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 ۹٤/۱۱/۲۳ پذیرش ۹۵/۰۶/۱۹

چکیدہ

در این تحقیق از روش های 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 می دهد: ۱. متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر در محل پایهٔ غربی (477 = 300) بیش تر از پایهٔ شرقی (540 = 540) است. ۲. نتایج چاهک الکتریکی وجود لایهٔ سیلتی و رسی را در محل پایهٔ شرقی پل تأیید می کند. ۳. نقشه توزیع مقاومت الکتریکی در امتداد محور پل که از محل پایههای میانی می گذرد نامتقارن بوده است و تغییرات جانبی در ساختار خاک و تنش وارده را نشان می دهد. توزیع نامتقارن تنش با در نظر گرفتن نتایج بهدست آمده و گذر رودخانه می تواند 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 دیگر)، شرایط بهرهبرداری نامناسب و ساخت سدها و تأسیسات آبی در حریم بناهای تاریخی می توانند از عواملی تهدیدکننده بناهای تاریحی باشند. کشور ما یکی از مناطق زلزلهخیز دنیا است و بناهای تاریخی زیادی در اثر زمین لرزه های مختلف آسیب دیده و یا به کلی از بین رفتهاند. ارگ قدیم بم با ۲۵۰۰ سال قدمت که بزرگترین سازهٔ گلی جهان بود، نمونهای از میراث فرهنگی است که در زمین لرزهٔ دیماه ۱۳۸۲ به کلی تخریب شد. برخی پل ها نظیر پل معلق که در این مقاله بحث می شود قدمت تاریخی دارند و بهرهبرداری نامناسب و شناخت زمین شناسی زیر سطحی آنها تهدید جدی در حفظ و نگهداری آنها برای نسل های 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 پل ها هر چند از نظر فنی، طراحی و اجرا برای متخصصان مشکل نیست، اما شرایط استفاده از آنها در مدت بهرهبرداری می تواند 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 می تواند به کار رود.

امروزه بهدلیل توسعهٔ شهری و تردد وسایط نقلیه بی شمار، 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 می شود. از روشهای درجا می توان به روشهای لرزهای شکست مرزی^۱، روش بازتابی، پاشش موج سطحی، روشهای درون چاهی، روش بین چاهی، روشهای ژئوالکتریکی و دیگر روشهای ژئوفیزیکی اشاره کرد. در لرزه شناسی و زلزله شناسی رابطهٔ بین سرعت امواج لرزهای و تنشهای وارده بر خاک از دیر باز مورد توجه لرزه شناسان و زلزله شناسان بوده است. امروزه در لرزه شناسی نفتی از ارتباط بین تنش موجود در طبقات زمین و سرعت امواج لرزهای در برآورد تغییرات دامنهٔ امواج بازتابی با دورافت مادره بر کلی و مشاهده^۷ برای بیان رابطهٔ بین تنش های وارده بر سنگ با سرعت امواج لرزهای و ثابت های کشسان سنگ انجام شده است [٦]، [۷]، [۱٤].

هر چند در سالهای اخیر تلاش های آزمایشگاهی زیادی برای برقراری رابطه بین تنش های 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 [۱٦]. این پژوهش.ها اهمیت زیادی در بررسیهای ژئوتکنیکی دارند. این تحقیق در چارچوب طرح مطالعات ملی برای یافتن راهکار مناسب برای تحکیم پل معلق که از پل های 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 (${
m T}_0$) 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 شدہ

