

A. Cheshmi*

School of Geology, College of
Sciences, University of
Tehran.

e-mail: a.cheshomi@ut.ac.ir

A. Borhani

Faculty of Civil Engineering,
Amir Kabir University of
Technology.

e-mail: ali_borhani@yahoo.com

R. Hosseini

Faculty of Geology, Ferdowsi
University of Mashhad.

e-mail: rezahossini1359@gmail.com

**Determination of modulus of deformation using
engineering geology studies and in situ tests
(Case study)**

The engineering properties of geomaterials are determined by laboratory and In-situ testing. Problems associated with sampling, especially in coarse-grained soils, limit the laboratory testing applications to determine the engineering properties of these types of soils. Engineering geological studies would help in-situ test selection as well as managing of the coast and the validity of test results. To increase the height of the Gotvand regulatory dam, determining deformation modules of subsurface material is needed, so a multistage method has been suggested and done. For this purpose, a multi-step method was proposed and performed. In the first stage, the engineering geological properties of subsurface materials have been investigated by using geological study and exploration borehole data. The subsurface materials are gravel with some sand, silt, and clay. At this stage, to determine the modulus of deformability, pressuremeter (PMT), downhole and crosshole tests were performed. Due to the coarse texture and, heterogeneity of the materials, good results were not obtained from the pressuremeter test. In the second stage and with reference to data in first stage, the extension of same strata beneath the dam has specified in river's left bank and the measurement of deformation modules has done by plate loading test (PLT) using circular plates of 60 cm diameter. In the last stage, to investigate the effect of plate dimensions and particle size, PLT using circular plates of 120 cm diameter has been done. By changing the loading plate diameter from 60 to 120 cm, the average measured modulus decreases from 2868 to 1075 kg/cm². In this paper, while expressing the importance of engineering geology studies in selecting suitable in situ tests, the results obtained from various tests have been reviewed.

Keywords: Plate load test, Downhole and Crosshole test, Coarse-grained soil, In situ tests, Engineering geology.

* Corresponding author

اکبر چشمی*

دانشکده زمین‌شناسی، پردیس
علوم، دانشگاه تهران.
پست الکترونیک:
a.cheshomi@ut.ac.ir

علی برهانی

دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
پست الکترونیک:
ali_borhani@yahoo.com

رضا حسینی

دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه
فردوسی مشهد.
پست الکترونیک:
rezahossini1359@gmail.com

تعیین مدول تغییر شکل پذیری با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و آزمایش‌های برجا (مطالعه موردی)

تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری مصالح با آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. مشکلات مربوط به تهیه نمونه، به‌خصوص در مصالح درشت‌دانه، کاربرد آزمایش‌های آزمایشگاهی در تعیین ویژگی‌های مهندسی مصالح را محدود نموده است. بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی ضمن کمک به انتخاب آزمایش برجای مناسب، باعث مدیریت هزینه و افزایش اعتبار نتایج آزمایش‌ها می‌گردد. به منظور افزایش ارتفاع سد تنظیمی گتوند نیاز به تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری خاک زیر پی سد می‌باشد، بدین منظور روشی چند مرحله‌ای پیشنهاد و انجام شد. در مرحله اول با تلفیق مطالعات زمین‌شناسی، محدوده مورد مطالعه و اطلاعات به‌دست آمده از حفر چند گمانه اکتشافی، از روی تاج سد، مشخصات زمین‌شناسی مهندسی لایه‌های زیرسطحی زیر پی سد تعیین شد. مصالح زیرسطحی شن همراه با مقادیری ماسه، سیلت و رس است. در این مرحله برای تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری، آزمایش پرسیمتری، دانپول و کراس‌هول در داخل گمانه‌ها انجام شد. به‌دلیل یافت درشت‌دانه، ناهمگنی و ریزشی بودن مصالح، نتایج مناسبی از آزمایش پرسیمتری به‌دست نیامد. در مرحله دوم با بررسی‌های میدانی در مصالح حاشیه رودخانه، تلاش شد لایه‌های نظیر قرار گرفته در زیر سد در ساحل رودخانه شناسایی و آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه دایره‌ای به قطر ۶۰ سانتیمتر انجام و مدول تغییر شکل‌پذیری مصالح در کرنش‌های بالا تعیین شد. با توجه به بافت درشت‌دانه مصالح به منظور در نظر گرفتن اثر ابعاد صفحه بارگذاری و اندازه دانه‌ها، در مرحله سوم آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه دایره‌ای به قطر ۱۲۰ سانتیمتر انجام و مشخص گردید که با تغییر قطر صفحه بارگذاری از ۶۰ به ۱۲۰ سانتیمتر، میانگین مدول اندازه‌گیری شده از ۲۸۶۸ به ۱۰۷۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع کاهش می‌یابد. در این مقاله، ضمن بیان اهمیت مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در انتخاب آزمایش‌های برجای مناسب، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: بارگذاری صفحه، آزمایش دانپول و کراس‌هول، خاک درشت‌دانه، آزمایش‌های برجا، زمین‌شناسی مهندسی.

