بررسی تنش‌های وارده بر خاک و نشست احتمالی پایه‌های پل با استفاده از لرزه‌نگاری و توموگرافی ژئوالکتریکی

لطیف صمدی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین

تاریخ: دریافت ۹۴/۱۱/۲۳ پذیرش ۹۵/۰۶/۱۴

چکیده

در این تحقیق از روش‌های لرزه‌ای، چاهک و توموگرافی ژئوالکتریکی برای تخمین استحکام، دورهٔ طبیعی، لایه‌بندی و تغییرات مقاومت الکتریکی خاک در محل پایه‌های پل استفاده شده است. این پل در رسوبات آبرفتی احداث شده است. این تحقیق نشان می‌دهد: ۱. متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر در محل پایهٔ غربی ($\overline{V}_{S30} = 774$) بیش‌تر از پایهٔ شرقی ($\overline{V}_{S30} = 540$) است. ۲. نتایج چاهک الکتریکی وجود لایهٔ سیلتی و رسی را در محل پایهٔ شرقی پل تأیید می‌کند. ۳. نقشه توزیع مقاومت الکتریکی در امتداد محور پل که از محل پایه‌های میانی می‌گذرد نامتقارن بوده است و تغییرات جانبی در ساختار خاک و تنش وارده را نشان می‌دهد. توزیع نامتقارن تنش با در نظر گرفتن نتایج به‌دست آمده و گذر رودخانه می‌تواند نتیجه نشست تدریجی خاک زیر پایهٔ میانی و شرقی پل در طول بهره‌برداری و عامل ایجاد ترک‌های ظاهر شده در عرشهٔ پل باشد.

واژه های کلیدی: پل، لرزه‌نگاری، چاهک الکتریکی- توموگرافی ژئو الکتریکی، نشست خاک

*نویسنده مسئول samadi@khu.ac.ir

مقدمه

امروزه حفظ زیرساخت‌های شهری و بناهای تاریخی به‌دلیل عوامل تهدید کننده طبیعی و انسانی اهمیت زیادی دارد. بلایای طبیعی (سیل، زلزله، طوفان، گردباد، سونامی و موارد متعدد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

دیگر)، شرایط بهره‌برداری نامناسب و ساخت سدها و تأسیسات آبی در حریم بناهای تاریخی می‌توانند از عواملی تهدیدکننده بناهای تاریخی باشند. کشور ما یکی از مناطق زلزله‌خیز دنیا است و بناهای تاریخی زیادی در اثر زمین‌لرزه‌های مختلف آسیب دیده و یا به‌کلی از بین رفته‌اند. ارگ قدیم بم با ۲۵۰۰ سال قدمت که بزرگ‌ترین سازهٔ گلی جهان بود، نمونه‌ای از میراث فرهنگی است که در زمین‌لرزهٔ دی‌ماه ۱۳۸۲ به‌کلی تخریب شد. برخی پل‌ها نظیر پل معلق که در این مقاله بحث می‌شود قدمت تاریخی دارند و بهره‌برداری نامناسب و شناخت زمین‌شناسی زیرسطحی آن‌ها تهدید جدی در حفظ و نگه‌داری آن‌ها برای نسل‌های بعدی است. در بسیاری از شهرهای بزرگ برای حل مشکل تردد وسائط نقلیه بیش از صدها و شاید هزاران پل احداث شده است. ساخت این پل‌ها هر چند از نظر فنی، طراحی و اجرا برای متخصصان مشکل نیست، اما شرایط استفاده از آن‌ها در مدت بهره‌برداری می‌تواند در حفظ پایداری، افزایش عمرمفید، و در دراز مدت در حفظ منابع مالی مؤثر باشد. الگوی بررسی پل معلق که در این مقاله به آن پرداخته شده است از جملهٔ راهکارهایی است که در شرایط مشابه می‌تواند به‌کار رود.

امروزه به‌دلیل توسعهٔ شهری و تردد وسایط نقلیه بی‌شمار، بررسی رفتار خاک در مقابل سیکل‌های بارگذاری و شرایط دینامیکی برای ارتعاشات پایه‌های پل‌ها و تأمل آن‌ها با خاک اهمیت زیادی دارد. برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک قبل و بعد از ساخت بناها از تست‌های آزمایشگاهی و در جا استفاده می‌شود. از روش‌های درجا می‌توان به‌روش‌های لرزه‌ای شکست مرزی[۱]، روش بازتابی، پاشش موج سطحی، روش‌های درون چاهی، روش بین چاهی، روش‌های ژئوالکتریکی و دیگر روش‌های ژئوفیزیکی اشاره کرد. در لرزه‌شناسی و زلزله‌شناسی رابطهٔ بین سرعت امواج لرزه‌ای و تنش‌های وارده بر خاک از دیر باز مورد توجه لرزه شناسان و زلزله شناسان بوده است. امروزه در لرزه‌شناسی نفتی از ارتباط بین تنش موجود در طبقات زمین و سرعت امواج لرزه‌ای در برآورد تغییرات دامنهٔ امواج بازتابی با دورافت AVO، تحلیل و تخمین سرعت امواج در لرزه‌نگاری 4D برای پیش‌بینی و مشاهده[۷] هیدروکربن و میدان حرارتی مخازن استفاده می‌شود [۵]. پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی نیز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

برای بیان رابطهٔ بین تنش‌های وارده بر سنگ با سرعت امواج لرزه‌ای و ثابت‌های کشسان سنگ انجام شده است [٦]، [٧]، [١٤].

