[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

بررسی تأثیر درجهٔ سیمانتاسیون بر پارامترهای مقاومتی و سرعت موج برشی آبرفت‌های درشت‌دانه شرق تهران

مازیار حسینی؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب،
مجید طارمی*؛ باشگاه پژوهش‌گران جوان و نخبگان،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب،
مهدی سعیدی؛ دانشگاه تهران، دانشکدهٔ فنی،
وحید سلیمانی؛ دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن،
مهدی سلطانی؛ دانشگاه بوعلی سینا، دانشکدهٔ فنی

تاریخ: دریافت ۹۸/۰۹/۰۵ پذیرش ۹۹/۰۱/۲۵

چکیده

توسعهٔ شهری در کلان‌شهر تهران باعث شده که برای ساخت سازه‌های بلند، بزرگ‌راه‌ها، تونل‌ها و سایر تأسیسات شهری، حفاری‌هایی با عمق و حجم زیاد انجام گیرد. آبرفت‌های شرق تهران (سری A)، نهشته‌های درشت‌دانه، همگن و سیمانته هستند. در این پژوهش تأثیر درجهٔ سیمانتاسیون بر پارامترهای مقاومتی و سرعت موج برشی خاک بر اساس پژوهش‌های انجام شده در بزرگراه شرق تهران انجام شده است. به‌منظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی و سرعت موج برشی خاک، از آزمون‌های برجا همانند بارگذاری صفحه، برش برجا، پرسیومتری و لرزه‌ای درون‌گمانه‌ای، برداشت‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. هم‌چنین تجزیهٔ شیمیایی برای شناسایی نوع کانی‌ها و جنس مواد سیمانته انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیمانتاسیون این آبرفت‌ها متوسط تا زیاد است و جنس مواد سیمانی در این خاک‌ها عموما کربناتی و به‌ویژه کلسیتی است. جمع‌بندی نتایج نشان داد که با افزایش درجهٔ سیمانتاسیون، مدول تغییر شکل حدود ۲۵ درصد، چسبندگی حدود ۵۵ درصد و سرعت موج برشی حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش‌ها این پارامترها با عمق رابطهٔ مستقیم دارد. این در حالی است که درجهٔ سیمانتاسیون تأثیری قابل

*نویسنده مسئول majid.taromi@yahoo.com

توجهی روی زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ندارد.

واژه‌های کلیدی: آبرفت‌های شرق تهران، آزمون‌های برجا، تجزیهٔ شیمیایی، سیمانتاسیون، مقاومت

مقدمه

کلان‌شهر تهران با وسعت حدود ٦١٥ کیلومترمربع در کوهپایه‌های جنوبی البرز روی آبرفت‌های درشت‌دانه و ریزدانه‌ای گسترش یافته است که از فرسایش کوه‌ها و دامنه‌های البرز به‌وسیلهٔ رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی به‌وجود آمده‌اند [۱]–[۵]. وسعت زیاد تهران و گسترش آبرفت‌ها به‌صورت دره‌ها و تپه‌ها، باعث‌شده که برای ساختن بزرگ‌راه‌ها، تونل‌های مترو و سایر تأسیسات شهری، حفاری‌هایی با عمق و حجم زیاد انجام شود [٦]، [۷]، [۸]. در این راستا، بررسی و شناخت رسوبات آبرفتی شهر تهران از دیدگاه زمین‌شناسی مانند زمان تشکیل و مشخصات عمومی از قبیل جنس رسوبات، منشأ و شرایط تشکیل، دیدگاه بهتری را در خصوص درک مشخصات، جنبه‌های کاربردی و ژئوتکنیکی آن در طراحی سازه‌های زیرزمینی، گودبرداری‌ها و طراحی پی در اختیار مهندسان ژئوتکنیک قرار می‌دهد [۹]، [۱۰]، [۱۱]. از طرف دیگر به‌منظور تحلیل پایداری، تخمین ضریب اطمینان و طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها با توجه به قرارگیری شهر تهران در ناحیهٔ با خطر لرزه‌خیزی بالا، لزوم شناخت دقیق خصوصیات مکانیکی و دینامیکی آبرفت‌های شهر تهران بیش از پیش احساس می‌شود [۱۲]–[١٦].