نمونه مناسب برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی باعث شده که محققین برای اندازه‌گیری دقیق پارامترهای مهندسی مصالح از آزمایش‌های برجا استفاده نمایند. انتخاب نوع آزمایش برجا علاوه بر مقاصد طراحی به بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی وابسته است. تپل^۱ (۲۰۰۹) یکی از فعالیت‌های اصلی زمین‌شناسی مهندسی

۱- مقدمه

تعیین پارامترهای مهندسی مصالح با آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا^۱ امکان‌پذیر است. محدودیت تهیه

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸

(DOI): 10.22091/cer.2020.6117.1217 شناسه دیجیتال

1- In situ Test

2- Tepel

دانه‌ها، ماتریکس بین دانه‌ها، سن رسوبات و تراز قرارگیری آنها است [۷]. در سال ۲۰۰۹ پژوهشگران، خصوصیات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی زیرسطحی خاک‌های شهر بوردیوکس^۴ در فرانسه را به‌صورت مدل‌های سه‌بعدی کاربردی در برنامه‌ریزی‌های شهری توسعه دادند [۸]. محققان دیگری، دلیل تنوع خصوصیات ژئوتکنیکی رس‌های بندر بوسان^۵ را محیط رسوبی و تغییرات سطح آب عنوان کردند. برخی محققین از ترکیب اطلاعات ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک و تولید نقشه‌هایی با مقاصد کاربردی مختلف برای برنامه‌ریزی‌های شهری استفاده کردند [۱۰-۱۲]. چشمی و همکاران (۱۳۹۷) با برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعات میدانی و مقایسه آنها با نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و برش مستقیم برجا^۶ آبرفت‌های درشت‌دانه شمال تهران را به چند زیرگروه تقسیم کرده و برای هرکدام با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهاد دادند [۱۳]. محمدی و همکاران (۲۰۲۰) یک طبقه‌بندی زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی برای شهر اصفهان بر مبنای برداشت‌های زمین‌شناسی و آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی معرفی کردند. در این طبقه‌بندی امکان تخمین ویژگی‌های ژئوتکنیکی بخشی از رسوبات گسترده شهر اصفهان براساس برداشت‌های زمین‌شناسی وجود دارد. [۱۴]. فوکز^۷ (۱۹۷۷) به تأثیر مستقیم نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی در کاهش هزینه‌های پروژه‌ها اعتقاد دارد [۱۵]. ترزاقی^۸ معتقد است هرچند بیشتر شاخه‌های زمین‌شناسی به علوم مهندسی ارتباط ندارند ولی برخی حقایق کلیدی^۹ در ارتباط بین زمین‌شناسی و پروژه‌های عمرانی وجود دارد [۱۶].

را زمین‌شناسی مهندسی ویژگی‌های ساختگاه معرفی می‌نماید [۱]. ارزیابی زمین‌شناسی مهندسی، اهمیت داده‌های زمین‌شناسی را برای مهندس ژئوتکنیک یا طراح نشان می‌دهد. بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی می‌تواند قسمتی مهم در ارزیابی مناسب و کافی زمین، برای اهداف مهندسی و برنامه‌ریزی باشد [۲ و ۳]. بوک^۳ (۲۰۰۹) توصیف ویژگی‌های سایت نظیر لایه‌بندی، ساختارهای زمین‌شناسی، آب زیرزمینی و فرایندهای مرتبط با مهندسی را جزو فعالیت‌های مهندس زمین‌شناس می‌داند. این امر با روش‌ها و متدهای بررسی سطحی و زیرسطحی انجام می‌شود. وی معتقد است انتخاب روش مناسب از نقطه‌نظر قابلیت‌ها و ویژگی‌های هر روش متناسب با اهداف مورد نظر از فعالیت‌هایی مرتبط با زمین‌شناسی مهندسی است [۴]. فاخر و همکاران (۲۰۰۷) معتقدند با ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های آزمایش‌های برجا امکان ارائه ارزیابی سریع و دقیقی از خصوصیات ژئوتکنیکی آبرفت‌ها فراهم می‌گردد. بر این اساس، آنها طبقه‌بندی جدیدی برای آبرفت‌های گسترده تهران ارائه دادند که براساس آن می‌توان با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، برخی ویژگی‌های مهندسی آبرفت‌ها را تخمین زد [۵]. صمدیان و فاخر (۲۰۱۶) از این ایده استفاده کرده و بر این اساس چهارچوبی برای ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی شهر سنندج، جهت استفاده در برنامه‌ریزی و طراحی ساخت‌وساز شهری پیشنهاد دادند [۶]. چشمی (۱۳۸۵) با بررسی طبقه‌بندی‌های زمین‌شناسی آبرفت‌های تهران، تعدادی آزمایش برجا و آزمایشگاهی برای شناسایی خواص مهندسی آنها، انجام داد و طبقه‌بندی جدیدی مبتنی بر اضافه کردن داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا به طبقه‌بندی‌های زمین‌شناسی ارائه کرد. ویژگی طبقه‌بندی جدید، تخمین سریع پارامترهای ژئوتکنیکی آبرفت‌های گسترده تهران براساس شکل دانه‌ها، اندازه

4- Bordeaux

5- Busan

6- In situ Direct Shear Test

7- Fookes

8- Terzaghi

9- Key essential facts

3- Bock

تغییر شکل پذیری پیشنهاد و نتایج آن در این مقاله ارائه شده است.

روش‌های استفاده شده در تحقیق حاضر، شامل برداشت‌های زمین‌شناسی و بررسی‌های میدانی، آزمایش‌های برجا شامل آزمایش پرسیومتری^{۱۱}، آزمایش دانه‌پول^{۱۲}، کراس‌هول^{۱۳} و آزمایش بارگذاری صفحه^{۱۴} است. این آزمایش‌ها به ترتیب براساس استاندارد ASTM شماره‌های D4719-94، D7400-08، D4428-00 و D1194-00 انجام شد [۱۸-۲۱].

مطالعات در سه مرحله به شرح زیر طرح‌ریزی و انجام گردید:

- مرحله اول: در این مرحله بررسی‌های زمین‌شناسی با هدف شناسایی لایه‌های زیرسطحی در منطقه انجام شد. برای دستیابی به این هدف، دو گمانه اکتشافی با نمونه‌گیری ممتد^{۱۵} از روی تاج سد، حفر و آزمایش پرسیومتری، دانه‌پول و کراس‌هول در داخل گمانه‌ها انجام شد. به دلیل عدم اخذ نتایج مناسب از آزمایش پرسیومتری که ناشی از ریزش‌های ممتد جداره گمانه بود، امکان تعیین مستقیم مدول تغییر شکل پذیری فراهم نگردید. بر این اساس، مرحله دوم شناسایی‌های ژئوتکنیکی انجام گردید.