شهرستان آمل در ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق تهران واقع شده است. نزدیک ترین راه دسترسی به آن جاده آسفالته تهران آمل است که در درهٔ رودخانه هراز احداث شده است. از این شهرستان راه های ارتباطی متعددی به شهرستان های محمود آباد، بابل، فریدون کنار، چماستان و نور منشعب می شوند. شکل ۱ موقعیت و محدودهٔ شهر آمل و موقعیت نسبی پل را که بر رودخانه هراز احداث شده است نشان می دهد [۳]. محدودهٔ شهر آمل عموماً در رسوبات آبرفتی جوان واقع است و 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 به سمت جنوب است. رودخانهها و نهرهای دائمی منطقه در نهایت در مسیر شمال به دریای خزر می ریزند. پل بررسی شده به صورت شرقی غربی در رسوبات آبرفتی بر رودخانه هراز احداث شده است. رودخانهٔ هراز از دهانهٔ شرقی این پل عبور می کند. این پل دارای ٤ دهانه و ٥ پایه است و طول تقریی آن نزدیک به هفتاد متر است (شکل ٢).



شکل ۱. موقعیت شهر و پل بررسی شده

روش تحقيق

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، 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 اندازه گیریهای 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 مقاوم سازی بتوان آن را برای نسل های بعد حفظ کرد.



شکل ۲. م**وقعیت آزمایش های لرزهای، چاهک و توموگرافی ژئوالکتریکی** در این تحقیق از روش های 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 می شود. بعد از ساخت بناهای مهم در طول بهرهبرداری نیز اندازه گیریهای ژئوفیزیکی 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 می شود موج مستقیم ساده ترین موجی است که در امتداد سطح زمین با سرعت لایهٔ اول (۷۱) حرکت میکند و در مجموعه گیرنده ها دریافت می شود. زمان رسید این موج در محل گیرنده R1 بدین صورت است:

$$t(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{SR1}}{\mathbf{V}_1} \tag{1}$$

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 (V1<20) باشد از برخورد پرتو SM با زاویهٔ تابش بحرانی $(c = arcsinV_1/V_2)$ به مرز دو لایه موج شکست مرزی (یا موج سر) ایجاد می شود. این موج قسمتی از مسیر خود را با سرعت V2 حرکت میکند. زمان رسید این موج در محل گیرنده دلخواه (R3) در سطح زمین بدین صورت است:

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

$$t(x) = \frac{x - 2h \cdot tg\theta}{V_2} + \frac{2h}{V_1 \cos\theta}$$
(٣)

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

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{V}_2} + \frac{2\mathbf{h}\mathbf{cos}\theta}{\mathbf{V}_1} = \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{V}_2} + \mathbf{t}_1 \tag{(b)}$$

رابطهٔ (۵) نشان میدهد که معادله زمان-مکان موج شکست مرزی خط راست است. شیب آن 1/V₂ و عرض از مبدا آن t₁ است. ضخامت لایهٔ اول را می توان از رابطهٔ (٦) بر حسب فاصلهٔ بحرانی D=SR2 محاسبه کرد [۲]، [۱۲]:

$$h = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{V2 - V1}{V2 + V1}} \tag{7}$$

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 اندازه گیری فاصلهٔ بحرانی D=SR2 جایی که محل تلاقی موج مستقیم و شکست مرزی است ضخامت لایهٔ اول را محاسبه کرد. از این روش برای محیطهای چندلایه نیزاستفاده می شود.

محیط پیوسته: در محیطهای رسوبی از یک سو سرعت رسوب گذاری تدریجی است و با گرادیان معینی صورت می گیرد و از سوی دیگر فشار طبقات نیر به تدریح از سطح به عمق افزایش می یابد. از این رو، زون های سطحی زمین مانند مجموعه لایه های نازک عمل می کنند و میزان تراکم و سرعت موج در آن ها نسبت به عمق تغییر می کند. به عبارت دیگر محیطهای رسوبی به صورت مدل لایه ای یک نواخت و آنیزو تروپ عمل می کنند و قانون تغییرات سرعت موج با عمق در هر لایه متفاوت است. با توجه به قانون تغییرات سرعت موج در هر لایه مسیر پرتوهای لرزه ای نیز در گذر از محیط دچار انحنا می شود (شکل ۳ ب).