آبرفت‌های درشت‌دانه سری A آبرفت‌هایی هستند که بیش‌تر در مناطقی از شرق و شمال شرق تهران گسترش یافته‌اند. به‌دلیل درشت‌دانه بودن هم‌چنین سیمانتاسیون[1] بالای این آبرفت‌ها، تهیه نمونه‌های دست‌نخورده به‌منظور انجام آزمون آزمایشگاهی تقریباً غیرممکن یا بسیار دشوار است. از آن‌جاکه مهم‌ترین عامل چسبندگی در این نوع خاک‌ها سیمانتاسیون است، بعد از دست‌خوردگی خاک به‌منظور تهیه نمونه، ساختار خاک تغییریافته و پارامتر چسبندگی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. بنابراین نمونه‌های دست‌خورده که به‌منظور انجام آزمایش تهیه می‌شوند، نمی‌توانند برای اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی به‌کار روند. از این‌رو شناخت صحیح ساختگاه و تخمین سرعت موج برشی این خاک‌ها وابسته به انجام آزمایش‌های

1. Cementation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

برجا و در مقیاس بزرگ یا بازسازی نمونه‌ها با سیمان یا آهک و به‌طور مصنوعی است [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]. در این راستا به‌منظور درک درست رفتار واقعی این آبرفت‌ها از آزمون‌های برجا مانند بارگذاری صفحه، برش برجا، پرسیومتری و لرزه‌ای درون گمانه‌ای هم‌چنین آزمون‌های آزمایشگاهی و برداشت‌های صحرایی استفاده شده است.

یافته‌های این مقاله از پژوهش‌های انجام شده در مسیر بزرگ‌راه کمربندی شرق تهران، گردآوری شده است. تعداد ۲۳ حلقه گمانه از عمق ۳۰ تا ۱۴۰ متر و ۱۷ چاهک شناسایی به عمق ۲۰ متر در محدوده‌ای به‌طول حدود ۱۰ کیلومتر در مناطق ۱۳ و ۱۴ شهرداری تهران به‌منظور نمونه‌گیری و انجام آزمون‌های برجا در منطقهٔ بررسی شده حفاری شده است (شکل ۱) [۲۱]. حین حفاری رمپ‌های ورودی و تونل نیز آزمون‌های برجا در مقاطع مختلف انجام شده است. هم‌چنین به‌منظور شناسایی نوع کانی‌ها و جنس مواد سیمانی‌کننده از تجزیهٔ شیمیایی با استفاده از روش‌های ۱. طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس[1] (XRD) [۲۲]، [۲۳]، ۲. طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس[2] (XRF) و (۳) روش میکروسکوپ الکترونی روبشی[3] (SEM) استفاده شده است [۲۴]، [۲۵].

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی عمومی شهر تهران

کلان‌شهر تهران با وسعت حدود ۶۱۵ کیلومترمربع از شمال به دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی و از شرق به ارتفاعات سه پایه محدود شده است. ارتفاعات شمالی (دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی) تقریباً به‌طور کامل از سنگ‌های با سن ائوسن شامل بخش‌های مختلف سازند کرج و با سنگ‌شناسی متغیر، از شیل، توف، سنگ‌های آذرآورای، گدازه‌های آندزیتی و داسیتی و دایک‌ها و سیل‌های نفوذی تشکیل شده‌اند. ارتفاعات مرزهای شرقی و جنوب شرقی بر خلاف مرز شمالی دارای سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی متنوع‌تری هستند. به‌طوری‌که محدودهٔ سنی گسترده‌ای از پرکامبرین، سازند دولومیت سلطانیه (در محدودهٔ بی‌بی شهربانو) تا ائوسن در آن‌ها مشاهده می‌شود. رخنمون‌های غالب در این ارتفاعات شامل سنگ‌های

1. X-ray diffraction (XRD)
2. X-ray fluorescence (XRF)
3. Scanning Electron Microscope (SEM)

دولومیتی و آهکی با سن تریاس تا کرتاسه، سنگ‌های پیروکلاستیک و گدازه‌های آتشفشانی ائوسن و توده‌های نفوذی گرانیتی هستند. در بخش جنوبی در ارتفاعات ناپیوسته و کوتاه محصورکننده دشت جنوبی تهران (جنوب کهریزک)، ارتفاعات به‌طور عمده از سنگ‌های قرمز رنگ مارنی و گل‌سنگی نئوژن تشکیل یافته‌اند [۲٦]، [۲۷].