- مرحله دوم: این مرحله با هدف مشابه‌سازی شرایط زیرسطحی موجود در زیر سازه سد با شرایط زیرسطحی سواحل سد و انجام آزمایش بارگذاری صفحه در سواحل سد طرح‌ریزی و انجام شد. در این راستا با توجه به نمونه‌های شناسایی شده از داخل گمانه‌های حفر شده مرحله اول، جنس خاک زیر پی تعیین و سپس در نقاط مختلفی در

اهمیت تأثیرگذاری دانش زمین‌شناسی مهندسی در پروژه‌های عمرانی زمانی روشن‌تر می‌شود که به دلیل شرایط انجام پروژه، امکان اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای مهندسی در محل ساختگاه وجود نداشته باشد. در این صورت نقش زمین‌شناسی مهندسی در ایجاد شباهت‌ها و تفاوت‌های لازم بین ساختارهای موجود در محل و ساختارهای مشابه به منظور ایجاد انطباق‌های لازم حائز اهمیت می‌شود.

در این مقاله، با مطالعه موردی یک پروژه به اهمیت نقش زمین‌شناسی مهندسی جهت ایجاد انطباق‌های لازم و برنامه‌ریزی آزمایش‌های برجا جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری آبرفت درشت‌دانه پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

مقاله حاضر، محصول یک کار تجربی و به صورت مطالعه موردی است. ساختگاه مورد مطالعه، ساختگاه سد تنظیمی گتوند است. از نظر جغرافیایی سد تنظیمی گتوند در استان خوزستان، شهرستان شوشتر، در محدوده جغرافیایی طول‌های شرقی ۴۸ درجه و ۵۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۵۶ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۲ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه قرار گرفته است. ساخت سد در سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۵ انجام شده و هدف از احداث آن تنظیم و انحراف آب رودخانه کارون برای استفاده پایین‌دست بوده است. برای افزایش قابلیت‌های سد و احداث نیروگاه، بررسی امکان افزایش ارتفاع سد هدف‌گذاری شده است [۱۷]. یکی از پارامترهای تعیین کننده برای رسیدن به این هدف، مدول تغییر شکل پذیری^{۱۰} مصالح زیرسطحی است. بر این اساس یک روش چند مرحله‌ای با تکیه بر دانش زمین‌شناسی مهندسی و انجام آزمایش‌های برجا برای تعیین مدول

¹¹- Pressurimeter Test

¹²- Down Hole

¹³- Cross Hole

¹⁴- Plate Load Test

¹⁵- Continues Coring

¹⁰- Deformation Modulus

۳-۱- مدل زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه

ساختگاه سد از لحاظ تقسیم‌بندی زمین‌شناسی در مرز پهنه‌های زاگرس چین‌خورده و دشت خوزستان قرار گرفته، لیکن ویژگی‌های محدوده ساختگاه از خصوصیات زاگرس چین‌خورده تبعیت می‌کند. سازندهای رخنمون یافته در محدوده گتوند به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

محل سد بر روی مصالح آبرفتی بستر رودخانه کارون قرار گرفته که سازند کنگلومرای بختیاری را پوشانده است. ضخامت رسوبات در جناح راست سد حدود ۳۲/۵ و در محل سد و سرریز حدود ۲۵/۵ متر و در جناح چپ حدود ۴۲/۵ متر (آبرفت‌های ناهمگن درشت‌دانه) گزارش شده است [۱۷]. در زیر این آبرفت‌ها کنگلومرای سازند بختیاری قرار دارد که غالباً قطعات آن از سنگ‌های آهکی تشکیل شده و دارای حفرات انحلالی است. در پایین‌دست سد ناحیه‌ای نسبتاً مسطحی وجود دارد که شامل دشتی آبرفتی با بیرون‌زدگی‌های بسیار جزئی از سنگ کف منطقه است. به منظور مشخص نمودن مدل زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه، ۲ گمانه ۵۰ متری بر روی تاج سد حفاری گردید، محل این گمانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است (گمانه‌های S1 و S2).

بر اساس نتایج به‌دست آمده از برداشت‌های صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های به‌دست آمده، پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مصالح در امتداد محور سد تهیه و در شکل ۲- الف ارائه شده است. با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و داده‌های به‌دست آمده از حفر ۹ چاهک دستی، نسبت به حفر ۷ گمانه اکتشافی در ساحل چپ پایین‌دست سد اقدام نموده و پس از بررسی صحرایی و آزمایشگاهی نمونه‌های اخذ شده از این گمانه‌ها پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مصالح در ساحل چپ رودخانه در پایین‌دست سد تهیه شد که در شکل ۲- ب نشان داده شده است. شماره گمانه‌های حفر شده عبارتند از: P1, LBI, 2, 3 و

سواحل محدوده ساختگاه سد ۹ چاه دستی به منظور رسیدن به لایه‌ای مشابه لایه خاک زیر بستر، حفر گردید. پس از مشخص شدن چند لایه که جنس مصالح مشابهی با مصالح زیر سد داشتند، درون چاهک‌ها ۴ آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه به قطر ۶۰ سانتیمتر انجام شد. علاوه بر این در اطراف چاهک‌ها ۷ گمانه اکتشافی حفر و درون گمانه‌ها آزمایش دانه‌پول و کراس‌هول انجام شد. آزمایش بارگذاری صفحه در این مرحله با هدف تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری مصالح و آزمایش دانه‌پول با هدف تعیین سرعت موج برشی^{۱۶} جهت اندازه‌گیری مدول تغییرشکل‌پذیری در کرنش‌های پایین و بررسی تغییرات احتمالی جزئی بین ویژگی‌های مصالح زیر بستر سد و مصالح شناسایی شده در سواحل سد انجام گرفت.