هر چند در سال‌های اخیر تلاش‌های آزمایشگاهی زیادی برای برقراری رابطه بین تنش‌های وارده بر خاک با مقاومت الکتریکی ویژه، میزان رطوبت و دیگر خواص فیزیک سنگی انجام شده است، اما این تحقیقات هنوز در آغاز کار است [١٦]. این پژوهش‌ها اهمیت زیادی در بررسی‌های ژئوتکنیکی دارند. این تحقیق در چارچوب طرح مطالعات ملی برای یافتن راه‌کار مناسب برای تحکیم پل معلق که از پل‌های قدیمی و تاریخی است، انجام شده است. هدف از این تحقیق شناخت ویژگی‌های لرزه‌ای و زمین‌شناختی محل پایه‌های پل معلق برای اتخاذ تصمیم مناسب برای حفظ، نگه‌داری و بهره‌برداری مناسب است. پل معلق که ده‌ها سال از احداث آن می‌گذرد با طولی نزدیک به هفتاد متر از یک سو به‌دلیل توسعهٔ شهری و افزایش تردد وسائط نقلیه (سواری و باربری) و از سوی دیگر قرار گرفتن بر رودخانه هراز که از دهانهٔ شرقی آن می‌گذرد در معرض خطر است و هدف شناسایی راه‌کار مناسب برای حفظ آن برای نسل‌های بعد است. در این تحقیق هم‌زمان از لرزه‌نگاری شکست مرزی، چاهک الکتریکی و توموگرافی ژئوالکتریکی استفاده شده است. از نتایج لرزه‌نگاری برای تعیین دوره ارتعاشات طبیعی زمین (T_0) در محل پایه‌های پل معلق در دوسوی رودخانه استفاده شده است. از چاهک الکتریکی برای تعیین لایه‌بندی مصالح در زیر پایهٔ شرقی پل استفاده شده است. از توموگرافی ژئوالکتریکی نیز برای بررسی الگوی توزیع مقاومت الکنریکی و تخمین کیفیت گسترش تنش‌های وارده بر مصالح در زیر پایه‌های پل معلق استفاده شده است.

موقعیت پل بررسی شده

شهرستان آمل در ۱۸۰ کیلومتری شمال‌شرق تهران واقع شده است. نزدیک‌ترین راه دسترسی به‌آن جاده آسفالته تهران آمل است که در درهٔ رودخانه هراز احداث شده است. از این شهرستان راه‌های ارتباطی متعددی به شهرستان‌های محمودآباد، بابل، فریدون‌کنار، چماستان و نور منشعب می‌شوند. شکل ۱ موقعیت و محدودهٔ شهر آمل و موقعیت نسبی پل را که بر رودخانه هراز احداث شده است نشان می‌دهد [٣]. محدودهٔ شهر آمل عموماً در رسوبات آبرفتی جوان واقع است و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

گسل مازندران–خزر با راستای شرقی–غربی در فاصلهٔ حدود ۷ کیلومتری جنوب شهر قرار دارد. محدودهٔ شهر در بخش شمالی رشته کوه‌های البرز مرکزی واقع است و روند افزایش ارتفاع در منطقه عموماً از بلندی‌های البرز در شمال به‌سمت جنوب است. رودخانه‌ها و نهرهای دائمی منطقه در نهایت در مسیر شمال به دریای خزر می‌ریزند. پل بررسی شده به‌صورت شرقی غربی در رسوبات آبرفتی بر رودخانه هراز احداث شده است. رودخانهٔ هراز از دهانهٔ شرقی این پل عبور می‌کند. این پل دارای ٤ دهانه و ۵ پایه است و طول تقریبی آن نزدیک به هفتاد متر است (شکل ۲).

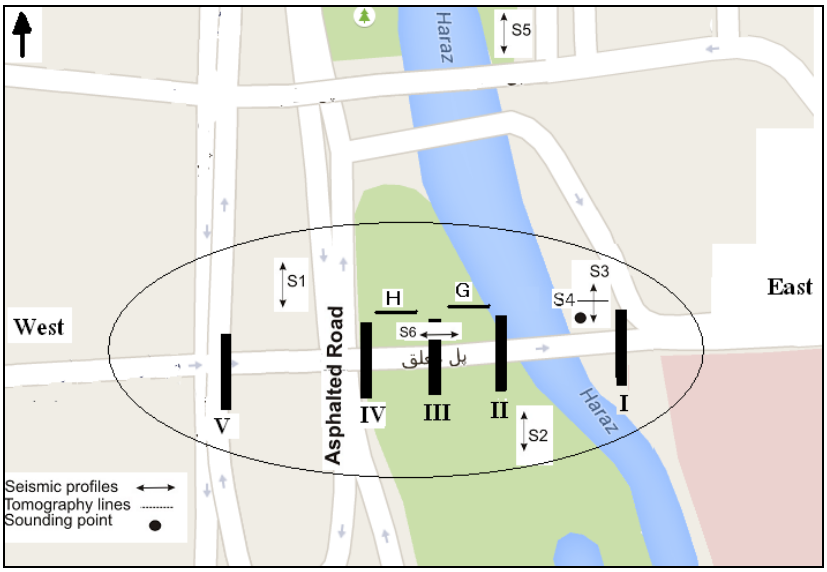
شکل ۱. موقعیت شهر و پل بررسی شده

روش تحقیق

پژوهش‌های ژئوفیزیکی لایه‌های خاک قبل از ساخت پل‌ها، تأسیسات صنعتی و ساختمان‌های بلند برای شناخت برهم کنش آن‌ها با زمین و تعیین پارامترهای فیریکی مکانیکی زمین و بعد از ساخت آن‌ها در طول بهره‌برداری امری ضروری است. قبل از ساخت بنا از لرزه‌نگاری شکست مرزی و در صورت وجود گمانه از روش درون چاهی برای تعیین لایه‌بندی خاک،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

پروفیل سرعت امواج در لایه‌ها، تعیین پریود ارتعاش طبیعی، ضریب بازتاب سازه و تخمین ثابت‌های کشسان دینامیکی استفاده می‌شود. بعد از ساخت بناهای مهم و در طول بهره‌برداری نیز اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی برای مشاهده و نحوهٔ گسترش تنش‌های وارده بر خاک لازم است. پل بررسی شده قبل از جنگ جهانی دوم احداث شده است، و ده‌ها سال از آن بهره‌برداری شده است. امروزه این پل از نظر نوع سازه، معماری و قدمت نماد شهر است و تلاش بر آن بوده است تا با مقاوم‌سازی بتوان آن را برای نسل‌های بعد حفظ کرد.