زمین‌شناسی رسوبات آبرفتی شهر تهران

ارتباط ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی رسوبات آبرفتی با نوع و شرایط محیط رسوبی تشکیل آن‌ها گام مفیدی در بررسی خصوصیات آن‌ها محسوب می‌شود. خاک‌های طبیعی معمولاً با گذشت زمان و تأثیر عوامل محیطی، دارای ساختار[1] می‌شوند. این ساختار بر مقاومت برشی افزوده و تأثیر به‌سزایی بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک می‌گذارد [۲۸]، [۲۹]. این در حالی است که با پیدایش ساختار در خاک مشکلات مربوط به نمونه‌گیری و انجام آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی بیش‌تر می‌شود [۱۹]، [۲۱]، [۳۰].

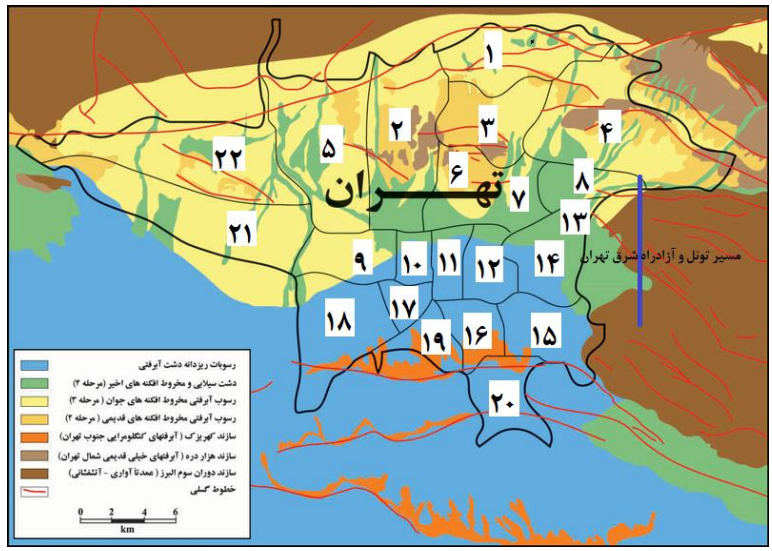
شهر تهران روی نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم (کواترنری) زمین‌شناسی بنا شده است. این آبرفت‌ها به‌وسیلهٔ سیلاب‌هایی که در اواخر دوران سوم و هم‌زمان با برپایی ارتفاعات البرز از این ارتفاعات سرچشمه گرفته‌اند، در نواحی دامنه‌ای و پست برجا گذاشته شده است. ویژگی‌های رسوب‌شناختی نهشته‌های آبرفت‌های تهران بیان‌گر آن است که این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی هستند که از زمان پلیوسن پسین تاکنون از دامنه‌های جنوبی ارتفاعات البرز منشأ گرفته‌اند.

تأثیر فرآیندهای آب و هوایی از یک سو و فعالیت‌های تکتونیکی از سوی دیگر سبب برجای گذاشتن رسوبات آبرفتی متنوعی از نظر جنس و متغیرهای مقاومتی در تهران شده است. خطوط چینه‌شناسی کلی آبرفت‌های تهران برای نخستین بار در قالب سلسله گزارش‌هایی به‌وسیلهٔ ریبن بین سال‌های ۱۹۵۵ و ۱۹٦٦ منتشر شده است [۱]، [۲]. پس از ریبن محققان مختلفی از دیدگاه‌های مختلف زمین‌شناسی، زمین ریخت‌شناسی، لرزه‌خیزی و آب‌های زیرزمینی به بررسی این نهشته‌ها پرداخته‌اند [۳]، [٤]، [۱۹]، [۲۱]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳]، [۳٤].

