

ارزیابی پتانسیل روانگرایی پی آبرفتی ساختگاه سد مخزنی چپرآباد بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

نوشته: قدرت برزگری* و علی ارومیه‌ای*

*گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

SPT - Based Liquefaction Assessment of Alluvial Foundation at Chapar-Abad Dam

By: G. Barzegari* & A. Uromeihy*

*Department of Geology, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۰۹/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۵/۱۲/۰۸

چکیده

یکی از دلایل برجسته ویرانی سازه‌های مهندسی در حین زمین لرزه، گسترش پدیده روانگرایی در پی‌های خاکی با مصالح غیرچسبنده و اشباع است. علل خرابی در اثر پدیده روانگرایی شامل (۱) کاهش ظرفیت باربری، (۲) نشست زیاد (غیرمجاز)، (۳) گسترش جانبی، (۴) جریان خاک و (۵) نوسان زمین است. پتانسیل روانگرایی پی‌های خاکی به مشخصات موج ناشی از زمین لرزه، نوع خاک، تاریخچه زمین‌شناسی، فشار محصورکننده، نفوذپذیری، چگالی نسبی، میزان رطوبت، ویژگی‌های دانه‌بندی خاک و غیره بستگی دارد.

سد چپرآباد، از نوع خاکی با هسته رسی و ارتفاع ۴۴/۵ متر از پی با ظرفیت مخزن ۱۲۷ میلیون مترمکعب است که در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی در حال اجراست. بستر ساختگاه سد از رسوبات آبرفتی با ستبرایی حدود ۶۰ متر تشکیل شده است و تکیه‌گاه‌های آن روی سنگ‌های آهکی و شیستی با سن پرکامبرین و اینفراکامبرین قرار می‌گیرد. در این مقاله، ضمن بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه، پتانسیل روانگرایی پی آبرفتی، بر پایه نتایج حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) نیز بررسی شده است. در این رابطه، ضمن معرفی آخرین یافته‌ها و روابط موجود برای محاسبه ضرایب اصلاح (C_N) و (K_σ) ، (r_d) ، (MSF) ، همچنین از آنها در ارزیابی پتانسیل روانگرایی پی آبرفتی ساختگاه نیز استفاده شده است. نتیجه بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب اطمینان پی آبرفتی ساختگاه سد چپرآباد در مقابل روانگرایی، در بیشتر نقاط کمتر از یک بوده و با توجه به بافت دانه‌بندی مصالح که بیشتر ماسه‌ای است وقوع پدیده روانگرایی در هنگام زمین لرزه بسیار محتمل است.

کلید واژه‌ها: زمین‌شناسی مهندسی، پتانسیل روانگرایی، ضرایب اصلاح، SPT، سد چپرآباد

Abstract

Development of liquefaction in saturated cohesionless deposits is one of the most dramatic causes of damage in civil structures during earthquakes. The potential damage caused by liquefaction includes: 1) loss of bearing capacity, 2) excessive settlement, 3) lateral spreading, 4) flow failure, and 5) ground oscillation.

The liquefaction susceptibility of a specific deposit is affected by many factors for example, wave-induced liquefaction characteristics, soil type, geological history, confining pressure, permeability, relative density, water content, and properties of the soil grain size.

Chapar-Abad Dam is an inhomogeneous earth-fill dam with height and crest length of 44.5 and 427 meters, respectively. The reservoir capacity is 127 million cubic meters. The dam which is under construction is located about 75 km southeast of Uromieh

City, in West-Azerbaijan province. The foundation materials include 60 meters of alluvium deposits overlying the bedrock layers of carbonate units. The abutments consist of carbonate and schistose layers of Precambrian age. In this paper the potential of liquefaction of the site is evaluated according to the SPT results form in-situ tests performed in boreholes driven into the depth of alluvial deposits. Furthermore, recently modified relations of correction factors such as stress reduction factor (r_d), earthquake magnitude scaling factor for cyclic stress ratios (MSF), overburden correction factor for cyclic stress ratios (K_{σ}), and the overburden normalization factor for penetration resistances (CN) are presented and used in liquefaction assessment of alluvial foundation at Chapar-Abad Dam. The results indicate the possibility of liquefaction and instability of granular soils during earthquake and any types of strong motions.

Keywords: Engineering geology, Liquefaction, Correction factors, SPT, Chapar-abad Dam,

مقدمه

آهک، شیست و شیل خردشده) در تکیه‌گاه‌ها تقسیم‌بندی کرد. نهشته‌های کواترنر در این محدوده گسترش زیادی دارد به گونه‌ای که تشکیل‌دهنده بخش عمده ساختگاه سد چپرآباد به شمار می‌روند. گسترش واحدهای مختلف زمین‌شناسی در شکل ۲ نشان داده شده است.

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی پی آبرفتی ساختگاه سد

ساختگاه سد در یک دره نامتقارن و نسبتاً پهن قرار دارد. تکیه‌گاه راست، نسبت به تکیه‌گاه چپ شیب بیشتری دارد. پهنای دره در بستر سیلابی رودخانه حدود ۲۵۰ متر است. شکل ۳ نمایی از ساختگاه سد را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل از گمانه‌های اکتشافی حفاری شده (شکل ۲)، می‌توان وضعیت نهشته‌های آبرفتی تشکیل‌دهنده ساختگاه را به دو گونه درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم کرد. بخش عمده سمت راست از رسوبات شنی (با درصد کمی سیلت یا رس) تشکیل یافته که در گروه کلی GC یا GM جای می‌گیرد. این رسوبات به طرف چپ دانه‌ریز تر شده و به تدریج به ماسه سیلتی و رسی تبدیل می‌شوند و در گروه SM و SC قرار می‌گیرند. در شکل ۴ تغییرات دانه‌بندی فوق نشان داده شده است. به‌طور کلی، پی آبرفتی ساختگاه سد چپرآباد مجموعه ناهمگن و لایه‌بندی شده‌ای از مصالح زیر است:

شن با دانه‌بندی ضعیف تا خوب همراه با ماسه (GP or GW)

شن لای دار همراه با ماسه و رس (GM or GC)

ماسه با دانه‌بندی ضعیف تا خوب همراه با شن (SW or SP)

ماسه رس و لای دار با کمی شن (SM or SC)

رس لای دار با کمی ماسه و شن (CL or ML)

لای (ML)

خاک‌های ماسه‌ای اشباع هنگامی که تحت اثر ارتعاش زمین‌لرزه قرار می‌گیرند، ممکن است همانند گل مایع، ناگهان به شکل یک سیال درآیند، این پدیده، روانگرایی نامیده می‌شود. در این نوع خاک‌ها، پیش از این که زمین‌لرزه و نیروهای ناشی از آن از طریق تماس بین ذرات بتوانند منتقل شوند، ذرات خاک دارای تماس‌های پایداری بین یکدیگر هستند. این امر موجب می‌شود که مقاومت برشی خاک، پایداری سازه روی خود را تأمین نماید (شکل ۱-الف). هنگامی که این خاک در اثر تنش‌های برشی ناشی از ارتعاش‌های زمین‌لرزه، تغییر شکل می‌دهد، همچنانکه به ترتیب در شکل‌های ۱-ب و ۱-ج مشاهده می‌شود تماس بین ذرات از بین می‌رود. در نتیجه، نیروهایی که اصولاً به وسیله تماس‌های ذرات در امتداد قائم تحمل می‌شدند به آب منفذی منتقل می‌شوند که این امر، همان بروز حالت روانگرایی خواهد بود.