شکل ۲. موقعیت آزمایش‌های لرزه‌ای، چاهک و توموگرافی ژئوالکتریکی

در این تحقیق از روش‌های لرزه‌نگاری شکست مرزی، مقاومت الکتریکی و توموگرافی ژئوالکتریکی استفاده شده است.

روش شکست مرزی: پژوهش‌های ژئوفیزیکی لایه‌های خاک همراه با بررسی‌های ژئوتکنیکی قبل و بعد از ساخت بنا برای تعیین ویژگی‌های خاک امری ضروری است. قبل از ساخت بنا از روش شکست مرزی همراه با روش‌های درون چاهی برای تعیین لایه‌بندی خاک، تعیین دورهٔ ارتعاش طبیعی زمین، ضریب بازتاب سازه و تخمین ضریب‌های کشسان دینامیکی استفاده می‌شود. بعد از ساخت بناهای مهم در طول بهره‌برداری نیز اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

برای نظارت بر چگونگی گسترش تنش‌های وارده بر خاک لازم است. معمولاً در محیط‌های رسوبی با زیاد شدن عمق، فشار طبقات افزایش می‌یابد و سرعت انتشار امواج لرزه‌ای نیز از سطح به عمق افزایش می‌یابد.

محیط لایه‌ای: وقتی بریک نقطه مانند S روی زمین (شکل ۳) ضربه‌ای وارد می‌شود موج مستقیم ساده‌ترین موجی است که در امتداد سطح زمین با سرعت لایهٔ اول (V1) حرکت می‌کند و در مجموعه گیرنده‌ها دریافت می‌شود. زمان رسید این موج در محل گیرنده R1 بدین‌صورت است:

$$t(x) = \frac{SR1}{V_1} \qquad (۱)$$

در این رابطه V_1 سرعت موج در لایهٔ اول و SR1 فاصله چشمه تا محل گیرنده R1 است. این رابطه نشان می‌دهد که زمان رسید موج مستقیم در مجموعه گیرنده‌ها خط راست است و شیب آن $1/V_1$ است (شکل ۳ الف). اگر V1 و V2 به‌ترتیب سرعت موج در لایهٔ اول و دوم در محیط دولایه (شکل ۳ الف) باشند و سرعت لایهٔ اول بیش‌تر از لایهٔ دوم (V2>V1) باشد از برخورد پرتو SM با زاویهٔ تابش بحرانی $(i_C = \arcsin V_1/V_2)$ به مرز دو لایه موج شکست مرزی (یا موج سر) ایجاد می‌شود. این موج قسمتی از مسیر خود را با سرعت V2 حرکت می‌کند. زمان رسید این موج در محل گیرنده دل‌خواه (R3) در سطح زمین بدین‌صورت است:

$$t(x) = \frac{SM + NR3}{V_1} + \frac{MN}{V_2} \qquad (۲)$$

$$t(x) = \frac{x - 2h \cdot tg\theta}{V_2} + \frac{2h}{V_1 \cos\theta} \qquad (۳)$$

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{V_1 \cos\theta}\left(1 - \frac{V_1}{V_2}\sin\theta\right) \qquad (٤)$$

رابطهٔ (٤) را با توجه به قانون شکست می‌توان بدین‌صورت تبدیل کرد:

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\cos\theta}{V_1} = \frac{x}{V_2} + t_1 \qquad (۵)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

رابطهٔ (۵) نشان می‌دهد که معادله زمان–مکان موج شکست مرزی خط راست است. شیب آن $1/V_2$ و عرض از مبدا آن t_1 است. ضخامت لایهٔ اول را می‌توان از رابطهٔ (٦) بر حسب فاصلهٔ بحرانی D=SR2 محاسبه کرد [۲]، [۱۲]:

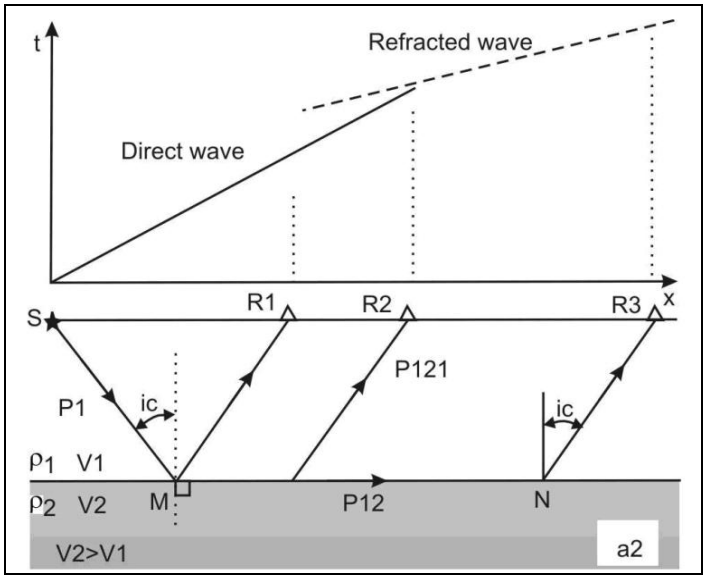
$$h = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{V2 - V1}{V2 + V1}} \qquad (٦)$$

در این روش لازم است نمودار زمان–مکان را رسم کرده و از شیب موج مستقیم و شکست مرزی به‌ترتیب سرعت لایهٔ اول و دوم یعنی(V1) و (V2) را محاسبه کرده و از رابطهٔ (۵) با اندازه‌گیری فاصلهٔ بحرانی D=SR2 جایی‌که محل تلاقی موج مستقیم و شکست مرزی است ضخامت لایهٔ اول را محاسبه کرد. از این روش برای محیط‌های چندلایه نیزاستفاده می‌شود.