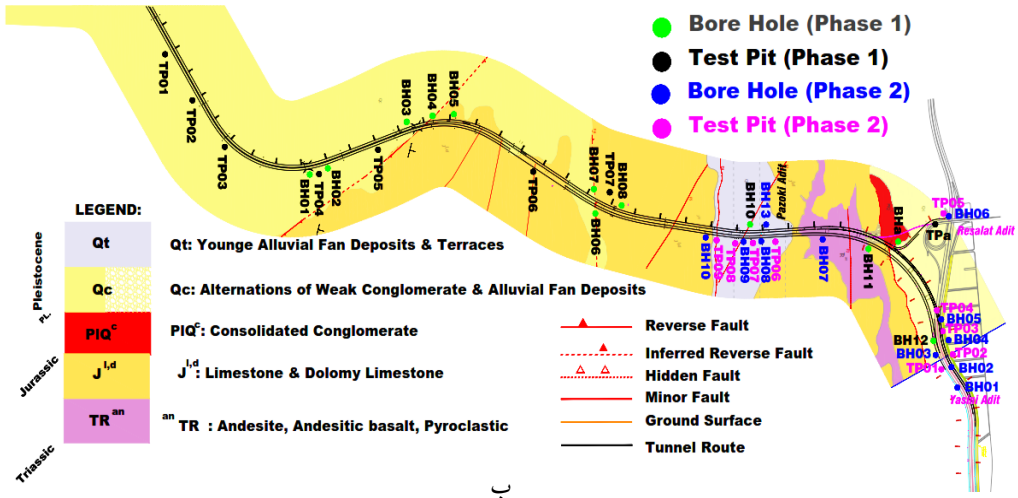
1. Structure

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]



الف



ب

شکل ۱. الف) نقشهٔ زمین‌شناسی و گسل‌های شهر تهران، ب) پلان زمین‌شناسی و موقعیت گمانه‌ها و چاهک‌های شناسایی مسیر تونل [۲۱]

در جدول ۱ طبقه‌بندی‌های مختلف انجام‌شده به‌وسیلهٔ محققان ارائه شده است. با توجه به این جدول درمی‌یابیم که به‌طورکلی واحدهای زمین‌شناسی شهر تهران به چهار دسته

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

تقسیم‌بندی می‌شوند. پدرامی (۱۳۵۷) اعتقاد دارد که برخی از قسمت‌های آبرفت‌های سری A و بیش‌تر آبرفت‌های سری B از نوع آبرفتی– یخرفتی است و یخچال‌ها نیز در تشکیل آنها دخالت دارند. این آبرفت‌ها در مخروط افکنه‌های متعدد کنار هم رسوب کرده‌اند، به‌طوری‌که در فواصل نزدیک به ارتفاعات از نوع درشت‌دانه (شن و ماسه همراه قلوه سنگ و قطعه سنگ) و در فواصل دور ریزدانه (رس و سیلت) هستند [٤].

جدول ۱. مقایسهٔ سازندهای گستره تهران براساس طبقه‌بندی‌های مختلف

Riben (1955-66)		**A (Hezardarreh)**	**B (Kahrizak)**		**C (Tehran plain alluvium)**		**D (Recent alluvium)**
Engalenc (1968)	**PLQ1**	**Q1**	**Q2**		**Q3**		**Q4**
Pedrami (1981)		**A**	**Bn**	**Bs**	**C**		**D**
Shafiee and Azadi (2007)		**A**	**Bn**	**Bs**	**C**		**DC**
Abbassi and Farbod (2009)	**Hezardarreh Formation**		**Qt4**		**Qt3**	**Qt2**	**Qt1**	**Qal**
Time Divisions	**Tertiary**	**Quaternary**					
	Pliocene	**Early**	**Middle**		**Late**	**Pleistocene**	**Holocene**
Riben (1966) سن		5 Ma	700 ka		50 ka		10 ka
سیمانی شدن		سیمانته و سخت شده	متغیر ولی عموماً دارای سیمان ضعیف		سیمان ضعیف‌تر از A و سخت‌نشده		سیمان نشده
دانه‌بندی		عمدتاً کنگلومرا تا مخلوط‌هایی شامل شن– ماسه– سیلت و رس – سیلت	بسیار متغیر از تخته‌سنگ، قلوه سنگ، شن و ماسه	مخلوط‌هایی از ماسه سیلتی	از حد رس و سیلت تا حداکثر دانه به قطر ۲۰ سانتی‌متر		سیلت رسی نرم
شیب لایه‌ها		دارای شیب حداکثر تا ۹۰ درجه	به‌صورت دگر شیب روی آبرفت A و دارای شیب کم‌تر از ۱۵ درجه		افقی		افقی
ضخامت		حداکثر ۱۲۰۰ متر	حداکثر ٦۰ متر (به‌سمت جنوب کم می‌شود)		حداکثر ٦۰ متر		کم‌تر از ۱۰ متر
حوضه رسوبی		سیلابی	یخچالی – سیلابی		سیلابی – رودخانه‌ای		سیلابی – رودخانه‌ای
منشأ		عمدتاً سنگ‌های توفی و شیلی (سازند کرج ۹۰٪ و مابقی بقیه سنگ‌ها)	سازند کرج، سازند A		سازند کرج، سازند A و سازند B		سازند کرج، سازند A، سازند B و سازند C
مسافت حمل شده		حداکثر ١٦ کیلومتر	حداکثر ۲۲ کیلومتر		حداکثر ۳۰ کیلومتر		بیش‌تر از ۵۵ کیلومتر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