این مدلها اغلب در زونهای هوازده سطحی، رسوبات جوان و سنگهای دگرگونی مشاهده می شود. رفتار لرزهای در چنین محیطهایی پیوسته و گرادیانی است. در محیطهای پیوسته هر _{برتو} 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 می گردد. برای به دست آوردن نمودار زمان و مکان این موج فرض می کنیم پرتو با پارامتر P از چشمه گسیل شده و در عمق Xmax دچار شکست مرزی می شود (شکل ۳ ب). این پرتو در امتداد مسیر منحنی شکل در نقطه xn به سطح زمین



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

برمی گردد. 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 بدین صورت است:

$$\frac{\sin\theta_1}{V_1} = \frac{\sin\theta_2}{V_2} \dots = \frac{\sin\theta_n}{V_n} = \frac{1}{V_{n+1}} = \frac{1}{V_{z \max}} = P$$
(V)

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: (۸) $X = 2\sum_{i}^{n} h_{i} \cdot tg \theta_{i}$

$$T = 2\sum_{i=1}^{n} \frac{hi}{Vicos\theta_{i}}$$
(9)

زمان و مکان مذکور را با توجه به رابطهٔ (۷) می توان به صورت پارامتری بیان کرد:

$$X = 2\sum_{k=1}^{n} \frac{\mathbf{h}_{k} \mathbf{P}}{\sqrt{\mathbf{V}_{k}^{2} - \mathbf{P}^{2}}} \tag{(1)}$$

$$T = 2\sum_{1}^{n} \frac{h_{k} \cdot V_{k}^{-2}}{\sqrt{V_{k}^{-2} - P^{2}}}$$
(11)

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

$$X(p) = 2 \int_{0}^{Z(p)} \frac{pdz}{\sqrt{V(z)^{-2} - p^{2}}}$$
(17)

$$T(p) = 2 \int_{0}^{Z(p)} \frac{V(z)^{-2} dz}{\sqrt{V(z)^{-2} - p^{2}}}$$
(17)

هرچند روابط مذکور معادلهٔ پارامتری زمان و مکان پرتو هستند اما نمی توان زمان را مستقیماً برحسب فاصله بیان کرد. از رابطهٔ (۱۲) بیش ترین عمق نفوذ پرتو با پارامتر p بدین صورت است [٤]: نشریه زمینشناسی مهندسی، جلد دوازدهم، شمارهٔ ۱ بهار ۱۳۹۷

$$Z(V) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{X(p)} \operatorname{arch}(p, V) \, dx \tag{12}$$

ایـن رابطـه را فرمـول هرگلـوتس- ویچـرت ^۱ مـیگوینـد [٤]، [۱۰]. رابطـهٔ (۱٤) بـر حسـب سرعتهای ظاهری از نمودار زمان-مکان بهصورت رابطهٔ (۱۵) است:

$$z_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{x_n} \operatorname{arch} \frac{V^*(x_n)}{V^*(x)} dx \tag{10}$$

در این رابطه $(x_n)^* V$ سرعت موج در عمق z_n است که از شیب ظاهری نمودار زمان-مکان در نقطه x_n محاسبه می شود. $(x)^* V$ نیز سرعت موج در عمق z ($z_{max} > z > z_{max}$) است که از شیب نمودار زمان- مکان در نقطه $x = x_n$ نقطه $(m \times x_n + m)$ محاسبه می شود (شکل π 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 x_n محاسبه می شود (v^*) 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 x_n محاسبه مراحل حل ماس) ۲. محاسبه عمق با کمک رابطهٔ (v^*) در مکانی که سرعت (v^*) در محیط v^* .

