نشان می‌دهد. میانگین سرعت در این بخش از ساختمانه در حدود ۳ km/s است. برش زمین‌شناسی رسم شده در امتداد محور سد که بخشی از آن از بالای گالری GL2 عبور می‌کند، در شکل ۶ نشان داده شده است. برش مربوط به ورودی گالری GL3 در شکل دیده نمی‌شود که دلیل آن، قرار نداشتن این گالری در برش زمین‌شناسی رسم شده است. پدیده‌های زمین‌شناسی موجود در این برش شامل حضور بخشی از واحدهای SV3 و SV4، مرز میان دو واحد و حضور درزه‌هایی است که تقریباً با روند قائم مشاهده می‌شوند. برای مقایسه مقادیر سرعت به دست آمده از توموگرافی با برش‌های زمین‌شناسی، مقطع سرعت بین دو گالری GL2-GL3 از تصویر سه بعدی سرعت استخراج شده است (شکل ۷). بخش‌های با سرعت کم، که روند آنها با یک خط چین، نشان داده شده است تقریباً منطبق با مرز دو واحد SV3 و SV4 در برش زمین‌شناسی است. بررسی مرز این دو واحد در گمانه‌های اکتشافی که آزمایش لوژن در آنها انجام شده است نشان می‌دهد که مقادیر لوژن در هنگام رسیدن به این مرز، افزایش قابل توجهی می‌یابد (Dietler et al., 2008). افزایش مقادیر لوژن در این مرز، تأیید کننده حضور ناحیه‌ای با تخلخل بالا و نامتراکم است و همین امر، باعث کاهش سرعت در این بخش شده است. افزون بر روند سرعتی اشاره شده، تغییرات دیگری نیز در مقاطع سرعت مربوط به برداشت توموگرافی بین GL2-GL3 مشاهده می‌شود. که می‌توان آنها را به حضور زون‌های ضعیف در بین دو گالری نسبت داد. برای نمونه، برداشت زمین‌شناسی گالری GL2 یک زون گسسه به سبب برای حدود نیم متر را در فاصله ۲۰ متری از دهانه ورودی مشخص کرده است (Dietler et al., 2008) که در مقاطع سرعت این بخش با افت شدید سرعت همراه است، محل این زون در شکل ۷، با نقطه چین نشان داده شده است. شکل ۸ پراکنندگی سرعت در مقطع بین دو گالری GR1-GR2 را نشان می‌دهد. این دو گالری در امتداد تقریبی N45E حفر شده‌اند. گالری GR1 در افق ۵۶۰ متری و گالری GR2 در افق ۶۹۴ متری قرار دارد. برای مقایسه نتایج به دست آمده از سرعت با وضعیت زمین‌شناسی بخش مورد مطالعه، برش زمین‌شناسی قائم در امتداد گالری GR1 تهیه شده است (شکل ۹).

برای مقایسه سریع، بخش‌های مختلف مقطع مورد مطالعه روی هر دو شکل، با حروف A، B، C و D مشخص شده است. میانگین سرعت در این مقطع، حدود ۳ km/s به دست آمده که در مقایسه با برش‌های دیگر، بیشتر است. این سرعت، بر اساس نظر (Barton, 2006)، منطبق با لوژن‌های پایین بوده و تأیید کننده نفوذپذیری کم است. در بخش‌هایی از این مقطع، مقادیر سرعت کاهش یافته است (زون‌های A و B در شکل ۸). در شکل ۹، این زون‌ها با لوژن‌های بالا دیده می‌شوند؛ این افزایش نفوذپذیری و کاهش سرعت، احتمالاً به دلیل افزایش تراکم ناپیوستگی‌ها در این بخش است. در زون C روند وارون دیده می‌شود؛ سرعت در این زون افزایش یافته و به بیش از ۴ km/s رسیده است. آزمایش فشار آب در این زون، آبخوری بسیار پایینی را نشان می‌دهد. در زون D، سرعت انتشار موج، دوباره کاهش می‌یابد که علت آن نزدیکی به محور چین و قرار گرفتن در زون شکنجی (Kink Zone) است.