پی اصلی سد چپرآباد از نهشته‌های آبرفتی تشکیل شده است، نوع این رسوبات در بیشتر نقاط، بخصوص در پایین دست و جناح چپ بستر رودخانه، از نوع ماسه همراه با سیلت و رس است. این نوع خاک‌ها بر اساس محدوده دانه‌بندی ارائه شده توسط Tsuchida (1971) در محدوده خاک‌های دارای پتانسیل روانگرایی قرار می‌گیرند (Xenaki & Athanasopoulos, 2003).

زمین‌شناسی عمومی منطقه

گستره طرح سد چپرآباد از دیدگاه زمین‌ساختی، بنا بر تقسیم‌بندی نبوی (۱۳۵۵) در زون "خوی-مهاباد" واقع شده است. در یک رده‌بندی کلی از دیدگاه زمین‌شناسی، سنگ‌های تشکیل‌دهنده ساختگاه سد را می‌توان به دو بخش رسوبات ناپیوسته سطحی در قسمت بستر و واحدهای سنگی (از جنس

استفاده گردید. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پوش‌های دانه‌بندی ساختگاه سد چپرآباد بر این اساس در محدوده خاک‌های دارای پتانسیل روانگرایی قرار دارند.

دو روش اساسی برای ارزیابی کمی احتمال وقوع پدیده وجود دارد (Seed et al., 1983):

(۱) بر اساس مقایسه میان تنش‌های برشی ایجاد شده توسط زمین‌لرزه با تنش‌های ایجادکننده روانگرایی در آزمایش‌های دوره‌ای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک

(۲) بر اساس اندازه‌گیری‌های مقاومت صحرایی خاک و روابط تجربی موجود و مشاهدات صحرایی در زمین‌لرزه‌های قبلی

روش اول، به دلیل محدودیت‌های موجود در ایجاد شرایط صحرایی در آزمایشگاه و خطای ناشی از دست‌خوردگی نمونه‌ها، نسبت به روش دوم در اولویت بعدی قرار دارد (Seed, 1979). بنابراین در صورت استفاده از روش اول داده‌ها نسبتاً محافظه‌کارانه (overly conservative) گرفته می‌شود (Peck, 1979). از روش‌های صحرایی می‌توان آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) را نام برد که با استفاده از روابط موجود می‌توان مقاومت برشی دوره‌ای برجای خاک را به دست آورد. این آزمایش به دلیل کم هزینه بودن و ارائه نتایج قابل اعتماد، امروزه به عنوان روشی مناسب برای ارزیابی مهندسی روانگرایی خاک به شمار می‌رود (Seed et al., 1986).

بیشتر روش‌های توصیفی داده‌های روانگرایی، تاکنون، بر پایه آزمایش SPT و تعداد ضربات حاصله (N_{SPT}) ارائه شده است. نمودار تجربی Seed از سال ۱۹۸۴، برای به دست آوردن تنش دوره‌ای قابل پیش‌بینی از زمین‌لرزه (CSR) به کار می‌رود. کارگاه آموزشی مرکز ملی پژوهشگاه مهندسی زلزله (NCEER) در ژانویه سال ۱۹۹۶، استفاده از روابط (Seed et al., 1985) را با اصلاحات انجام شده برای محتوای ریزدانه (شکل ۹) را توصیه کردند (Youd et al., 2001). بر اساس روش ساده شده (Seed & Idriss, 1971)، چنین به نظر می‌رسد که تنش‌های برشی ایجاد شده در هر نقطه از نهشته‌های خاکی در هنگام زمین‌لرزه، به طور عمده به دلیل انتشار قائم امواج برشی در نهشته باشد. به گونه‌ای که اگر ستون خاک بالای یک المان در ژرفای h مانند جسمی صلب عمل کند، تنش برشی روی المان خاک مطابق رابطه (۱) خواهد بود:

$$(\tau_{\max})_r = \frac{\gamma h}{g} * a_{\max} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، a_{\max} شتاب بیشینه سطح زمین و γ وزن مخصوص خاک است. اما از آنجا که ستون خاک به صورت جسم تغییرشکل‌پذیر رفتار می‌کند لذا تنش برشی واقعی خاک $(\tau_{\max})_d$ تعیین شده از تحلیل پاسخ زمین، کمتر از

بیشترین ستبرای این نهشته‌ها در زیر محور سد حدود ۵۹ متر است. این ستبرای به سمت بالادست کم و بیش ثابت می‌ماند ولی به طرف پایین دست افزایش می‌یابد. بافت حاکم پی‌آبرفتی در بالادست، ماسه لای دار و در پایین دست به صورت ماسه (در بعضی نقاط همراه با سیلت و رس) می‌باشد. مقطع زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد در شکل ۵ نشان داده شده است. در امتداد طولی رودخانه، در وسط و سمت راست دره، دو لایه درشت‌دانه با مشخصات مکانیکی متفاوت وجود دارد که در جدول ۱ مشخصات مکانیکی این دو لایه به اختصار ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های تراوایی صحرایی (لوفران)، تغییرات زیادی را در تراوایی نهشته‌های آبرفتی نشان می‌دهد به گونه‌ای که از خیلی کم (10^{-7} cm/s) در قسمت‌های جناح چپ آبرفت تا خیلی زیاد (10^{-2} cm/s) در طرف جناح راست تغییر می‌کند، با این حال، ضریب تراوایی در گمانه‌های اکتشافی بیشتر در محدوده 10^{-3} تا 10^{-5} cm/s است. در شکل ۶، مقطع هم‌تراوایی و تغییرات میزان آبرفتی در راستای موازی محور سد نشان داده شده است. تغییرات سطح آب اندازه‌گیری شده در تاریخ‌های مختلف در گمانه‌های اکتشافی حفاری شده در پی‌آبرفتی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به اهمیت وضعیت سطح آب زیرزمینی در پدیده روانگرایی، همان‌طور که در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است در بیشتر گمانه‌ها، سطح آب زیرزمینی در ژرفاهای نزدیک به سطح زمین قرار دارد. پس از احداث سد و آبرگیری مخزن سد چپرآباد، تمام ژرفای گمانه‌ها در حالت اشباع و در زیر سطح آب قرار خواهد گرفت.

ارزیابی پتانسیل روانگرایی نهشته‌های آبرفتی سد چپرآباد

کلمه روانگرایی (Liquefaction) که ابتدا توسط (Kubo & Mogami, 1953) ابداع شد و از نظر تاریخی، همواره در ارتباط با پدیده‌های مختلف دگرشکلی خاک‌های اشباع غیرچسبنده در شرایط زهکشی نشده تحت اثر ارتعاش‌های گذرا، یکنواخت و یا تکراری است (Kramer, 1996). پتانسیل روانگرایی هر نهشته خاکی با ترکیبی از ویژگی‌های خاک، عوامل محیطی و ویژگی‌های زمین‌لرزه محتمل کنترل می‌شود. پدیده روانگرایی خاک‌ها بر اساس مشاهدات، اغلب در لایه‌های رسوبی اشباع متشکل از ماسه سست اتفاق افتاده است، البته در ماسه‌های متراکم، ماسه‌های سیلت‌دار، ماسه‌های شن‌دار و رس روان نیز این پدیده اتفاق می‌افتد (Seed et al., 1984). از آنجا که همه خاک‌ها استعداد روان شدن ندارند لذا اولین گام در ارزیابی استعداد روانگرایی، معمولاً تعیین نوع خاک از لحاظ ویژگی‌های دانه‌بندی است. به همین منظور در بررسی قابلیت روانگرایی مصالح پی آبرفتی سد چپرآباد از لحاظ دانه‌بندی از پوش دانه‌بندی که توسط (Tsuchida, 1971) ارائه شده،

از روش‌های برآورد نسبت تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR)، برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی $M=7/5$ و فشار روباره $\sigma_0 = 1 \text{ atm}$ ، استفاده از عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده $(N_1)_{60}$ طبق رابطه (۷) است (Idriss & Boulanger, 2004).