- مرحله سوم: در این مرحله به منظور بررسی تأثیر ابعاد صفحه بارگذاری بر نتایج به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه، این آزمایش با صفحه بزرگ به قطر ۱۲۰ سانتیمتر داخل ترانشه‌های ایجاد شده و در عمق ۱/۵ متر انجام گردید.

بنابراین مراحل طراحی شده در انجام این مطالعات مبتنی بر برداشت‌های مداوم و پیوسته زمین‌شناسی و طراحی آزمایش‌های برجا متناسب با شرایط زمین‌شناسی و نتایج به‌دست آمده از هر مرحله است. با توجه به عدم امکان انجام آزمایش مستقیم برای تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری مصالح زیر سد، این برنامه سه مرحله امکان شبیه‌سازی مصالح را با مصالح موجود در حاشیه رودخانه فراهم کرده، ضمن اینکه تا حد زیادی اثر عوامل تأثیرگذار بر نتایج را کاهش داده است.

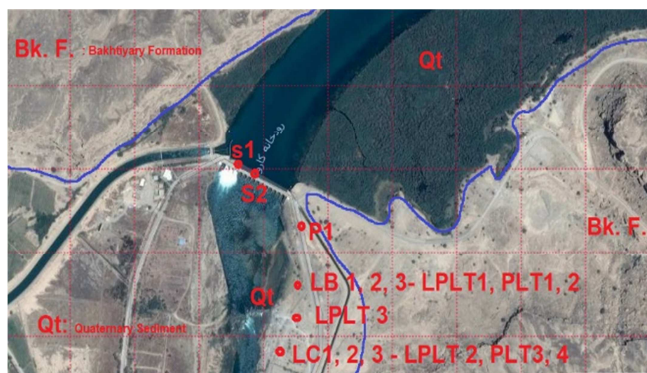
۳- نتایج

¹⁶- Shear Wave Velocity

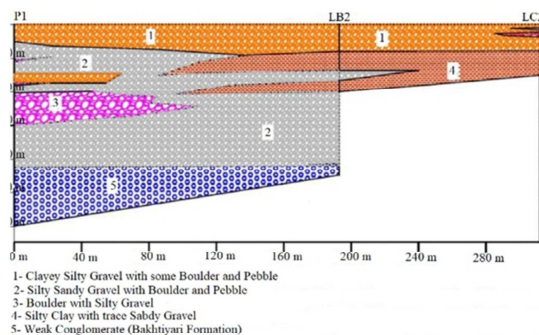
LC1,2,3 که موقعیت آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- سازندهای سنگی موجود در منطقه مورد مطالعه

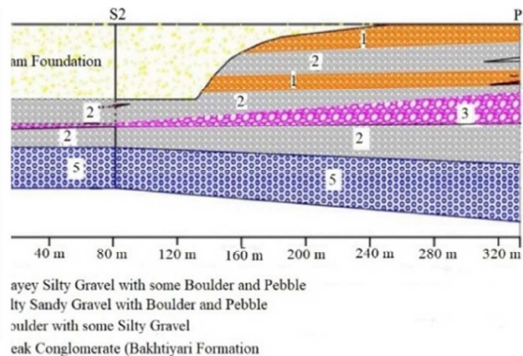
توصیف زمین شناسی	سازند	دوران زمین شناسی
آبرفت که شامل رسوبات اخیر و رسوبات قدیمه که سیمانته شده‌اند.	-	کواترنری
کنگلومرها همراه با ماسه سنگ و سیلتستون	بختیاری	پلیوسن بالایی تا پلیستوسن
مارن، گل سنگ، ماسه سنگ و کنگلومرها	-	پلیوسن زیرین
مارن، گل سنگ و ماسه سنگ	آجاجاری	میوسن بالایی تا پلیوسن زیرین
انیدرید، ژیپس، نمک و گل سنگ (دارای خواص پلاستیک به دلیل وجود لایه‌های نمک)	گچساران	میوسن زیرین



شکل ۱- موقعیت سد و محل گمانه‌ها و آزمایش‌های برجای انجام شده



(ب)



(الف)

شکل ۲- پروفیل زمین شناسی مصالح در (الف) امتداد محور سد و (ب) ساحل چپ پایین دست سد

شنی همراه با سیلت و ماسه وجود دارد. با حرکت به سمت پایین دست سد لایه‌های ریزدانه سیلت رسی در بین لایه‌های شنی مشاهده شده است.

۲-۳- آزمایش دانه‌پول و کراس‌هول

آزمایش‌های دانه‌پول در ساحل چپ تا عمق ۱۵ متر و در روی سد تا عمق حدود ۱۷ متر از بستر انجام شد. با