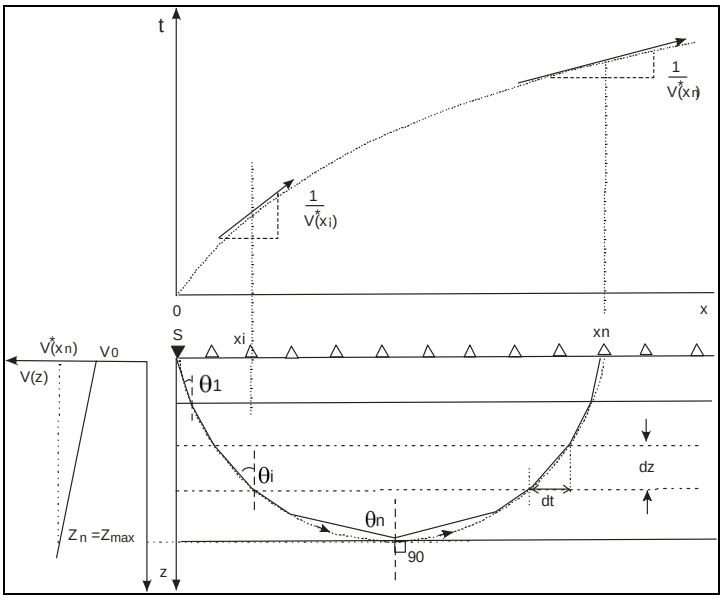
محیط پیوسته: در محیط‌های رسوبی از یک سو سرعت رسوب‌گذاری تدریجی است و با گرادیان معینی صورت می‌گیرد و از سوی دیگر فشار طبقات نیر به‌تدریج از سطح به‌عمق افزایش می‌یابد. از این رو، زون‌های سطحی زمین مانند مجموعه لایه‌های نازک عمل می‌کنند و میزان تراکم و سرعت موج در آن‌ها نسبت به عمق تغییر می‌کند. به‌عبارت دیگر محیط‌های رسوبی به‌صورت مدل لایه‌ای یک‌نواخت و آنیزوتروپ عمل می‌کنند و قانون تغییرات سرعت موج با عمق در هر لایه متفاوت است. با توجه به قانون تغییرات سرعت موج در هر لایه مسیر پرتوهای لرزه‌ای نیز در گذر از محیط دچار انحنا می‌شود (شکل ۳ ب).

این مدل‌ها اغلب در زون‌های هوازده سطحی، رسوبات جوان و سنگ‌های دگرگونی مشاهده می‌شود. رفتار لرزه‌ای در چنین محیط‌هایی پیوسته و گرادیانی است. در محیط‌های پیوسته هر پرتو پارامتر مخصوص خود را دارد و در اثر شکست تدریجی از سطح به عمق در عمقی مانند Zi,max دچار شکست مرزی شده و در امتداد مسیر منحنی شکل به سطح زمین بر می‌گردد. برای به‌دست آوردن نمودار زمان و مکان این موج فرض می‌کنیم پرتو با پارامتر P از چشمه گسیل شده و در عمق Zmax دچار شکست مرزی می‌شود (شکل ۳ ب). این پرتو در امتداد مسیر منحنی شکل در نقطه x_n به سطح زمین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]



الف



ب

شکل ۳. الف) موج شکست مرزی در محیط لایه‌ای، ب) مسیر پرتو و نمودار زمان- مکان موج شکست مرزی در محیط پیوسته و هوازده با تغییرات تدریجی سرعت برای محاسبه حداکثر عمق نفوذ پرتو

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

برمی‌گردد. برای ساده کردن محاسبات محیط پیوسته را به n لایه نازک با ضخامت‌های برابر (dz) تقسیم می‌کنیم. اگر dx فاصله حرکت افقی موج و dt زمان حرکت موج در لایه i ام باشد. قانون اسنل برای این پرتو بدین‌صورت است:

$$\frac{\sin\theta_1}{V_1}=\frac{\sin\theta_2}{V_2}\cdots=\frac{\sin\theta_n}{V_n}=\frac{1}{V_{n+1}}=\frac{1}{V_{z\,max}}=P \qquad (۷)$$

چون مسیر پرتو نسبت به عمق Z_{max} متقارن است بنابراین فاصلهٔ (در جهت افقی) و زمان حرکت موج از چشمه S تا نقطه Xn بدین‌صورت است:

$$X=2\sum_{1}^{n}h_i\cdot tg\theta_i \qquad (۸)$$

$$T=2\sum_{1}^{n}\frac{hi}{Vi\cos\theta_i} \qquad (۹)$$

زمان و مکان مذکور را با توجه به رابطهٔ (۷) می‌توان به‌صورت پارامتری بیان کرد:

$$X=2\sum_{1}^{n}\frac{h_k P}{\sqrt{V_k^{-2}-P^2}} \qquad (۱۰)$$

$$T=2\sum_{1}^{n}\frac{h_k\cdot V_k^{-2}}{\sqrt{V_k^{-2}-P^2}} \qquad (۱۱)$$

اگر ضخامت لایه‌های نازک بی‌نهایت کوچک باشد زمان و مکان رسید موج با پارامتر P به‌صورت رابطهٔ انتگرالی بیان می‌شود:

$$X(p)=2\int_{0}^{Z(p)}\frac{pdz}{\sqrt{V(z)^{-2}-p^2}} \qquad (۱۲)$$

$$T(p)=2\int_{0}^{Z(p)}\frac{V(z)^{-2}dz}{\sqrt{V(z)^{-2}-p^2}} \qquad (۱۳)$$

هرچند روابط مذکور معادلهٔ پارامتری زمان و مکان پرتو هستند اما نمی‌توان زمان را مستقیماً برحسب فاصله بیان کرد. از رابطهٔ (۱۲) بیش‌ترین عمق نفوذ پرتو با پارامتر p بدین‌صورت است [٤]:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

$$Z(V) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{x(p)} \operatorname{arch}(p.V)\, dx \qquad (١٤)$$