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs} + \left[\frac{(N_1)_{60cs}^2}{126} \right]}{14.1} - \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right\} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $(N_1)_{60cs}$ ، عدد SPT اصلاح شده برای محتوای ریزدانه‌هاست. این اصلاح که در واقع تأثیر ریزدانه‌ها (Fine Content) در میزان نسبت تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR) است و مطابق رابطه (۸) و (۹) محاسبه می‌گردد:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (8)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC} - \left(\frac{15.7}{FC} \right)^2 \right) \quad (9)$$

ضریب مقیاس‌بندی بزرگی MSF (Magnitude Scaling factor)

همان‌گونه که بیان شد مقدار CRR به دست آمده از طریق رابطه (۷) برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگی $M=7/5$ است. برای بزرگی‌های دیگر، ضریب تصحیح بزرگی (MSF) مطابق شکل ۱۱ به کار گرفته می‌شود و به صورت رابطه (۱۰) در (CRR) اعمال می‌شود.

$$CRR = CRR_{M=7.5} * MSF \quad (10)$$

بزرگی موردنظر برای ارزیابی روانگرایی، بر اساس توصیه ICDL، بیشینه بزرگای محتمل (MCE) در نظر گرفته می‌شود. برای سد چپرآباد، شتاب بیشینه ناشی از زمین‌لرزه (a_{max}) برابر با شتاب بیشینه بزرگای محتمل طرح یعنی $g/44$ و بیشینه بزرگای محتمل برابر با $7/4$ ریشتر در نظر گرفته شد. برای بزرگی مذکور با استفاده از شکل ۱۱، ضریب تصحیح برابر $1/0.346$ به دست آمد.

ضریب تصحیح فشار روباره K_σ

همان‌گونه که در شکل ۱۰ نیز قابل مشاهده است روش ساده شده Seed (1984)، برای زمین‌های مسطح و یا کم‌شیب و برای ژرفاهای کمتر از ۱۵ متر توصیه شده است و برای ژرفاهای بیشتر از ۱۵ متر ضریب تصحیح دیگری به نام (K_σ) برای تصحیح فشار روباره زیاد استفاده می‌شود. این ضریب بر

مقدار به دست آمده از طریق رابطه (۱) می‌باشد و به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$(\tau_{max})_d = r_d * \frac{\sigma_0}{g} \cdot a_{max} = r_d * (\tau_{max})_r \quad (2)$$

در رابطه (۲)، r_d ضریب کاهش تنش، σ_0 تنش کل ناشی از ستون خاک است.

ضریب کاهش تنش r_d (Stress reduction factor)

مقدار میانگین ضریب r_d را می‌توان از طریق رابطه زیر به دست آورد (Blake, 1996).

$$r_d = \frac{1.0 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1.0 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.0012z^2} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، Z ژرفا بر حسب متر است.

نتایج حاصل از رابطه (۳) که در سد چپرآباد نیز مورد استفاده قرار گرفت در محدوده تعیین شده توسط Seed & Idriss (1971)، قرار می‌گیرد (شکل ۱۰). تاریخچه زمان واقعی تنش برشی حین زمین‌لرزه در هر ژرفای نهشته خاکی نامنظم می‌باشد و لازم است که تنش برشی یکنواخت میانگین معادله از آن تعیین شود. (Seed & Idriss (1971)، $0/65$ تنش برشی بیشینه $(\tau_{max})_i$ را پیشنهاد کردند بنابراین تنش برشی میانگین τ_{ave} از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\tau_{ave} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) (\sigma_0) * rd \quad (4)$$

حال اگر تنش برشی میانگین با تقسیم شدن بر تنش مؤثر ناشی از ستون خاک بهنجار شود نسبت تنش دوره‌ای قابل پیش‌بینی از زمین‌لرزه (CSR) بدست می‌آید:

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_v^t} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v^t} \right) * rd \quad (5)$$

در رابطه (۵):

a_{max} : شتاب بیشینه ناشی از زلزله

σ_v : تنش سربار کل

σ_v^t : تنش سربار مؤثر

rd : ضریب کاهش تنش

این نسبت یکی از متغیرهای لازم برای ارزیابی روانگرایی خاک است. متغیر دوم، تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR) نام دارد. مقدار (CRR)، مقاومت خاک در برابر روانگرایی را نشان می‌دهد. پس از تعیین نسبت تنش دوره‌ای قابل پیش‌بینی از زلزله (CSR) و تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR)، با مقایسه نسبت این دو، مطابق رابطه (۶) ضریب اطمینان در برابر روانگرایی تعیین می‌شود.

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (6)$$

در رابطه فوق، FS_L ضریب اطمینان در برابر روانگرایی است.

در روابط (۱۴):

$$Pa = \text{فشار اتمسفر هم واحد با } \sigma'_0 \quad \sigma'_0 = \text{فشار روباره مؤثر}$$

مقدار سایر ضرایب تصحیح در جدول ۲ ارائه شده است.

پس از تصحیح عدد نفوذ استاندارد، $(N_1)_{60} > 30$ نشان‌دهنده ضریب اطمینان بالاتر از ۱ در مقابل روانگرایی است (Robertson & Fear, 2001) Youd & Idriss, 1996).

ارزیابی روانگرایی ساختگاه سد چپرآباد

برای ساختگاه سد چپرآباد پس از اصلاح نتایج صحرایی آزمایش SPT و اعمال ضرایب تصحیح فوق مطابق با روابط ارائه شده در بند ۴، تنش‌های دوره‌ای قابل پیش‌بینی (CSR) و تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR) برای ژرفاهای مختلف گمانه‌های حفاری شده محاسبه گردید و با استفاده از همبستگی موجود بین (CSR) و $(N_1)_{60}$ پتانسیل روانگرایی مصالح پی‌آبرفتی برآورد شد (جدول ۳).

شکل ۱۳ داده‌های مورد استفاده در ارزیابی ساختگاه سد چپرآباد پس از اصلاح نتایج SPT و محاسبه CSR با اعمال ضریب کاهش تنش (T_d) را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی از منحنی‌های همبستگی ارائه شده توسط Idriss & Boulanger (2004) استفاده شد (شکل ۱۴). همان‌طور که دیده می‌شود حدود ۷۰ درصد داده‌ها در محدوده روانگرایی قرار دارند. در شکل ۱۵ و ۱۶ داده‌های موجود به تفکیک برای مصالح با ریزدانه‌های ($FC < 0.075$) مختلف نشان داده شده‌اند. لازم به توضیح است محتوای ریزدانه پی‌آبرفتی سد چپرآباد جز در چند مورد، در بیشتر موارد بین ۵ تا ۱۵ درصد و یا کمتر از ۵ درصد (ماسه تمیز) قرار دارد.

برای ارزیابی احتمالی روانگرایی ساختگاه سد چپرآباد برای ماسه تمیز Toprak et al. (1999) از روابط همبستگی ارائه شده توسط (5% $FC \leq$) و Cetin et al. (2000) استفاده شد (شکل ۱۷).

برای به‌دست آوردن ژرفا و ستبرای لایه‌های روانگرا در گمانه‌های مختلف، با محاسبه تنش‌های دوره‌ای (CSR) و (CRR) و رسم تغییرات آنها با ژرفا و مقایسه آنها، تغییرات ضریب ایمنی (FS) به‌دست آمد که در شکل ۱۸ به صورت گرافیکی نشان داده شده است.