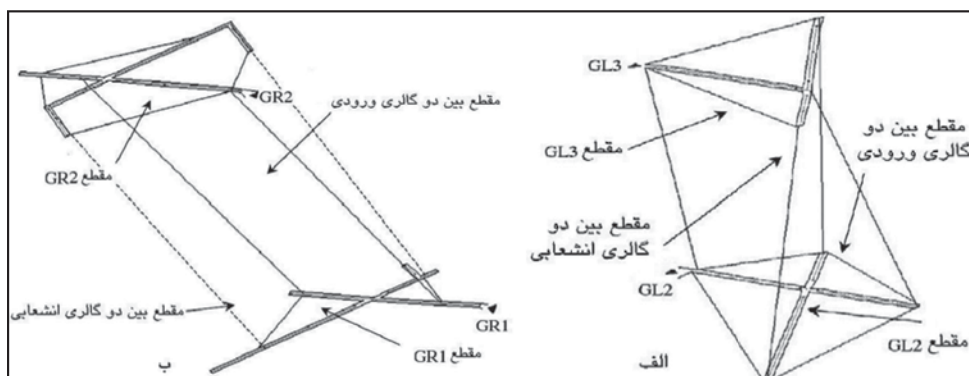
برای کنترل وضعیت زون‌های بالاتر، برداشت توموگرافی بین دو گالری GR2-GR3 نیز انجام شده است (شکل ۱۰). GR2 در افق ۶۹۴ متری و گالری GR3 در افق ۷۵۳ متری قرار گرفته است. سرعت میانگین بین دو گالری در حدود ۲ km/s به دست آمده است و زون‌های ضعیفی با سرعت نزدیک به ۱/۲ km/s در آن دیده می‌شود. پایین بودن میانگین سرعت،



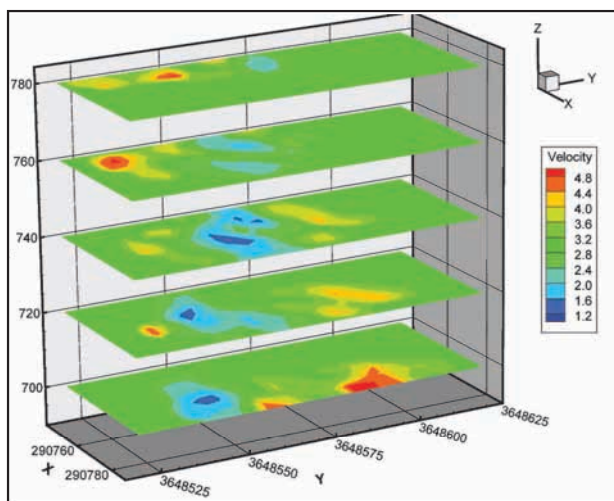
شکل ۲- الگوریتم بازگشتی برای وارون سازی زمان سیر (Berryman, 1991).



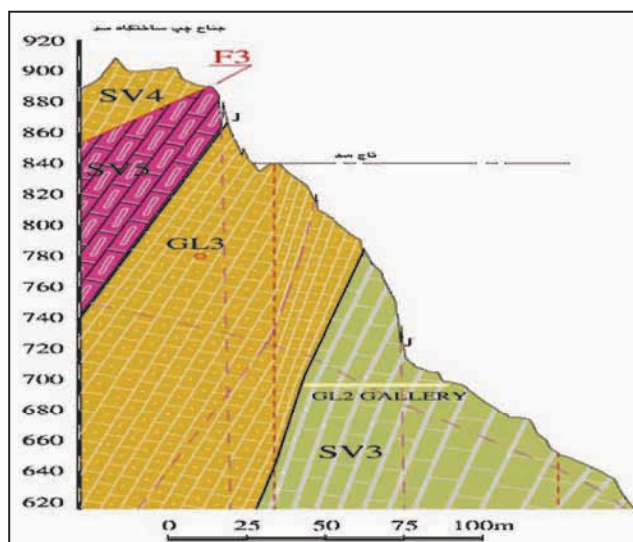
شکل ۳- نقشه زمین شناسی ساختگاه سد بختیاری، با تغییر از (Dietler et al., 2008).



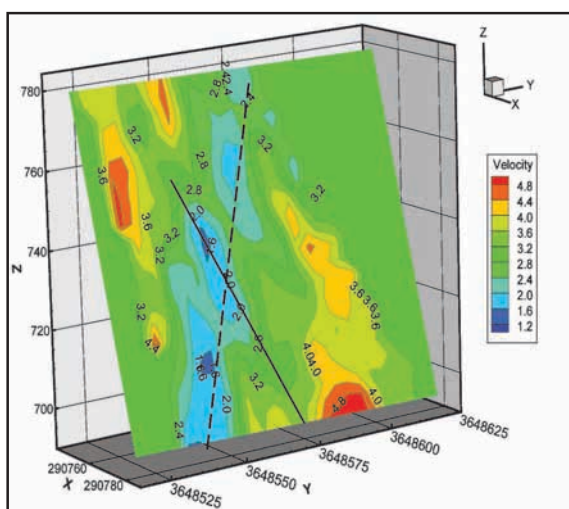
شکل ۴- موقعیت و محل قرارگیری گالری ها و مقاطع توموگرافی انجام شده (الف) در تکیه گاه چپ و (ب) و تکیه گاه راست ساختگاه سد بختیاری (Nicksiar et al., 2007).