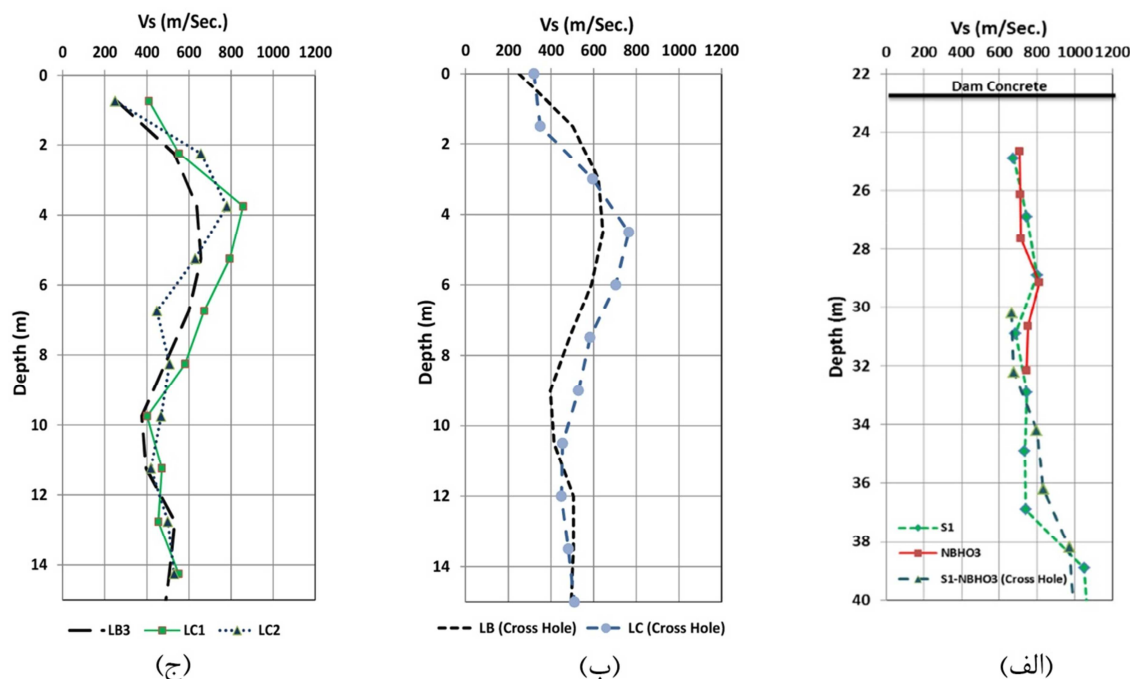
در محل محور سد ضخامت بتن ۲۲/۷۰ متر و سنگ بستر در عمق ۳۷/۵۰ متری از روی تاج سد قرار گرفته است. جنس سنگ بستر کنگلومرای متخلخل سازند بختیاری است. جنس غالب آبرفت شن همراه با سیلت و ماسه بوده که در بخش‌های زیرین آن قطعات سنگی درشت مشاهده شده است. در ساحل چپ پایین دست رودخانه از سطح زمین تا سنگ کف، مصالح درشت‌دانه

حدود ۰/۳ است. بر این اساس، مدول تغییرشکل‌پذیری دینامیکی هریک از لایه‌ها با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۱۰]:

$$E_{dyn} = 2\rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، E_{dyn} مدول تغییرشکل‌پذیری دینامیکی (Pa)، ρ چگالی خاک (kg/m^3)، V_s سرعت موج برشی (m/s) و ν ضریب پواسون است. بنابراین، مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری دینامیکی هریک از لایه‌ها به ترتیب برابر با ۲۹۹۰، ۳۵۴ و ۲۲۶۵ مگاپاسکال تعیین شد.

توجه به محدوده تحت تأثیر تنش ناشی از آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه‌ای به قطر ۱۲۰ سانتیمتر عمق این آزمایش‌ها در ساحل چپ در جهت اطمینان تا ۱۵ متر انتخاب شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل، میانگین سرعت موج برشی در مصالح درشت‌دانه زیر سد حدود ۷۴۰ متر بر ثانیه، برای مصالح مشابه در ساحل چپ تا عمق ۱/۵ متر حدود ۲۷۵ متر بر ثانیه و از عمق ۱/۵ تا ۱۰ متر حدود ۶۶۰ متر بر ثانیه است. برای مصالح مذکور، چگالی به ترتیب ۲۱۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون



شکل ۳- تغییرات سرعت موج برشی با عمق، (الف) در زیر محور سد (گمانه NBHO3 از قبل بر روی تاج سد وجود داشته که برای انجام آزمایش لرزهای درون گمانه‌ای از آن استفاده شده است). (ب) در ساحل چپ رودخانه در پایین‌دست با روش کراس هول و (ج) در ساحل چپ رودخانه در پایین‌دست با روش دانپول.

دلیل انتخاب این عمق، شباهت مصالح زیرسطحی، امکان‌پذیری انجام آزمایش و حذف اثر لایه‌های سست سطحی است. برای تأمین سربار به میزان ۴۰ تن از یک دامپتراک^{۱۷} استفاده شد. به منظور تأمین فضای کافی جهت استقرار دامپتراک و همچنین کاهش اثر ناشی از

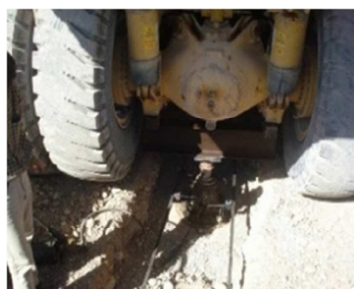
۳-۳- آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه‌ای به قطر ۶۰ سانتیمتر

آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه‌ای به قطر ۶۰ سانتیمتر در عمق ۱/۵ متر از سطح زمین انجام گردید. محل‌های انجام این آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است (PLT3,4 و PLT1,2).

¹⁷- Dump Turk

آزمایش نشان داده شده است. آزمایش بارگذاری صفحه در ۴ نقطه در مجاورت گمانه‌های LB و LC انجام شد.

خاکبرداری، گودالی به عرض ۴ و طول ۹ متر در محل انجام آزمایش حفر گردیده است. در شکل ۴ مراحل انجام



(ب)



(الف)

شکل ۴- مراحل آماده‌سازی و انجام آزمایش بارگذاری صفحه با قطر ۶۰ سانتیمتر، (الف) آماده‌سازی محل، نصب جک بارگذاری و استقرار سرپار و (ب) استفاده از دامپتراک برای تأمین عکس‌العمل

عددی نسبت به مقادیر به‌دست آمده از رابطه (۲) را نشان می‌دهد.