این رابطه را فرمول هرگلوتس- ویچرت[1] می‌گویند [٤]، [۱۰]. رابطهٔ (١٤) بر حسب سرعت‌های ظاهری از نمودار زمان-مکان به‌صورت رابطهٔ (۱۵) است:

$$z_n = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{xn} \operatorname{arch} \frac{V^*(x_n)}{V^*(x)}\, dx \qquad (۱۵)$$

در این رابطه $V^*(x_n)$ سرعت موج در عمق z_n است که از شیب ظاهری نمودار زمان-مکان در نقطه x_n محاسبه می‌شود. $V^*(x)$ نیز سرعت موج در عمق z ($0 \le z \le z_{max}$) است که از شیب نمودار زمان- مکان در نقطه x ($0 \le x \le x_n$) محاسبه می‌شود (شکل ۳ ب). بنابراین مراحل حل وارون در محیط پیوسته شامل: ۱. رسم نمودار زمان- مکان رسیدهای اول ۲. محاسبه سرعت‌های ظاهری (V^*) در هر نقطه از نمودار زمان- مکان (در فاصلهٔ 0 تا x_n از شیب خط مماس) ۳. محاسبه عمق با کمک رابطهٔ (۱۵) در مکانی که سرعت $V^*(x_n)$ است ٤. رسم نمودار تغییرات سرعت با عمق.

در این تحقیق شش آزمایش لرزه‌ای با امواج P و S اجرا شده است و موقعیت آن‌ها در شکل ۲ آمده است. اندازه‌گیری‌های صحرایی به‌صورت پروفیل‌های خطی و با سیستم Z-Z برای موج P و سیستم Y-Y برای موج S اجرا شده است. در سیستم Z-Z از ضربه‌های عمودی برای ایجاد موج P و از گیرنده‌های نوع P برای دریافت جابه‌جایی عمودی خاک استفاده شده است. در سیستم Y-Y از ضربه‌های افقی برای ایجاد موج S و از گیرنده‌های نوع S برای دریافت جابه‌جایی افقی خاک استفاده شده است. فاصله بین گیرنده‌های متوالی در این پژوهش یک تا دو متر انتخاب شده است. برای ایجاد موج طولی از ضربات پتک ۱۰ کیلوگرمی استفاده شده است. برای حذف نوفه‌ها و تقویت موج شکست مرزی در دور افت‌های دور از بر انبارش ده‌گانه استفاده شده است برای ایجاد موج S در محل پایه‌هایی که در زمین خاکی قرار دارند از الوار آج‌دار و در قسمت‌های سنگی و آسفالته از میله‌ای که زاویهٔ آن با راستای عمودی بیش از ٤۵ درجه است، استفاده شده است. برای ایجاد موج S در محل هر چشمه از ضربه‌های

1. Herglots-wiechert

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

افقی پتک بر دو مقطع الوار استفاده شده است. امواج S که با ضربه های چپ و راست در دو مقطع الوار ایجاد می‌شوند ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند [۱۱]. برای به‌دست آوردن نگاشت لرزه‌ای نهایی و تقویت موج شکست مرزی نوع S، نگاشت‌های به‌دست آمده از ضربه‌های چپ و راست از هم کم شده است. محل چشمه‌های لرزه‌ای در پروفیل‌ها در فاصله‌های صفر و بیست متری از ابتد (گیرندهٔ ۱)، انتها (گیرندهٔ ٢٤) و نقطهٔ وسط پروفیل (گیرندهٔ ۱۲) قرار دارند. برای ثبت داده‌های لرزه‌ای از لرزه‌نگار ٢٤ کاناله رقومی استفاده شده است.

چاهک الکتریکی قائم دیگر روش ژئوفیزیکی است که در این تحقیق برای تفکیک لایه‌ها، ضخامت و مقاومت الکتریکی ویژه رسوبات در محل پایهٔ شرقی پل (پایهٔ I در شکل ۲) استفاده شده است. چون عمق کاوش در روش شکست مرزی به‌دلیل استفاده نکردن از مواد ناریه و محدود بودن فضا برای اجرای پروفیل‌های لرزه‌ای بلند محدود بود و برای اجرای روش درون چاهی گمانه‌ای وجود نداشت، بنابراین برای دست‌یابی به اطلاعات عمق‌های بیش‌تر از چاهک الکتریکی قائم استفاده شده است.

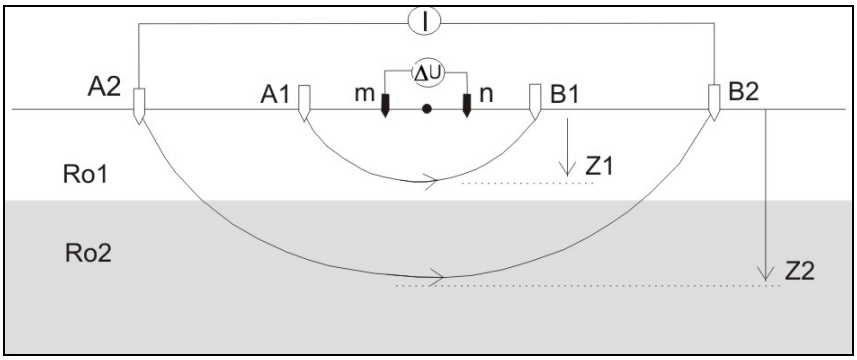
در این روش مطابق شکل ٤ از دوقطبی فرستنده AB برای ارسال جریان الکتریکی و از دوقطبی گیرنده mn برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی استفاده شده است. دو قطبی فرستنده منبع جریان الکتریکی ثابت یا فرکانس پایین است و جریان الکتریکی از طریق الکترودهای تغذیه AB به زمین تزریق می‌شود. دوقطبی گیرنده نیز ازطریق دو الکترود mn اختلاف پتانسیل الکتریکی را اندازه‌گیری می‌کند. هر چند چاهک الکتریکی قائم روش کلاسیک در ژئوفیزیک کاربردی است و قدمت آن به سال ۱۹۱۲ میلادی بر می‌گردد [۸]، [۱۰]، اما این روش هنوز از نظر دقت، سادگی و ارزانی روشی بی‌رقیب در میان دیگر روش‌های ژئوالکتریکی است و می‌تواند به‌صورت چاهک منفرد و یک‌بعدی در محیط‌های رسوبی اجرا شود. با توجه به این‌که تنها در محل پایهٔ شرقی (پایهٔ I در شکل ۲) فضای محدودی وجود داشت، در این محل یک چاهک الکتریکی با آرایه شلومبرژه با حداکثر فاصله الکترودی ABmax =140 متر اجرا شده است که به‌طور متوسط می‌تواند تا عمق ۳۵ نفوذ کند. موقعیت چاهک الکتریکی در شکل ۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