اساس توصیه Idriss & Boulanger (2004)، به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\alpha} \ln \left(\frac{\sigma'_v}{P_0} \right) \leq 1.0$$

$$C_{\alpha} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60}}} \quad (11)$$

در رابطه بالا ضریب C_{α} نباید بیشتر از ۰/۳ باشد. شکل ۱۲ منحنی‌های به‌دست آمده از رابطه (۱۱) را نشان می‌دهد.

پس از به‌دست آوردن ضریب (K_{σ}) ، CRR نهایی از طریق رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$CRR = CRR_{m=7.5} * MSF * K_{\sigma} \quad (12)$$

تصحیح عدد نفوذ استاندارد (NSPT) و ضریب تصحیح CN

کواکر و سلومون دریافتند که انرژی واقعی ورودی به نمونه‌گیر برای ایجاد نفوذ در حدود ۳۰ تا ۸۰ درصد انرژی ورودی نظری است، در حالی که ریگز و همکاران آن را در حدود ۷۰ تا ۱۰۰ درصد انرژی نظری برآورد کردند. بولز برآورد نمود که نسبت انرژی ابزارهای مورد استفاده آمریکای شمالی به ۷۰ درصد نزدیک است. در پیش‌نویس دستورالعمل آزمایش تهیه شده در ایران این نسبت، ۶۰ درصد پیشنهاد شده است (روشن‌ضمیر، ۱۳۸۲). عدد نفوذ بر مبنای نسبت انرژی استاندارد ۶۰ درصد را می‌توان از مقدار اندازه‌گیری شده (NSPT) و با استفاده از رابطه (۱۳) به‌دست آورد (Robertson & Fear, 1996).

$$(N_1)_{60} = N_{spt} \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R \quad (13)$$

در رابطه (۱۳):

- C_B : ضریب تصحیح قطر گمانه
- C_S : ضریب تصحیح شرایط نمونه‌گیر
- C_R : ضریب تصحیح طول میله حفاری
- N_{spt} : عدد نفوذ اصلاح نشده
- C_N : ضریب تصحیح فشار روباره
- C_E : ضریب تصحیح نسبت انرژی چکش

در این میان ضریب تصحیح فشار روباره از اهمیت خاصی برخوردار است و مقدار آن در هر شرایطی نباید از ۱/۷ بزرگ‌تر و یا خیلی کمتر از ۱ باشد. این ضریب با استفاده از رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید:

$$C_N = \left(\frac{Pa}{\sigma'_0} \right)^{\alpha} \leq 1.7$$

$$\alpha = 0.784 - 0.0768 \sqrt{(N_1)_{60}} \quad (\text{Idriss \& Boulanger, 2004}) \quad (14)$$

نتیجه‌گیری

ارزیابی پتانسیل روانگرایی در پی‌های آبرفتی مشابه ساختگاه سد چپرآباد، بخصوص در پروژه‌های سدسازی اهمیت زیادی داشته و نقش حیاتی دارد. ساده‌ترین روش برای این ارزیابی مهم، استفاده از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) است که به موجب آن، به تراکم خاک پی برده شده و از طریق روابط تجربی به دست آمده از روانگرایی خاک‌ها در زمین‌لرزه‌های قبلی، پتانسیل روانگرایی ارزیابی می‌شود.

با توجه به بررسی‌های انجام یافته، در بررسی پتانسیل روانگرایی، اعمال ضرایب دخیل در روابط مورد استفاده، تأثیر بسیار زیادی در صحت نتایج دارد. ضرایب تصحیح کاهش تنش (α_d)، بزرگی زلزله (MSF)، فشار روباره زیاد (K_G) و فشار روباره (CN) از جمله پارامترهای مهم به شمار می‌روند. از ضرایب تصحیح عدد نفوذ استاندارد (NSPT)، ضریب تصحیح فشار روباره (CN)، از حساسیت بسیار بالایی برخوردار بوده و تأثیر زیادی در نتیجه دارد. مقدار این ضرایب در هر شرایطی نباید از ۱/۷ بیشتر و یا خیلی کمتر از ۱ باشد.

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در قالب نوشته حاضر، مصالح پی آبرفتی ساختگاه سد چپرآباد از لحاظ پوش دانه‌بندی در محدوده خاک‌های روانگرا قرار داشته و براساس محاسبات انجام گرفته با استفاده از نتایج نسبتاً به روز و با استفاده از همبستگی‌های موجود بین تنش دوره‌ای قابل پیش‌بینی از زمین‌لرزه (CSR) و تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR) با عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده (N_{60})، احتمال روانگرایی در بیش از ۷۰ درصد نقاط وجود دارد. ستبرای لایه‌های

روانگرا در بیشتر گمانه‌های مورد بررسی بخصوص در گمانه‌های CH۱،CH۷،CH۱۱،CH۱۲ و CH۱۴ حتی به بیش از ۲۵ متر نیز می‌رسد. لذا مصالح پی آبرفتی سد چپرآباد دارای پتانسیل روانگرایی بوده و در صورت وقوع زمین‌لرزه با بزرگی MCE، مصالح دچار روانگرایی خواهند شد.

با توجه به موارد فوق توصیه می‌شود پیش از اجرای عملیات خاکریزی سد، تا حد امکان نسبت به بهسازی پی اقدام شود. برای بهسازی این ساختگاه از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که از جمله می‌توان به روش تراکم دینامیکی، تراکم ارتعاشی، زهکش شنی قائم، تزریق سیمان و پیش‌بارگذاری اشاره کرد.

انتخاب هر کدام از روش‌های فوق به بررسی‌های فنی و اقتصادی با توجه به شرایط موجود دارد. به نظر می‌رسد استفاده از زهکش‌های شنی قائم و بارگذاری از طریق اجرای بدنه سد با در نظر گرفتن مسائل مربوط به نشست، به گونه‌ای که زهکش‌ها موجب افزایش نشست نگردند (برای تأمین این هدف می‌توان پس از تراکم پی به اندازه کافی و پیش از آبرگیری سد، زهکش‌ها را آب‌بند نمود) می‌تواند روش مناسبی باشد. روش دوم پیشنهادی برای بهسازی روانگرایی پی سد چپرآباد، افزایش تعداد ردیف‌ها و ژرفای گمانه‌های تزریق تحکیمی و بهسازی از طریق تزریق دوغاب سیمان است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی دو لایه آبرفتی درشت‌دانه در جناح راست و وسط دره

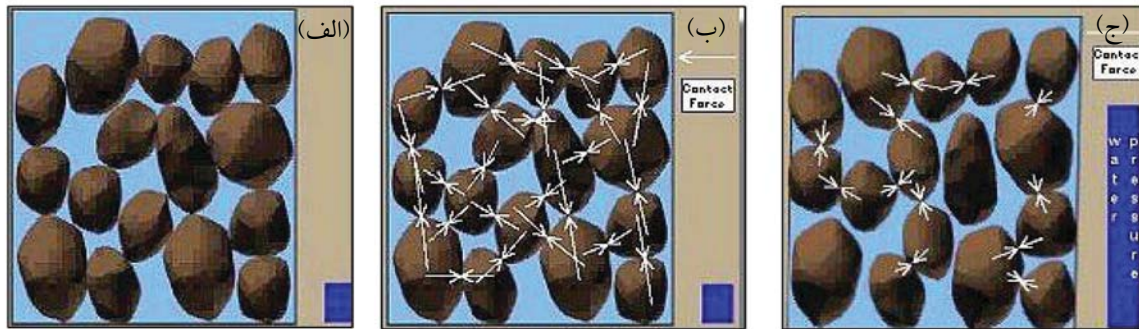
| نام لایه | γ_d (KN/m ³) | γ (KN/m ³) | γ_{sat} (KN/m ³) | C^l (KPa) | θ^l (درجه) |
|--|------------------------------------|----------------------------------|--|----------------|----------------------|
| لایه بالایی تا ژرفای ۲۵ متری | ۱۶/۴ | ۱۸ | ۱۹/۸ | ۰ | ۳۵ |
| لایه پایینی از ژرفای ۲۵ متری تا سنگ بستر | ۱۵/۵ | ۱۷ | ۱۹/۸ | ۰ | ۳۲ |