در این تحقیق شش آزمایش لرزمای با امواج P و S اجرا شده است و موقعیت آنها در شکل ۲ آمده است. اندازه گیری های صحرایی به صورت پروفیل های خطی و با سیستم Z-Z برای موج P و سیستم Y-Y برای موج S اجرا شده است. در سیستم Z-Z از ضربه های عمودی برای ایجاد موج P و از گیرنده های نوع P برای دریافت جابه جایی عمودی خاک استفاده شده است. در سیستم Y-Y از ضربه های نوع P برای ایجاد موج S و از گیرنده های نوع S برای دریافت جابه جایی افقی خاک استفاده شده است. فاصله بین گیرنده های متوالی در این پژوهش یک تا دو متر انتخاب شده است. برای ایجاد موج G و از گیرنده های نوع S برای شده است. در میستم Y-Y از ضربه های افقی برای ایجاد موج S و از گیرنده های نوع S برای دریافت جابه جایی افقی خاک استفاده شده است. فاصله بین گیرنده های متوالی در این پژوه ش است. در مین انتخاب شده است. برای ایجاد موج طولی از ضربات پتک ۱۰ کیلوگرمی استفاده شده است. برای حذف نوفه ها و تقویت موج شکست مرزی در دور افته ای دور از بر انبارش ده گانه استفاده شده است برای ایجاد موج S در محل پایه هایی که در زمین خاکی قرار دارند از الوار آجدار و در قسمت های سنگی و آسفالته از میله ای که زاویهٔ آن با راستای عمودی بیش از ۵۵ درجه است، استفاده شده است. برای ایجاد موج S در محل پایه هایی که در زمین خاکی قرار

1. Herglots-wiechert

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 ۲٤) و نقطهٔ وسط پروفیل (گیرندهٔ ۱۲) قرار دارند. برای ثبت دادههای لرزهای از لرزهنگار ۲۲ 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 به دلیل استفاده نکردن از مواد ناریه و محدود بودن فضا برای اجرای پروفیل های لرزه ای بلند محدود بود و برای اجرای روش درون چاهی گمانه ای وجود نداشت، بنابراین برای دستیابی به اطلاعات عمق های بیش تر 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 nn برای اندازه گیری 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 nn اختلاف پتانسیل الکتریکی را اندازه گیری 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 بی رقیب در میان دیگر روشهای ژئوالکتریکی است و میتواند به صورت چاهک منفرد و پکبعدی در محیطهای رسوبی اجرا شود. با توجه به این که 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 ADT میکاه می در شکل ۲ آمده است. در این روش برای تعیین تعداد، ضخامت و مقاومت ویژه حقیقی لایهها از مقاومت ویژه ظاهری استفاده می شود. فرمول محاسبه مقاومت ویژه ظاهری به صورت (۱٦) است:

$$\rho_a = \mathbf{K} \cdot \frac{\Delta \mathbf{U}_{mn}}{\mathbf{I}_{AB}} \tag{17}$$

در این رابطه K ضریب آرایه (در این پژوهش آرایـه شـلومبرژه)، ۵U_{mn} اخـتلاف پتانسـیل در الکترودهای گیرنده و I_{AB} شدت جریان در الکترودهای فرستنده است.



شكل ٤. نحوة اجراي چاهك الكتريكي

تومو گرافی 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 می گویند [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 تومو گرافی G و H که به صورت شرقی غربی اجرا شدهاند در شکل ۲ آمده است.



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

نتايج تحقيق

لرزهنگاری: محل شش پروفیل لرزهای در شکل ۲ نشان داده شده است. پروفیل های S1، S2، S3، S4، S6 بهصورت ۲۲ کاناله و پروفیل S4 بهصورت ۱۲ کاناله برداشت شده 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 شکل⁰ 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 تا٢٠ متر گسترش دارد. این لایه میتواند ماسه و کنگلومرای اشباع باشد. لایهٔ سوم با مقاومت الکتریکی ویژه ٤٣ اهممتر از عمق ٢٠ تا ٣٤ متر گسترش دارد. کم بودن مقاومت الکتریکی ویژه نشان میدهد که ابعاد دانهبندی کوچک است. این لایه احتمالاً ماسه ریزدانه همراه با سیلت و رس است. از عمق ۳۵ 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 پروفیل های لرزهای