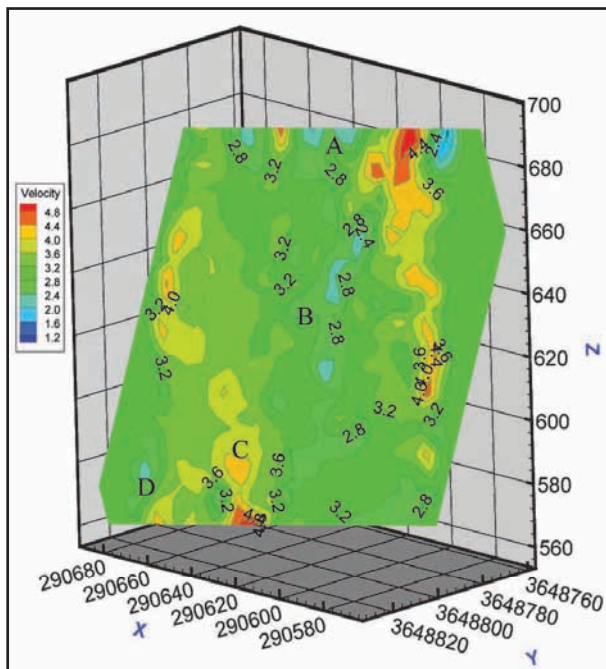
شکل ۵- تصویر سه بعدی توزیع سرعت حاصل از توموگرافی بین دو گالری GL2-GL3



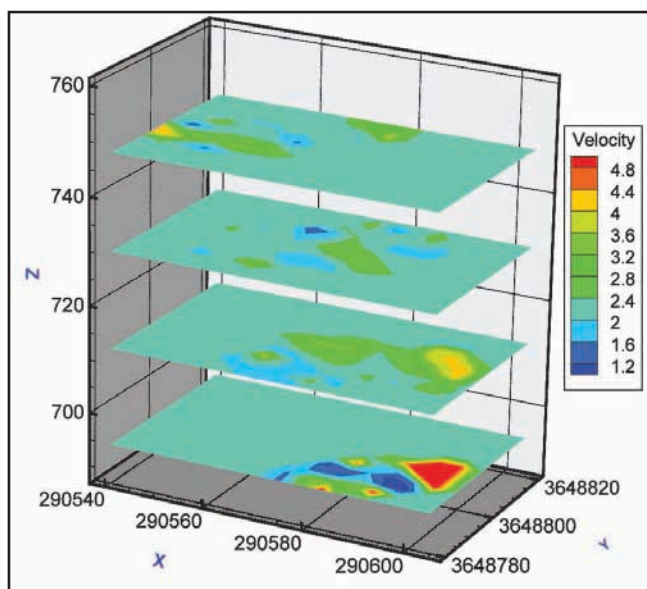
شکل ۶- برش زمین‌شناسی در امتداد B-B روی نقشه زمین‌شناسی



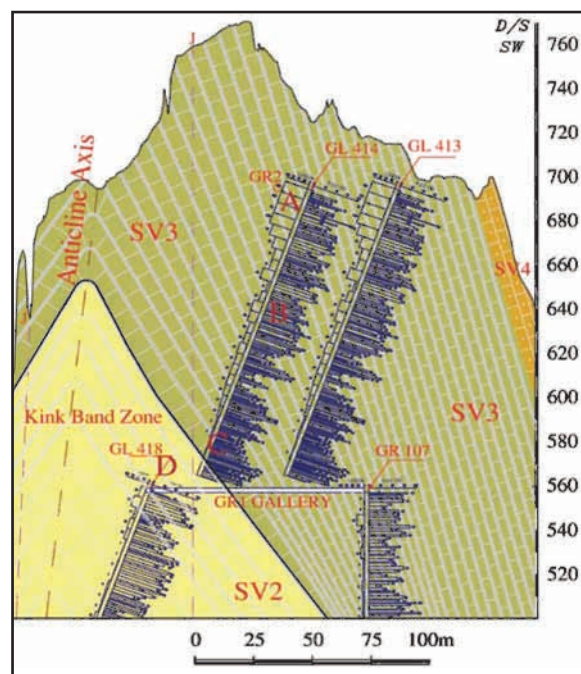
شکل ۷- مقطع توزیع سرعت حاصل از توموگرافی بین دو گالری GL2-GL3



شکل ۸- مقطع توزیع سرعت حاصل از توموگرافی بین دو گالری GR1-GR2



شکل ۱۰- تصویر سه بعدی توزیع سرعت حاصل از توموگرافی بین دو گالری GR2-GR3



شکل ۹- برش زمین‌شناسی در امتداد موازی با شاخه اصلی گالری GR1 (امتداد A-A روی نقشه زمین‌شناسی)

References

Angioni, T., Rechten, R. D., Cardimono, S. J. & Luna, R., 2003- Crosshole seismic tomography and borehole logging for engineering site characterization in Sikeston, MO, USA, *Tectonophysics*, vol. 368, P.P.119 – 137.