جهت محاسبه مدول تغییرشکل‌پذیری از رابطه (۲)

استفاده گردید [۲۱]:

$$E = \frac{Q}{\delta D} (1 - \nu^2) \times I \quad (2)$$

در این رابطه، E مدول تغییرشکل‌پذیری، Q نیروی قائم، δ نشست متناظر با نیروی قائم، D قطر صفحه، ν ضریب پواسون و I ضریب اصلاحی است. با در نظر گرفتن شیب بخش خطی منحنی بار-نشست، نسبت Q/δ تعیین و با مشخص بودن قطر صفحه (D=60 & 120 cm) و ضریب پواسون $\nu=0.3$ و ضریب اصلاحی $I=1$ ، مدول تغییرشکل‌پذیری تعیین شد. به منظور در نظر گرفتن اثر خاکبرداری و همچنین حضور دامپتراک، نحوه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با در نظر گرفتن ابعاد صفحه، عمق گود و تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده، با استفاده از مدل‌سازی توسط نرم افزار پلکسیس سه بعدی^{۱۸} تحلیل و با آنالیز برگشتی، مدول تغییرشکل‌پذیری مصالح نیز تعیین گردید.

جدول ۲- خلاصه نتایج آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه‌ای به قطر ۶۰ سانتیمتر

شماره آزمایش	مدول تغییرشکل‌پذیری (kg/cm^2)	
	براساس فرمول (۲)	براساس مدل‌سازی
PLT1	۳۲۵۷	۳۵۹۶
PLT2	۲۷۷۶	۳۰۷۱
PLT3	۳۱۳۹	۳۴۶۷
PLT4	۲۳۰۰	۲۵۳۵

۳-۴- آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه‌ای به قطر ۱۲۰

سانتیمتر

به‌دلیل وجود قطعات درشت‌دانه و به جهت بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها بر نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در مرحله سوم مطالعات، آزمایش بارگذاری صفحه بزرگ‌مقیاس انجام شد. در این آزمایش از صفحه دایره‌ای به قطر ۱۲۰ سانتیمتر استفاده گردید. جهت رسیدن به سطح تنش مورد نظر، عکس‌العملی معادل ۱۶۰ تن تأمین شد. تأمین چنین نیرویی با استفاده از سرپار متعارف غیرممکن بوده، بنابراین از شمع‌های کششی و تیر بارگذاری استفاده شد. مراحل انجام این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.

در جدول ۲ مدول‌های تغییرشکل به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری براساس دو روش مختلف ارائه شده است. مقایسه نتایج ضمن بیان تطابق خوب بین دو روش، افزایش ۱۰ درصدی مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی

¹⁸- Plaxis 3D



(ب)

(الف)

شکل ۵- آماده سازی سیستم بارگذاری صفحه بزرگ مقیاس با استفاده از صفحاتی به قطر ۱۲۰ سانتیمتر، (الف) حفر چاهک و اجرای شمع های کششی برای ایجاد تکیه گاه و (ب) نصب تیر بارگذاری به همراه تجهیزات آزمایش

با استفاده از رابطه (۲) را نشان می دهد. بنابراین با افزایش قطر صفحه، اختلاف بین مقادیر به دست آمده از رابطه (۲) و مدول سازی عددی افزایش یافته است.

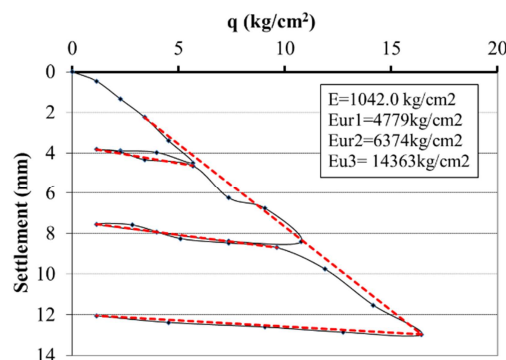
جدول ۳- خلاصه نتایج آزمایش بارگذاری صفحه با صفحه ای به قطر ۱۲۰ سانتیمتر

مدول تغییر شکل پذیری (kg/cm^2)		شماره آزمایش
بر اساس مدول سازی	بر اساس رابطه (۲)	
۱۴۳۱	۱۱۰۸	LPLT1
۱۳۷۷	۱۰۴۲	LPLT2

۴- تجزیه و تحلیل

بررسی های زمین شناسی مهندسی صورت گرفته در منطقه به همراه اطلاعات به دست آمده از حفر چاهک های دستی و مقایسه پروفیل های زمین شناسی مهندسی زیر سد و ساحل چپ نشان می دهد که امکان مشاهده خاک زیر سد در ساحل چپ پایین دست وجود دارد. هر چند یافته های زمین شناسی مهندسی شباهت بین مصالح زیر سد و مصالح ساحل چپ پایین دست را نشان می دهد، ولی نتایج آزمایش تعیین سرعت موج برشی نشان دهنده اختلاف سرعت بین این مصالح است. این اختلاف برای مصالح قرار گرفته از سطح زمین تا عمق ۱/۵ متر ساحل چپ ناشی از تاریخچه تنش (بارگذاری ناشی از وزن سد ساخته شده) و هوازدگی بوده و برای مصالح قرار گرفته از عمق ۱/۵ تا ۱۰ متر به دلیل تاریخچه تنش و برای عمق بیشتر از ۱۰ متر به دلیل تغییر در جنس مصالح (لایه شماره ۴ در شکل ۲- الف) است.