آمده است. در این روش برای تعیین تعداد، ضخامت و مقاومت ویژه حقیقی لایه‌ها از مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌شود. فرمول محاسبه مقاومت ویژه ظاهری به‌صورت (۱۶) است:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta U_{mn}}{I_{AB}} \qquad (۱۶)$$

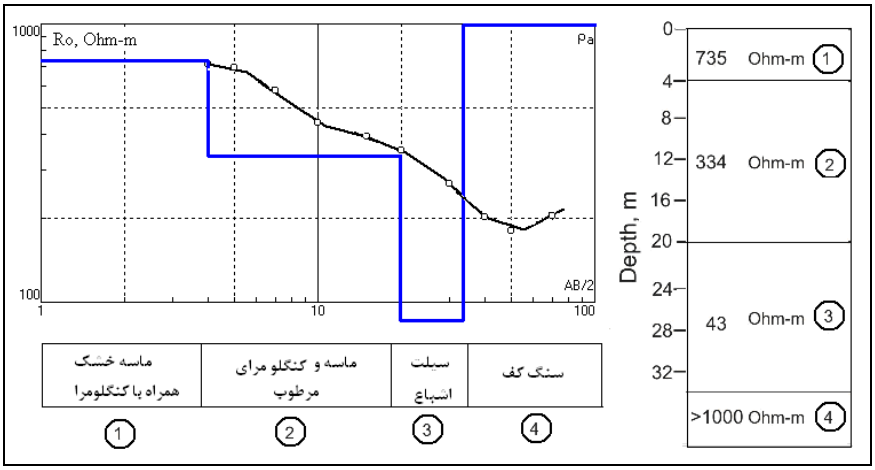
در این رابطه K ضریب آرایه (در این پژوهش آرایه شلومبرژه)، ΔU_{mn} اختلاف پتانسیل در الکترودهای گیرنده و I_{AB} شدت جریان در الکترودهای فرستنده است.



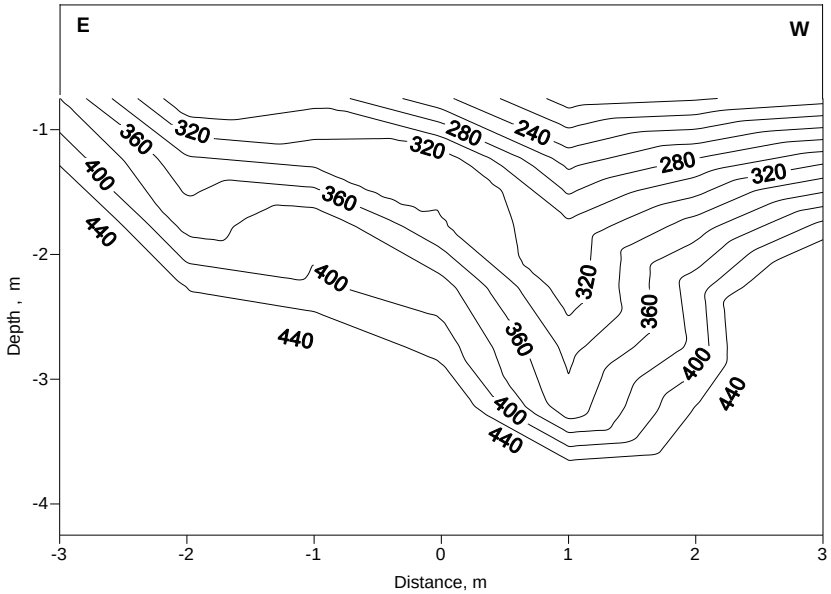
شکل ٤. نحوهٔ اجرای چاهک الکتریکی

توموگرافی ژئوالکتریکی: چون مقاومت الکتریکی رسوبات عموماً به‌میزان تخلخل، عمق، فشار وارده برخاک، میزان رطوبت وساخت و بافت بستگی دارد بنابراین از شبه مقاطع ژئوالکتریکی که به آن توموگرافی دوبعدی نیز می‌گویند [۸]. برای مشاهده تغییرات جانبی احتمالی، روند تغییرات مقاومت الکتریکی خاک و نحوهٔ گسترش تنش‌های وارده بر خاک در محل پایه‌های میانی پل استفاده شده است. موقعیت پروفیل‌های توموگرافی G و H که به‌صورت شرقی غربی اجرا شده‌اند در شکل ۲ آمده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]



۵. نمودار چاهک الکتریکی و مدل ژئوالکتریکی مقطع زمین‌شناسی در محل پایه شرقی پل



شکل ٦. تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب اهم متر در امتداد پروفیل G در شکل ۲