Baan, M. V. & Jutten, J., 2000- Neural networks in geophysical applications, *Geophysics*, vol. 65, NO. 4, P.P. 1032–1047.

Bai, C. & Greenhalgh, S., 2005- 3-D Non-linear travel-time tomography: imaging high contrast velocity anomalies, *Pure and Applied Geophysics*, vol.162, P.P. 2029–2049.

Barton, N., 2006 - Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, First Edition Taylor & Francis.

- Berryman, J. G., 2000- Analysis of approximate inverses in tomography: I. Resolution analysis of common inverses , Optimization and Engineering, vol. 1, 87–115.
- Berryman, J. G., 1991- Lecture notes on nonlinear traveltimes and tomography, Earth resources laboratory, Massachusetts Institute of Technology, University of California.
- Bichkar, R. S., Singh, S. K. , Ray, A. K., 1998- Genetic algorithmic approach to the detection of subsurface voids in cross-hole seismic tomography , Pattern Recognition Letters vol. 19, P.P. 527–536.
- Boschetti, F. , Dentith, M. C. & List, R. D., 1996- Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms , Geophysics, vol. 61, NO. 6, p.p 1715–1727.
- Dietler, Th. , Malekzadeh, L. , Binazadeh, K. H. & Novin, H., 2008- Bakhtiari dam and hydrolic power project ,Geological report, Iran Water and Power Resources Development Co (IWPC) Authority.
- Friedel, M. J. , Jackson, M. J. , Williams, E. M. , Olson, M. S. & Westman, E., 1996- Tomographic imaging of coal pillar conditions: Observations and implications , International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 33(3), P.P. 279–290.
- Gheshlaghi, F., 1997- Tomographic imaging in civil engineering infrastructure, PH.D. Thesis university of waterloo.
- Golami, A., 2005- Nonlinear travel time tomography, Institute of geophysics university of Tehran (in Persian).
- Greenhalgh, S., Zhou, B. & Cao, S., 2003- Crosswell seismic experiment for nickel sulphide exploration, Journal of Applied Geophysics 53, P.P. 77– 89.
- Gu, H., Cai, C. & Wang, Y., 2006- Investigation of Fractures Using Seismic Computerized Crosshole Tomography, JEEG, vol. 11, Issue 2, P.P 143–150.
- Hansen, T. M. , Journel, A. J. , Tarantola, A. & Mosegaard, K. , 2006- Linear inverse Gaussian theory and geostatistics, Geophysics, vol. 71, NO. 6, P.P. R101–R111.
- Hanson, D. R., Vandegrift, T. L. , Demarco, M. J. & Hanna, K., 2002- Advanced techniques in site characterization and mining hazard detection for the underground coal industry , Int. J. Coal Geol., vol. 50, P.P. 275–301.
- Hyndman, D. W. & Harris, J. M., 1996- Traveltimes inversion for the geometry of aquifer lithologie , Geophysics, Vol. 61, Issue 6, pp. 1728-1737.
- Li, C., 2005- Seismic tomography with non-uniform ray coverage and autoregressive extrapolation, Ph.D. thesis, Purdue University, 213 pages; AAT 3185792.
- Liu, J., 2005- Nonlinear seismic tomography and model uncertainty estimation with the Markov Chain Monte Carlo method , Ph.D. thesis, Purdue University, 161 pages; AAT 3210741.
- Nicksiar, M. , Esfandiary, M., Mehinrad, A. & Binazadeh, K., 2007- Application of Seismic Tomography for detecting potential seepage paths in Bakhtyari dam, Iran , Int J Rock Mech Mining Sci, vol. 44.
- Santamarina, J. C. & Fratta, D., 2005- Discrete signals and inverse problems: An introduction for engineers and scientists, First Edition, Wiley.
- Um, J. & Thurber, C., 1987- A fast algorithm for two-point seismic ray tracing , Bull. Seismol. Soc. Am., vol. 77, P.P. 972-986.
- Williams, M. C. , Leighton, V. L. , Vassiliou, A. A. , Tan, H. & Nemeth, T., 1997- Crosswell seismic imaging: A technology whose time has come? , The Leading Edge, vol. 16, Issue 3, P.P. 285-291.
- Wong, J., 2000- Crosshole seismic imaging for sulfide orebody delineation near Sudbury, Ontario, Canada , Geophysics, Vol. 65, Issue 6, pp. 1900-1907.