آزمایش بارگذاری صفحه بزرگ مقیاس در مجاور نقاط آزمایش بارگذاری صفحه ۶۰ سانتیمتر انجام گردید. این نقاط در شکل ۱ با علائم LPLT1, LPLT2 مشخص شده است. نمودار تغییرات بار- نشست برای یکی از آزمایش های بارگذاری انجام شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین با استفاده از رابطه (۲)، مدول تغییر شکل پذیری محاسبه و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. مشابه روشی که برای آزمایش بارگذاری با صفحه به قطر ۶۰ سانتیمتر گفته شد نتایج آزمایش بارگذاری صفحه بزرگ مقیاس با استفاده از مدول سازی توسط نرم افزار پلکسیس سه بعدی نیز تحلیل و مقادیر به دست آمده از این تحلیل در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۶- منحنی بار - نشست در آزمایش بارگذاری صفحه ای LPLT2

مقایسه نتایج به دست آمده از رابطه (۲) و مدول سازی عددی، افزایش ۳۰ درصدی مقادیر اندازه گیری شده در مدول سازی عددی نسبت به مقادیر محاسبه شده

در ساحل چپ شده است. آزمایش‌های بارگذاری صفحه در عمق ۱/۵ متر از سطح زمین در ساحل چپ سد انجام گردیده، بنابراین عمق تحت تأثیر بار اعمال شده (منطقه حباب تنش) حداکثر ۷/۵ متر نسبت به محل قرارگیری صفحه بارگذاری است. منحنی تغییرات سرعت موج برشی با عمق (شکل ۲- الف)، میانگین سرعت موج برشی در عمق تحت تأثیر صفحه بارگذاری را حدود ۶۶۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. از طرف دیگر، میانگین سرعت موج برشی در مصالح زیر سد حدود ۷۴۰ متر بر ثانیه تعیین شده، با توجه به شباهت خاک دو محل تفاوت سرعت موج برشی ناشی از تفاوت تاریخچه تنش در دو محل است. خاک زیر سد به دلیل بار ناشی از سد، فشرده‌تر شده و سرعت موج برشی در آن ۱/۱۲ برابر خاک ساحل چپ است. با توجه به اینکه مدول تغییرشکل‌پذیری با توان دوم سرعت موج برشی رابطه مستقیم دارد [۱۰]، بنابراین می‌توان انتظار داشت که مدول تغییرشکل‌پذیری مصالح زیر بستر سد ۲۵٪ بیشتر از مدول تغییرشکل‌پذیری محاسبه شده برای مصالح ساحل چپ باشد. بر این اساس مدول تغییرشکل‌پذیری مصالح زیر سد ۱۷۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع پیشنهاد شد.

با توجه به اینکه در ساحل چپ پایین‌دست رودخانه آزمایش تعیین سرعت موج برشی و بارگذاری صفحه صورت گرفته، بنابراین امکان مقایسه مدول تغییرشکل‌پذیری در کرنش‌های پایین و بالا وجود دارد. بر این اساس، نسبت مدول تغییرشکل‌پذیری اندازه‌گیری شده در کرنش‌های پایین به کرنش‌های بالا حدود ۱۷ می‌باشد. نسبت مدول تغییرشکل‌پذیری در کرنش‌های بالا و پایین قبلاً توسط چشمی (۱۳۸۵) برای بخشی از آبرفت‌های درشت‌دانه تهران بین ۱۲ تا ۱۶ گزارش شده است [۱].

۵- نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری صفحه با ابعاد ۶۰ و ۱۲۰ سانتیمتر نشان می‌دهد که مدول تغییرشکل‌پذیری به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری با صفحه ۶۰ سانتیمتری حدود ۲/۷ برابر مقدار اندازه‌گیری شده از آزمایش با صفحه ۱۲۰ سانتیمتری است. این موضوع نشان‌دهنده اثر اندازه دانه‌ها بر نتایج به‌دست آمده است. بنابراین توجه به ابعاد صفحه بارگذاری در مقایسه با بزرگترین بعد دانه‌ها بسیار حائز اهمیت است. استفاده از صفحات با ابعاد کوچک برای مصالح درشت‌دانه مقادیر بزرگتری برای مدول تغییرشکل از مقدار واقعی به‌دست می‌دهد.

جهت پیشنهاد مدول تغییرشکل‌پذیری با توجه به بافت مصالح از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه به قطر ۱۲۰ سانتیمتر به همراه روش مقایسه‌ای استفاده گردید. خاک زیر سد با خاک محل آزمایش بارگذاری (ساحل چپ) از نظر طبقه‌بندی مقایسه شد. خاک قرار گرفته در زیر سد خاکی شنی همراه با ماسه سیلتی است. خاکی که در ساحل چپ آزمایش بارگذاری بر روی آن انجام گرفته خاک شنی همراه با رس سیلتی است. در جدول ۴ این دو خاک از نقطه‌نظر توزیع اندازه ذرات و شاخص خمیری مقایسه شده‌اند. بر این اساس، خاک زیر سد با خاک محل آزمایش بارگذاری از نظر طبقه بندی مشابه هستند.

جدول ۴- مقایسه توزیع اندازه ذرات و شاخص خمیری لایه ۱ و ۲ زیر بستر سد و ساحل چپ پایین‌دست

لایه دو	لایه ۱	
GC-GM	GM	طبقه بندی متحد
۵۲	۶۰	درصد شن و بزرگتر
۲۲	۲۶	درصد ماسه
۳۰	۱۴	درصد سیلت و رس
۵	-	شاخص خمیری

خاک دو محل از نظر تاریخچه تنش با هم متفاوت هستند. خاک زیر سد به دلیل بار ناشی از احداث سد در دوره زمانی ۴۰ ساله (از زمان ساخت تا زمان انجام آزمایش) متحمل تنش بیشتری نسبت به خاک قرار گرفته

- نسبت مدول تغییرشکل‌پذیری در کرنش‌های پایین (به‌دست آمده از آزمایش‌های تعیین سرعت موج برشی) به مدول تغییرشکل‌پذیری در کرنش‌های بالا (به‌دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه) در مصالح درشت‌دانه برای خاک این منطقه حدود ۱۷ می‌باشد.