جدول ۲- ضرایب تصحیح عدد نفوذ استاندارد (Youd et al., 2001)

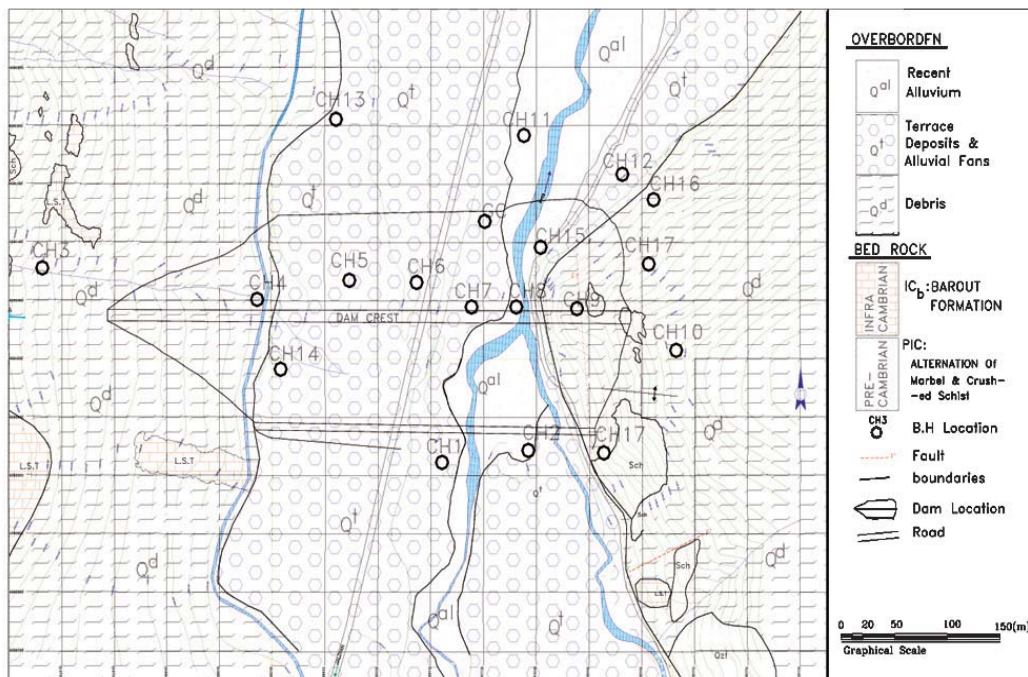
| فاکتور | علامت | متغیرها | ضریب تصحیح |
|------------------|-------|-------------------------|------------|
| نسبت انرژی | C_E | چکش حلقوی | ۰/۵-۱ |
| | | چکش ایمنی | ۰/۷-۱/۲ |
| | | چکش ایمنی -اتوماتیکی | ۰/۸-۱/۳ |
| قطر گمانه | C_B | ۶۵-۱۱۵ میلیمتر | ۱ |
| | | ۱۵۰ میلیمتر | ۱/۰۵ |
| | | ۲۰۰ میلیمتر | ۱/۱۵ |
| طول میله حفاری | C_R | ۳ متر < | ۰/۷۵ |
| | | ۳-۴ متر | ۰/۸ |
| | | ۴-۶ متر | ۰/۸۵ |
| | | ۶-۱۰ متر | ۰/۹۵ |
| | | ۱۰-۳۰ متر | ۱ |
| شرایط نمونه گیری | C_S | نمونه گیر استاندارد | ۱ |
| | | بدون آستری | ۱/۱-۱/۳ |

جدول ۳- نمونه‌ای از جدول محاسبه ضرایب تصحیح عدد نفوذ استاندارد و تنش‌های دوره‌ای برای گمانه‌ها

| BHLNo | Depth (m) | GWL (m) | N spt | σ_o | σ_o' | C_N | C_E | C_S | Rod LENGTH | C_R | (N1) ₆₀ | FC | $\langle(N1)_{60}\rangle$ | (N1) _{60cs} | r_d | CSR | MSF | C_u | K_u | CRR | FS |
|-------|-----------|---------|-------|------------|-------------|-------|-------|-------|------------|-------|--------------------|------|---------------------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| CH1 | 3 | 1.0 | 27 | 55.6 | 26.17 | 1.55 | 1.00 | 1.00 | 6.00 | 0.85 | 35.6 | 1 | 0.00 | 35.6 | 0.979 | 0.595 | 1.0346 | 0.2719 | 1 | 1.314 | 2.28 |
| | 5 | 1.0 | 18 | 95.2 | 46.15 | 1.38 | 1.00 | 1.00 | 8.00 | 0.95 | 23.6 | 1 | 0.00 | 23.6 | 0.965 | 0.570 | 1.0346 | 0.1536 | 1 | 0.269 | 0.49 |
| | 7 | 1.0 | 24 | 135 | 66.13 | 1.18 | 1.00 | 1.00 | 10.00 | 0.95 | 26.9 | 5 | 0.00 | 26.9 | 0.949 | 0.553 | 1.0346 | 0.1759 | 1 | 0.354 | 0.66 |
| | 8 | 1.0 | 5 | 155 | 76.12 | 1.18 | 1.00 | 1.00 | 11.00 | 1.00 | 5.9 | 5 | 0.00 | 5.9 | 0.937 | 0.544 | 1.0346 | 0.0788 | 1 | 0.095 | 0.18 |
| | 12 | 1.0 | 8 | 234 | 116.08 | 0.92 | 1.00 | 1.00 | 15.00 | 1.00 | 7.4 | 10 | 1.14 | 8.5 | 0.857 | 0.493 | 1.0346 | 0.0836 | 0.9885 | 0.111 | 0.23 |
| | 14 | 1.0 | 26 | 273 | 136.06 | 0.88 | 1.00 | 1.00 | 17.00 | 1.00 | 23.0 | 10 | 1.14 | 24.1 | 0.794 | 0.456 | 1.0346 | 0.1498 | 0.9556 | 0.268 | 0.61 |
| | 16 | 1.0 | 35 | 313 | 156.04 | 0.85 | 1.00 | 1.00 | 19.00 | 1.00 | 29.9 | 7 | 0.13 | 30.0 | 0.728 | 0.417 | 1.0346 | 0.2016 | 0.9125 | 0.459 | 1.14 |
| | 20 | 1.0 | 40 | 392 | 196.00 | 0.79 | 1.00 | 1.00 | 23.00 | 1.00 | 31.7 | 13 | 2.50 | 34.2 | 0.618 | 0.354 | 1.0346 | 0.2201 | 0.8544 | 0.835 | 2.44 |
| | 23 | 1.0 | 16 | 452 | 225.97 | 0.65 | 1.00 | 1.00 | 26.00 | 1.00 | 10.4 | 11 | 1.61 | 12.0 | 0.566 | 0.323 | 1.0346 | 0.0936 | 0.9247 | 0.127 | 0.41 |
| | 25 | 1.0 | 16 | 491 | 245.95 | 0.62 | 1.00 | 1.00 | 28.00 | 1.00 | 9.9 | 11 | 1.61 | 11.5 | 0.541 | 0.309 | 1.0346 | 0.0919 | 0.9184 | 0.122 | 0.41 |
| | 27 | 1.0 | 46 | 531 | 265.93 | 0.72 | 1.00 | 1.00 | 30.00 | 1.00 | 33.0 | 1 | 0.00 | 33.0 | 0.523 | 0.298 | 1.0346 | 0.2356 | 0.7722 | 0.609 | 2.11 |
| | 29 | 1.0 | 5 | 570 | 285.91 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | 32.00 | 1.00 | 2.5 | 8 | 0.36 | 2.9 | 0.508 | 0.290 | 1.0346 | 0.0673 | 0.9301 | 0.072 | 0.26 |
| | 32 | 1.0 | 14 | 630 | 315.88 | 0.52 | 1.00 | 1.00 | 35.00 | 1.00 | 7.3 | 10 | 1.14 | 8.4 | 0.490 | 0.279 | 1.0346 | 0.0831 | 0.9053 | 0.100 | 0.37 |
| | 34 | 1.0 | 14 | 669 | 335.86 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | 37.00 | 1.00 | 7.0 | 8 | 0.36 | 7.3 | 0.480 | 0.274 | 1.0346 | 0.0822 | 0.9014 | 0.094 | 0.35 |
| | 36 | 1.0 | 41 | 709 | 355.84 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | 39.00 | 1.00 | 24.7 | 12 | 2.07 | 26.8 | 0.471 | 0.269 | 1.0346 | 0.1607 | 0.7978 | 0.280 | 1.08 |
| | 38 | 1.0 | 33 | 749 | 375.82 | 0.55 | 1.00 | 1.00 | 41.00 | 1.00 | 18.1 | 7 | 0.13 | 18.2 | 0.463 | 0.264 | 1.0346 | 0.1242 | 0.8369 | 0.161 | 0.63 |
| | 40 | 1.0 | 35 | 788 | 395.80 | 0.54 | 1.00 | 1.00 | 43.00 | 1.00 | 18.9 | 8 | 0.36 | 19.3 | 0.456 | 0.260 | 1.0346 | 0.1282 | 0.8251 | 0.169 | 0.67 |
| | 46 | 1.0 | 22 | 907 | 455.74 | 0.44 | 1.00 | 1.00 | 49.00 | 1.00 | 9.7 | 22 | 4.77 | 14.5 | 0.435 | 0.248 | 1.0346 | 0.0912 | 0.8627 | 0.135 | 0.56 |
| | 50 | 1.0 | 30 | 986 | 495.70 | 0.45 | 1.00 | 1.00 | 53.00 | 1.00 | 13.5 | 8 | 0.36 | 13.9 | 0.423 | 0.241 | 1.0346 | 0.105 | 0.8331 | 0.127 | 0.54 |
| | 52 | 1.0 | 35 | 1026 | 515.68 | 0.46 | 1.00 | 1.00 | 55.00 | 1.00 | 16.1 | 10 | 1.14 | 17.3 | 0.418 | 0.238 | 1.0346 | 0.1155 | 0.8119 | 0.148 | 0.65 |
| 54 | 1.0 | 21 | 1065 | 535.66 | 0.39 | 1.00 | 1.00 | 57.00 | 1.00 | 8.2 | 8 | 0.36 | 8.6 | 0.412 | 0.234 | 1.0346 | 0.0862 | 0.8563 | 0.096 | 0.42 | |
| 56 | 1.0 | 32 | 1105 | 555.64 | 0.43 | 1.00 | 1.00 | 59.00 | 1.00 | 13.6 | 8 | 0.36 | 14.0 | 0.407 | 0.231 | 1.0346 | 0.1055 | 0.8203 | 0.126 | 0.56 | |