نتایج تحقیق

لرزه‌نگاری: محل شش پروفیل لرزه‌ای در شکل ۲ نشان داده شده است. پروفیل‌های S1، S2، S3، S4، S6 به‌صورت ٢٤ کاناله و پروفیل S4 به‌صورت ۱۲ کاناله برداشت شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

پروفیل S1 در محل پایهٔ غربی پل، پروفیل‌های S3 و S4 در محل پایهٔ شرقی پل، پروفیل‌های S2 و S6 در محدودهٔ پایه‌های میانی و پروفیل S5 در ۲۰۰ متری ضلع شمالی پل و در شرق رودخانه قرار دارند. مراحل کار شامل ثبت نگاشت‌های لرزه‌ای، پردازش داده، استخراج نمودارهای زمان- مکان رسیدهای اول، حل وارون و محاسبه سرعت امواج طولی و عرضی در پروفیل‌ها است. برای تفسیر نمودارهای زمان-مکان از مدل گرادیانی استفاده شده است. سرعت متوسط موج برشی در پروفیل‌های لرزه‌ای برای عمق کاوش در محدوده نفوذ پرتوهای لرزه‌ای در جدول ۱ آمده است. عمق کاوش در این پروفیل‌ها کم‌تر از سی متر است. هم‌چنین سرعت متوسط موج برشی تا عمق سی متردر جدول ۱ درج شده است. سرعت متوسط از تعمیم سرعت موج برشی آخرین عمق نفوذ پرتو تا عمق سی‌متری به‌دست آمده است. بر اساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها عمق سی متر در برابر زلزله انتخاب شده است[1]. جدول فوق نشان می‌دهد سرعت متوسط موج برشی در محل پایه غربی پل ($\overline{V}_{S30} = 774$ و $\overline{V}_S = 703$) بیش‌تر از پایهٔ شرقی ($\overline{V}_{S30} = 540$ و $\overline{V}_S = 508$) و میانی پل ($\overline{V}_{S30} = 564$ و $\overline{V}_S = 458$) است. با توجه به مقادیر سرعت موج برشی نوع زمین در محل پایهٔ غربی متفاوتر از نیمهٔ شرقی است.

چاهک الکتریکی: نمودار چاهک الکتریکی در محل پایهٔ شرقی پل (شکل ۵) نشان می‌دهد که لایه‌های زیرسطحی در محدودهٔ نفوذ جریان الکتریکی چهارلایه و از نوع QH است. نتیجه حل وارون این نمودار در شکل۵ رسم شده است. ویژگی لایه‌های زیرسطحی در محل پایهٔ شرقی پل بدین‌شرح است:

لایهٔ اول با مقاومت ویژه ۷۳۵ اهم‌متر تا عمق ٤ متری گسترش دارد. مشاهدات سطحی نشان می‌دهد این لایه از جنس ماسه و کنگلومرا است. لایهٔ دوم با مقاومت الکتریکی ویژه ۳۳٤ اهم‌متر از عمق ٤ تا۲۰ متر گسترش دارد. این لایه می‌تواند ماسه و کنگلومرای اشباع باشد. لایهٔ سوم با مقاومت الکتریکی ویژه ٤۳ اهم‌متر از عمق ۲۰ تا ۳٤ متر گسترش دارد. کم بودن مقاومت الکتریکی وبژه نشان می‌دهد که ابعاد دانه‌بندی کوچک است. این لایه احتمالاً ماسه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

ریزدانه همراه با سیلت و رس است. از عمق ۳٤ متری لایه‌ای با مقاومت الکتریکی ویژه بالای ۱۰۰۰ اهم متر مشاهده می‌شود. این لایه می‌تواند سنگ کف باشد.

جدول۱. مقادیر سرعت موج برشی در مجموعه پروفیل‌های لرزه‌ای

شماره پروفیل‌ها	عمق کاوش در محل هر پروفیل	سرعت متوسط موج برشی ($\overline{V}_S$) تا عمق کاوش (m/s)	سرعت متوسط موج برشی ($\overline{V}_{S30}$) تا عمق 30 متر (m/s)
S1	14	703	774
S2	12	549	629
S3	14	508	540
S4	4	460	460
S5	16	505	581
S6	12	458	563

توموگرافی الکتریکی: در این پژوهش تعداد ۲ پروفیل توموگرافی G و H در محل پایه‌های میانی و در جهت شرقی غربی اجرا شده است (شکل ۲). در این دو پروفیل تعداد ١٤ چاهک الکتریکی برداشت شده است. چون محدوده پایه‌های پل از بتن و کاشی پوشیده شده است، برای ارسال جریان الکتریکی و اتصال الکترودها به خاک از چال‌زن الکتریکی استفاده شده است. فاصله بین چال‌های متوالی یک متر و عمق آن‌ها ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر است. به‌دلیل نیاز به جزئیات دقیق‌تر در محل پایه‌های پل از مجموعه الکترودها با فواصل یک متری استفاده شده است. شکل ٦ نقشهٔ توموگرافی ژئوالکتریکی پروفیل G را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی بر حسب متر و محور عمودی (عمق) نیز بر حسب متر است. مقطع G در شکل ٦ نشان می‌دهد که توزیع مقاومت الکتریکی ویژه مصالح زیر سطحی در محل پایه II یک‌نواخت نیست و لایه‌های خاک در قسمت‌های سطحی مقاومت کم‌تری دارند. از سوی دیگر شکل ٦ نشان می‌دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه II نامتقارن بوده است و جهت آن‌ها از غرب به شرق است. دلیل این امر می‌تواند عدم تحکیم خاک در قسمت‌های سطحی خاک باشد. مقاومت الکتریکی خاک عموماً به‌میزان تخلخل، عمق، فشار وارده برخاک، میزان رطوبت، ساخت و بافت، و درجهٔ حرارت بستگی دارد. تنش وارده بر خاک باعث تغییر تخلخل می‌شود و تخلخل عامل اصلی در مقاومت الکتریکی است. با توجه به شواهد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