- مقایسه نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه با صفحات به قطر ۶۰ و ۱۲۰ سانتیمتر نشان‌دهنده تأثیر اندازه دانه‌ها بر مدول تغییرشکل‌پذیری اندازه‌گیری شده می‌باشد به نحوی که در این مطالعه با کاهش قطر صفحه بارگذاری از ۱۲۰ به ۶۰ سانتیمتر افزایش ۲/۷ برابری در مدول تغییرشکل‌پذیری به‌وجود آمده است.

قدردانی

از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران و مؤسسه مهندسیین مشاور ساحل به خاطر همکاری در تهیه این مقاله تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

هدف اصلی از انجام مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در این ساختگاه، تعیین دقیق مدول تغییرشکل‌پذیری خاک زیر پی سد ساخته شده می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده در این مقاله می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

- نقش زمین‌شناسی مهندسی به‌عنوان یک فعالیت اصلی در شناسایی‌های ساختگاه به منظور تعیین و تشخیص دقیق شرایط زمین‌شناسی و ایجاد انطباق بین وضعیت‌های زیرسطحی در محل‌هایی که امکان شناسایی‌های مستقیم وجود ندارد، حائز اهمیت است.

- مقایسه نتایج به‌دست آمده از حفاری‌های اکتشافی و آزمایش‌های برجای انجام شده در محل سازه اصلی و محل‌های مشابه که امکان شبیه‌سازی شرایط زمین‌شناسی در آنها وجود دارد، باعث حل مشکل، کاهش هزینه‌ها و بهبود روش‌ها می‌شود.

- تعیین سرعت موج برشی برای ایجاد انطباق بین شرایط زیرسطحی در محل ساختگاه اصلی و محل‌های مشابه برای تخمین پارامتر تغییرشکل‌پذیری قابل کاربرد است.

مراجع

- [1] Tepel, R. E. (2009). "The core attributes of engineering geology: a US perspective", *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 22(1), 273-276.
- [2] Das, B. M. (1993). *Principles of soil dynamics*, PWS-KENT Publ. Comp., Boston..
- [3] Bell, F. G., & Malone, A. W. (1993). "Engineering geology", *Engineering Geology*, 36(3), 316.
- [4] Bock, H. (2009). "Core values, competences and issues in engineering geology: a European perspective", *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 22(1), 287-295.
- [5] Fakher, A., Cheshomi, A., & Khamechian, M. (2007). "The addition of geotechnical properties to a geological classification of coarse grain alluvium in a pediment zone", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 40(2) 163-174.
- [6] Samadian, B. & Fakher, A. (2016). "Proposing a framework to combine geological and geotechnical information for city planning in Sanandaj (Iran)", *Engineering Geology*, 209, 1-11.
- [7] Cheshomi, A. (2006). "Study of mechanical properties of coarse-grained alluvium in Tehran based on geological composition and mechanical experiments", *PhD Thesis in Engineering Geology*, Tarbiat Modares University.
- [8] Marache, A., Dubost, J., Breyse, D., Denis, A. & Dominique S. (2009). "Understanding subsurface geology and geotechnical complexity at various scale in urban soils using a 3D model", *Georisk*, 3(4), 192-205.
- [9] Chung, S. G., Ryu, C. K., Jo, K. Y., & Huh, D. Y. (2005). "Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan new port", *Mar Georesour Geotechnol*, 23(3), 235-251.
- [10] Andriamamonjisoa, S. N., & Hubert-Ferrari, A. (2019). "Combining geology, geomorphology and geotechnical data for a safer urban extension: application to the Antananarivo capital city (Madagascar)", *Journal of African Earth Sciences*, 151, 417-437.

- [11] Akter, S., Ali, R. M. E., Karim, S., Khatun, M., & Alam, M. F. (2018). "Geomorphological, geological and engineering geological aspects for sustainable urban planning of Mymensingh City, Bangladesh", *Open Journal of Geology*, 8(07), 737-753.
- [12] Dadkhah, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Hafezi Moghaddas, N. (2016). "Geological engineering model for quaternary deposits in Isfahan City, Iran", *Comptes Rendus de L Academie Bulgare des Sciences*, 69(11), 1463-1472.
- [13] Cheshomi, A., Ramazennejad, R., & Fagher, A. (2019). "Development of Tehran alluvium classification based on geological characteristics and geotechnical parameters", *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 11(1), 65-79.
- [14] Mohammadi, M., Fatemi Aghda, S. M., Talkhablou, M., & Cheshomi, A., (2020). "Introducing a comprehensive geological and geotechnical classification for urban planning and design, a case study in Isfahan (Iran)", *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01471-7>.
- [15] Fookes, P. G. (1970). "Geology for engineers: the geological model, prediction and performance", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 30, 293-424.
- [16] Griffiths, J. S. (2009). "Engineering geology core values: a UK perspective". Culshaw, MG., Reeves, HJ., Jefferson, I. & Spink, TW. (eds) *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*", *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 22, 277-280.
- [17] Sahel Consulting Engineers. (2012). *Consulting engineering services for geotechnical studies of Gotvand regulating dam height increase project*, final report.
- [18] ASTM D4719. (1994). "Standard test method for pressuremeter testing in soils", *Annual Book of ASTM Standard*. West Conshohocken.
- [19] ASTM D 7400. (2000). "Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing", *Annual Book of ASTM Standard*. West Conshohocken.
- [20] ASTM D4428 / D4428M. (2014). "Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing", *Annual Book of ASTM Standard*. West Conshohocken.
- [21] ASTM D 1194, (2000). "Standard Test Methods for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings", *Annual Book of ASTM Standard*. West Conshohocken.