شکل ۱- تصاویر به ترتیب از چپ به راست چگونگی کاهش نیروی تماس بین دانه‌ای (σ') را نشان می‌دهد. نوار آبی رنگ کنار هر تصویر، نشان دهنده میزان فشار منفذی است. تصویرهای (الف) و (ب) حالت عادی خاک اشباع با نیروهای تماس بین دانه‌ای و تصویر (ج) افزایش فشار منفذی در اثر بارگذاری (ارتعاش‌های زمین‌لرزه) و شناور شدن دانه‌های خاک و به عبارتی افزایش پتانسیل روانگرایی را نشان می‌دهد [After www.ce.washington.edu].

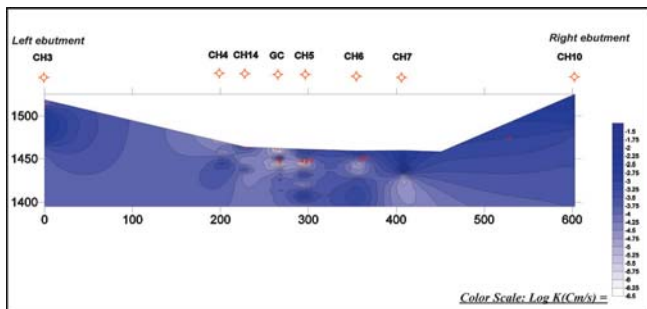


شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت گمانه‌های اکتشافی ساختگاه سد چپرآباد

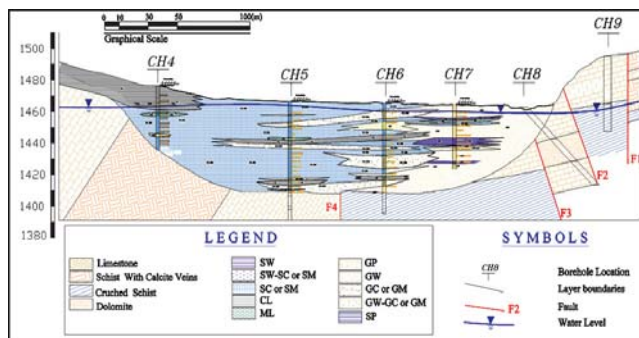


شکل ۴- تغییرات دانه‌بندی نهشته‌های آبرفتی ساختگاه:
(الف) به سمت جناح چپ (ب) به سمت جناح راست

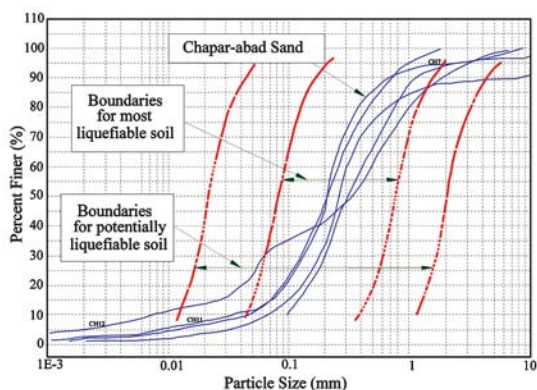
شکل ۳- نمایی از ساختگاه در حال اجرای سد
چپرآباد (دید به سمت تکیه گاه راست)



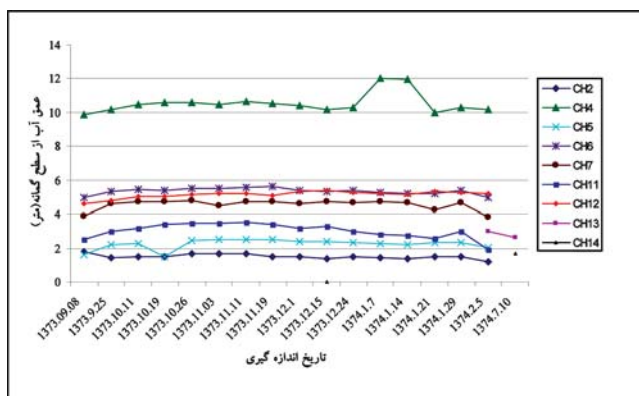
شکل ۶- مقطع هم‌تراوی و تغییرات آبگذری در راستای موازی با محور سد