زمین‌شناسی به‌دست آمده از پژوهش‌های لرزه‌نگاری و چاهک الکتریکی، نشست پایه‌های شرقی و میانی پل و توزیع نامتقارن و غیریک‌نواخت تنش‌های وارده بر پایه‌های میانی و شرقی پل در طول چند ده بهره‌برداری و تردد ماشین‌های سواری و باری دلیل این واقعیت است.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش‌های ژئوفیزیکی در سه مرحله و با سه روش مختلف انجام گرفته است. بررسی‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد که سرعت متوسط موج برشی در محل پایهٔ غربی پل ($\overline{V}_{S30}=774$ و $\overline{V}_S=703$) بیش‌تر از پایهٔ شرقی ($\overline{V}_{S30}=540$ و $\overline{V}_S=508$) و میانی پل ($\overline{V}_{S30}=564$ و $\overline{V}_S=458$) است. زیاد بودن سرعت موج برشی در محل پایهٔ غربی پل (پروفیل S1) نشان می‌دهد که مصالح زمین در زیر پایهٔ غربی پل نسبت به پایهٔ شرقی پل استحکام خوبی دارد. با توجه به مقادیر سرعت موج برشی می‌توان نوع زمین را در محل پایهٔ شرقی و میانی از طبقه II و در محل پایهٔ غربی از طبقه I ، جنس لایه‌های آبرفتی را از نوع خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم) و مقدار T_0 را به‌ترتیب معادل ۰/٤–۰/۵ ثانیه در نظر گرفت [۱]. از سوی دیگر نتایج چاهک الکتریکی در محل پایهٔ شرقی پل نشان می‌دهد که احتمالاً لایهٔ سیلتی و رسی در عمق۲۰ متری وجود دارد. بنابر این عواملی چون بالا بودن سطح آب (جریان آب رودخانه که از میانه پایه‌های I و II عبور می‌کند)، احتمال وجود لایهٔ سیلتی و رسی در عمق ۲۰ متری و ضعیف بودن خاک در زیر پایهٔ شرقی پل این امکان را فراهم کرده است که در اثر بارهای وارده در طول بهره‌برداری پایهٔ شرقی و میانی پل نسبت به پایهٔ غربی دچار نشست شود. از سوی دیگر نشست و خزش تدریجی ذرات می‌تواند توزیع یک‌نواخت تنش‌های وارده بر خاک را از پایه‌های پل برهم زند. مقطع توموگرافی G در شکل ٦ این حقیقت را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که توزیع مقاومت الکتریکی ویژه مصالح زیرسطحی در محل پایه G یک‌نواخت نیست. این پایه در چندمتری ضلع‌غربی رودخانه قرار دارد. مصالح زمین در قسمت‌های سطحی مقاومت کم‌تری دارند و با افزایش عمق زیاد می‌شود. دلیل آن می‌تواند تحکیم کم خاک در قسمت های سطحی باشد. از سوی دیگر نحوهٔ توزیع مقاومت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

ویژه در مصالح خاکی زیر پایه G نا متقارن است. این امر می‌تواند ناشی از توزیع نامتقارن و غیریک‌نواخت تنش‌های وارده بر خاک از پایه‌های پل باشد. به‌عبارت دیگر نقشهٔ تغییرات مقاومت الکتریکی در مقطع توموگرافی می‌تواند ناشی از وجود تنش‌های جانبی و نشست باشد. تداوم بهره‌برداری نامناسب می‌تواند باعث گسترش ترک و شکستگی در بدنه شود.

تشکر و قدردانی

از حسن نظر و همکاری شهرداری محترم، مشاورین، متخصصان، کارکنان، و پیمانکاران محترم شهرداری آمل که در این تحقیق در همهٔ مراحل پژوهش مساعدت و همکاری کردند تشکر و قدردانی می‌کنیم. هم‌چنین از داوران محترم که با نظرات تکمیلی و سازنده خود به این مقاله غنا بخشیدند تشکر می‌شود.

منابع

۱. آئین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (آذر ۱۳۷۸).

۲. صمدی ل.، "مبانی ژئوفیزیک کاربردی"، انتشارات جهاد دانشگاهی (۱۳۹۱).

۳. قسمتی از نقشه آمل.

4. Aki K., Richards P. "Quantitative Seismology", Vol. I and II, Freeman and company San Fransisco, Moscow, Mir, [Russian translation] (1993).

5. Axel Kaselow, Serge A., Shapiro, "Stress sensitivity of elastic moduli and electrical resistivity in porous rocks", J. Geophys. Eng. 1 (2004) 1-11.

6. Khaksar A., Griffiths C. M., McCann C., "Compressional-and shear-wave velocities as a function of confining stress in dry sandstones Geophys", Prospect. 47 (1999) 487-508.

7. Kirstettr O., MacBeth C., "Compliance-based interpretation of dry frame pressure sensitivity in shallow marine", sandstones Expanded Abstracts 2132-5(2001).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]

8. Koefoed O., "Geosounding Principle-1", resistivity sounding mesurments (Amsterdam: Elsevier) (1979) 276.

9. Loke M. H., Barker R. D., "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections", Geophysics, 60 (1995) 1682-1690.

10. Matviev B. K., "Geoelectrical exploration", Nedra Moscow (1982).

11. Samadi L., et al, "Shallow subsurface geology and Vs characteristics of sedimentary units throughout Rasht City", Iran Annals of Geophysics, Vol. 52, No. 2 (April 2009) 149-166.

12. Sheriff R E., Geldart L. P., "Exploration seismology", Vol I , II (1987).

13. Zamri Chik, Taohidul Islam, "Tomography Analysis of Compacted Soil Using Electrical Conductivity", Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II WCE 2011, July 6 - 8, (2011) London, U.K.

14. Zimmerman R., Somerton W., King M., "Compressibility of porous rocks", J. Geophys, Res 91, 12765-77 (1986).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.6.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.85]