| شماره پروفیلها | عمق کاوش در محل هر پروفیل | سرعت متوسط موج برشی ($\overline{\mathbf{V}}_{\mathrm{S}}$) تا عمق کاوش (m/s) | سرعت متوسط موج برشی ($\overline{\mathbf{V}}_{\mathrm{S30}}$) تا عمق 30 متر (m/s) |
|----------------|---------------------------------|--|---|
| S1 | 14 | 703 | 774 |
| S2 | 12 | 549 | 629 |
| S 3 | 14 | 508 | 540 |
| S 4 | 4 | 460 | 460 |
| S5 | 16 | 505 | 581 |
| S 6 | 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 ۱۶ 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. ماست. فاصله بین چالهای متوالی یک متر و عمق آنها ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر است. بهدلیل نیاز است. فاصله بین چالهای متوالی یک متر و عمق آنها ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر است. بهدلیل نیاز است. شکل ۲ نقشهٔ توموگرافی ژئوالکتریکی پروفیل G را نشان می دهد. در این شکل محور است. شکل ۲ نقشهٔ توموگرافی ژئوالکتریکی پروفیل G را نشان می دهد. در این شکل محور افتی بر حسب متر و محور عمودی (عمق) نیز بر حسب متر است. مقطع G در شکل ۲ نشان می دهد که توزیع مقاومت الکتریکی ویژه مصالح زیر سطحی در محل پایه ای یکنواخت نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی ویژه مصالح زیر سطحی در محل پایه ای یکنواخت می است. مقطع G در شکل ۲ نشان می دهد که توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح زیر سطحی در محل پایه ای یکنواخت می است. مقطع G در شکل ۳ نشان می دهد که توزیع مقاومت الکتریکی ویژه مصالح زیر سطحی در محل پایه ای یکنواخت می انهان می دهد که توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خور سطحی در محل پایه ای یکنواخت می ان می دهد که توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خور سطحی در محل پایه ای یکنواخت نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه ای نامتقارن بوده است و نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه ای نامتقارن بوده است و نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه ای نامتقارن بوده است و نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه ای نامتقارن بوده است و نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه ای نام می در محلی پای در خور شکل ۲ نشان می دهد توزیع مقاومت الکتریکی در مصالح خاکی زیر پایه ای نام در محوی برخاک، می نازن می در محای می وزان رطوبت، ساخت و بافت، و درجهٔ حرارت بستگی دارد. تنش وارده بر خاک باعث تغییر میزان رطوبت، ماخت و بافت، و درجهٔ حرارت دستگی دارد. تش وارده بر خاک باعث می می داند می می داند می می داند می می در می وزاد تحکیم خاک در خاک می می در ناور ای می می داند می می واده بر خاک باعث تغییر میزان رطوبت، می

زمین شناسی 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. بررسی های لرزهای نشان میدهد که سرعت متوسط موج برشی در محل پایهٔ غربی پل و میانی (\overline{V}_{S} = 508 و \overline{V}_{S30} = 540) و میانی (\overline{V}_{S} = 703 و \overline{V}_{S30} و \overline{V}_{S30} پل ($\overline{V}_{sa0} = 564$ و $\overline{V}_{sa0} = 564$) است. زیاد بودن سرعت موج برشی در محل پایهٔ غربی پل $\overline{V}_{sa0} = 564$ (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 T₀ را بهترتیب معادل ۰/۴–۰/۰ 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 عمق ۲۰ 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 ۲ 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 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 می شود.

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).
- Axel Kaselow, Serge A., Shapiro, "Stress sensitivity of elastic moduli and electrical resistivity in porous rocks", J. Geophys. Eng. 1 (2004) 1-11.
- 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.
- Kirstettr O., MacBeth C., "Compliance-based interpretation of dry frame pressure sensitivity in shallow marine", sandstones Expanded Abstracts 2132-5(2001).

1.1

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