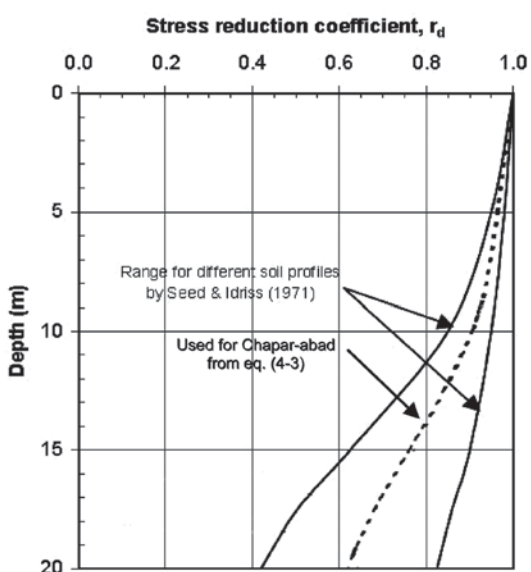
شکل ۵- مقطع زمین‌شناسی موزی با محور سد چپرآباد



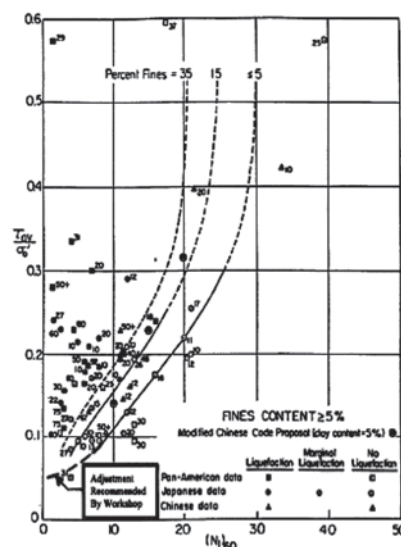
شکل ۸- محدوده دانه‌بندی پی‌آبرفتی ساختگاه سد چپرآباد در پوش دانه‌بندی خاک‌های دارای قابلیت روانگرایی ارائه شده توسط Tsuchida(1971)



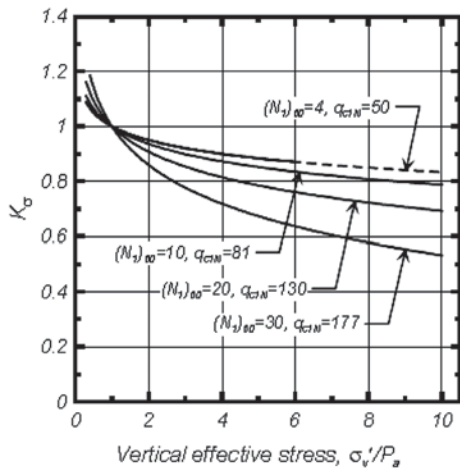
شکل ۷- نمودار آنگاشت سطح آب‌ریز مینی بر اساس مشاهدات گمانه‌های اکتشافی



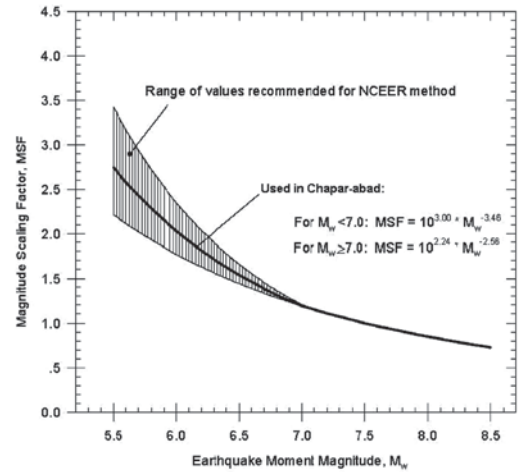
شکل ۱۰- تغییرات مقدار ضریب کاهش تنش با افزایش ژرفا



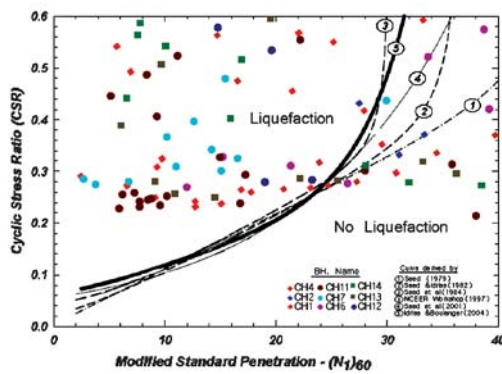
شکل ۹- همبستگی بین تنش دوره‌ای پیش‌بینی شده از زمین‌لرزه (CSR)، عدد $(M=7/5$ برای N_{60}) با محتوای ریزدانه مختلف (Seed et al., 1984) و اصلاح شده بر اساس توصیه گروه NCEER



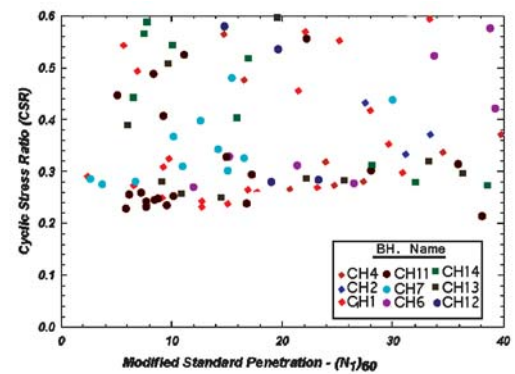
شکل ۱۲- ضریب تصحیح K_{σ} برای فشار روباره زیاد (Idriss & Boulanger, 2004)



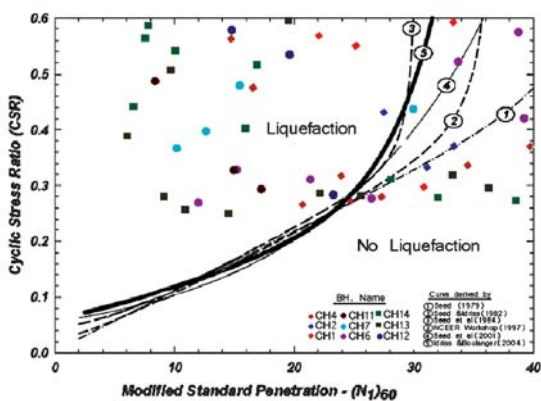
شکل ۱۱- همبستگی بین بزرگی زمین لرزه و ضریب تصحیح بزرگی



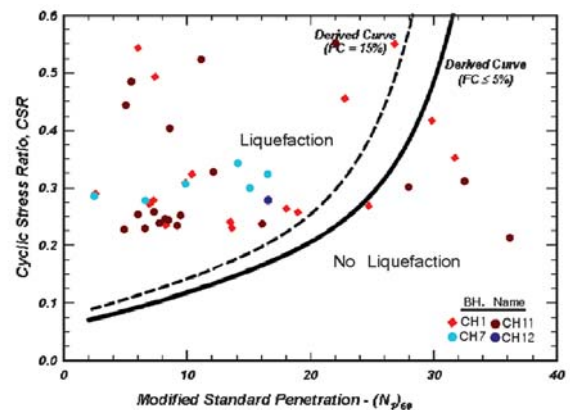
شکل ۱۴- منحنی‌های همبستگی بین $(N_1)_{60}$ و CSR ارائه شده توسط محققان مختلف و داده‌های ساختگاه سد چپرآباد برای بزرگی $M=7/5$ و $\sigma' = 1 \text{ atm}$



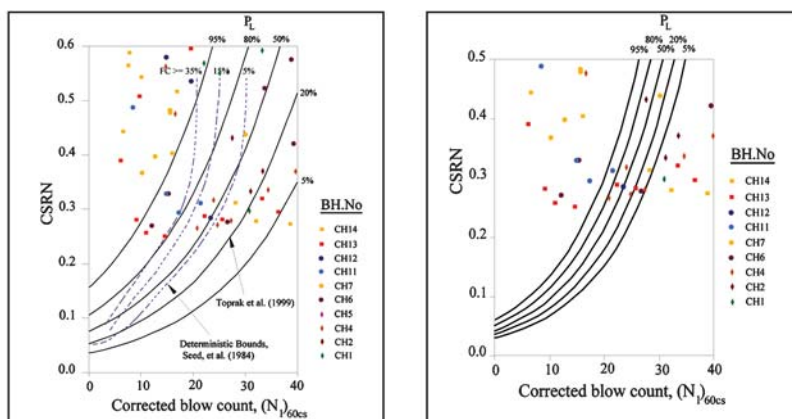
شکل ۱۳- داده‌های مورد استفاده پی‌آبرفتی سد چپرآباد در روابط همبستگی بین $(N_1)_{60}$ و CSR



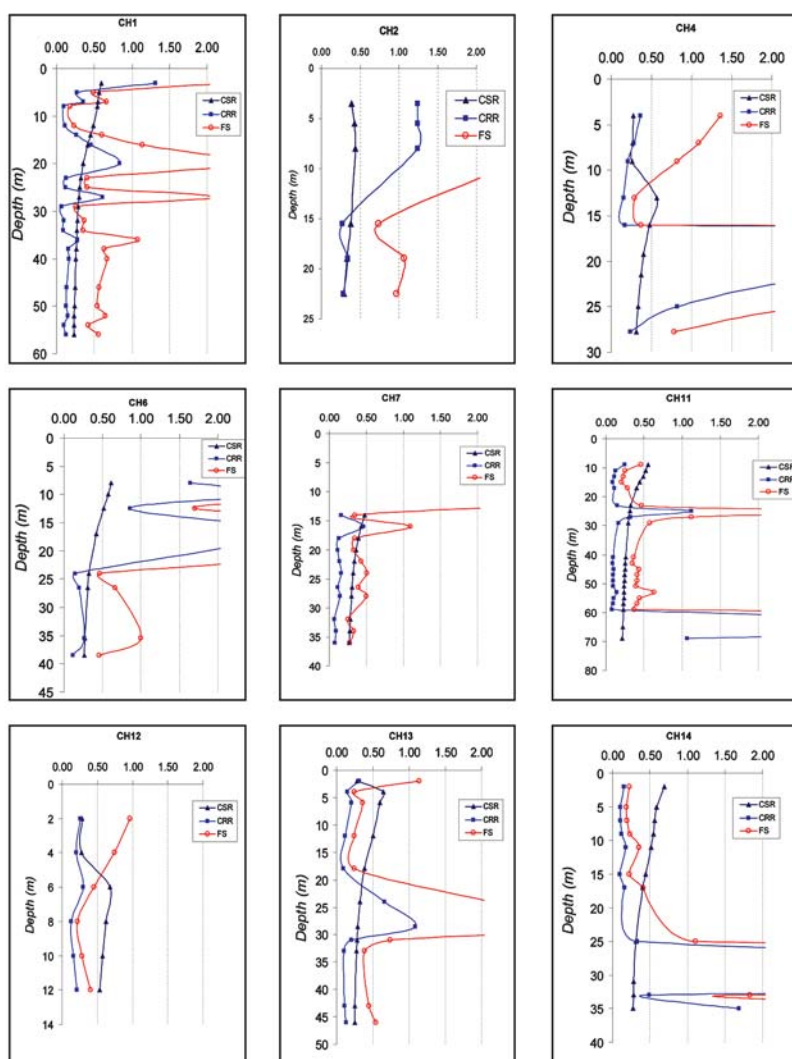
شکل ۱۶- ارزیابی برآورد روانگرایی ساختگاه سد چپرآباد با $FC < 5\%$ و منحنی‌های همبستگی بین $(N_1)_{60}$ و CSR برای $FC < 5\%$ با بزرگی $M=7/5$ و $\sigma' = 1 \text{ atm}$. (Idriss and Boulanger, 2004)



شکل ۱۵- ارزیابی برآورد روانگرایی ساختگاه سد چپرآباد با $FC = 5-15\%$ با منحنی‌های همبستگی بین $(N_1)_{60}$ و CSR برای $FC = 5-15\%$ با بزرگی $M=7/5$ و $\sigma' = 1 \text{ atm}$ ارائه شده توسط Idriss & Boulanger (2004).



شکل ۱۷- ارزیابی احتمال روانگرایی ساختگاه سد چپرآباد با $FC < 5\%$ و منحنی‌های همبستگی بین $(N_1)_{60}$ و $M=7/5$ برای با بزرگی



شکل ۱۸- تغییرات تنش دوره‌ای قابل پیش‌بینی از زمین‌لرزه (CSR) و تنش لازم برای ایجاد روانگرایی (CRR) با افزایش ژرفا در گمانه‌های مختلف ساختگاه سد چپرآباد نسبت به یکدیگر و تغییرات ضریب اطمینان (FS) در مقابل روانگرایی با ژرفا

کتابنگاری

- جلالی، ح.، ۱۳۶۶- «ارزیابی روانگونگی خاکها در زلزله»، مجموعه مقالات اولین سمینار سدسازی ایران. روشن ضمیر، م.ع. و شکرانی، ح.، ۱۳۸۲- «مهندسی پی»، انتشارات مؤسسه علمی دانش پژوهان برین.
- سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۱۳۷۷- «طرح تأمین آب و شبکه‌ی آبیاری و زهکشی دشت نقده؛ مطالعات مرحله‌ی اول؛ جلد دوم؛ گزارش زمین‌شناسی و ژئوتکنیک».
- سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۱۳۸۱- «طرح تأمین آب و شبکه‌ی آبیاری و زهکشی دشت نقده؛ مطالعات مرحله دوم؛ مطالعات ژئوتکنیکی پی آبرفتی سد مخزنی چپرآباد».
- نبوی، ح.، ۱۳۵۵- «دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران»، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

References

- Blake, T. F., 1996 - "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, ASCE.
- Cetin, K. O., 2000 - "SPT - Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation Hazard", Pacific Earthquake Engineering Research Report No. PEER-2000/05
- Christian H. G., 2001 - "A numerical investigation of the seismic response of the aggregate pier foundation system". Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Idriss, I.M. and Boulanger, R. W., 2004 - "Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes" Department of Civil & Environmental Engineering University of California, Davis, Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE.
- Kayen, R. E., 1992 - "Evaluation of SPT, CPT, and Shear Wave-Based Methods for Liquefaction Potential Assessment using Loma Prieta Data", Proceedings of the 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Hamada, M. and O'Rourke, T. D., eds.
- Kramer, S.L., 1996 - "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall. Upper Saddle River.
- Liao, S. S. C. & Whitman, R. V., 1986 - "Catalogue of Liquefaction and Non-liquefaction Occurrences during Earthquakes", Research Report, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Rauch, A.F., 1998 - Personal Communication. (as cited in Youd, T. L. 2001 - "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, ASCE.
- Seed, R. B., 2003 - "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework" 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1967 - "Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake", Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 93(SM3).
- Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1995 - "Ground Motions and Liquefaction During Earthquakes", publication no. 75-95-2.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1971 - "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 97(SM9).
- Sitharam, T.G., 2004 - "Dynamic properties and liquefaction potential of soils" Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India.
- U.S. Army Corps of Engineer Service, 2004 - "Seepage Control", Engineer Manual, EM 1110-2-2300, Dept. of the Army. Office of the Chief of Engineers. Washington, D.C.
- Xenaki V.C. & Athanasopoulos G. A., 2003 - Liquefaction resistance of sand-mixtures: an experimental investigation of the effect of fines. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No.23.
- Youd, 2001 - "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(10).