۱. آبرفت‌های سری A (سازند هزاردره)

تپه‌های هزاردره، قدیمی‌ترین نهشته‌های آبرفتی تهران به‌صورت تپه‌های بلند با دره‌های ژرف فراوان (هزاردره) با طول حدود ١٤ کیلومتر در جهت شمال‌غربی– جنوب‌شرقی و ارتفاع حداکثر ١٩٦٥ متر است. این تپه‌ها از شمال به گسل شمال تهران و از جنوب به چندین گسل شیب‌لغز جنوبی محدود می‌شود. این سازند در گستره‌های کن، اوین، قیطریه، عباس‌آباد، شمال گیشا، گردنه قوچک، حکیمیه و پارک ملی سرخه حصار و خجیر و به شکل تپه‌های بلند با دره‌های ژرف فراوان (هزاردره) در محدودهٔ آزادراه تهران- پردیس گسترش دارد.

ضخامت این رسوبات آبرفتی بسیار زیاد است و از ذرات درشت‌دانه با قطعات گردگوشه و نیمه گردگوشه و منشأ رودخانه‌ای تشکیل شده‌اند. خصوصیت دیگر این آبرفت‌ها همگنی آنها است، به همین خاطر بعضی اوقات آبرفت‌های همگن تهران نیز نامیده شده‌اند. این همگنی، در اندازهٔ متوسط دانه‌ها (۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر)، لایه‌بندی منظم و جنس تقریباً یک‌سان ذرات (تقریبا ۹۰ درصد دانه‌ها از سنگ‌های سبز کرج منشأ گرفته‌اند) قابل مشاهده است. آبرفت‌های سازند هزاردره به طور محلی حاوی بین لایه‌های رسی و ماسه‌ای هستند. تخلخل در بخش تحتانی ناچیز، مقاومت مکانیکی بسیار زیاد و هوازدگی دانه‌ها بسیار شدید است.

لایه‌بندی این سازند، منظم و بیش‌ترین قطعات آن را توف‌های سبز کرج تشکیل می‌دهد. چین‌خوردگی کنگلومرای هزاردره به فاز کوهزایی پادسانین (آخرین فاز فرعی از کوهزایی آلپی در پلیوسن–پلئیستوسن) مربوط است. سازند هزاردره روی لایه‌های قرمز میوسن بالایی قرار دارد و آبرفت‌های جوان با ناپیوستگی ناهم‌شیب آن‌را می‌پوشاند. ریبن (۱۹۵۵)، سن میو- پلیئوسن را برای آبرفت‌های هزاردره پیشنهاد داده است [۱]. در حالی که انگالسه (١٩٦٨) پلیئو–کواترنری را برای سازند بخش زیرین و کواترنری جدید را برای سازند بخش بالایی پیشنهاد کرد [۳]. این سازند در پای بلندی‌ها چهره مخروط افکنه‌ای به‌خود گرفته و با رسیدن به دشت جنوب تهران به لایه‌های سیلتی کم شیب تبدیل می‌شود [٢٦].

حمل این رسوبات به‌طور عمده به‌وسیلهٔ جریان‌هایی از سمت شمال‌شرق به‌وسیلهٔ جریان‌های آبی بسیار بزرگی مانند رودخانه‌های جاجرود و دماوند است. این جریان آبی بعد

از گردنه تلو به‌صورت یک مخروط افکنه عظیم در دشت تهران گسترده شده است. جورشدگی دانه‌ها و هم‌چنین شکل نیمه‌گردشده آنها نشان می‌دهد که رشته کوه البرز در زمان رسوب‌گذاری این آبرفت‌ها هنوز ارتفاع زیادی نداشته و اختلاف پتانسیل بین بالادست و پایین دست ناچیز بوده است.

زمین‌شناسی ناحیهٔ بررسی شده

بر اساس لوگ گمانه‌های حفاری‌شده تا عمق ۱٤۰ متری و چاهک‌های شناسایی تا عمق ۲۰ متر، هم‌چنین برداشت‌های صحرایی از ۱۰۰۰ متر تونل و ترانشه حفاری‌شده و بررسی‌های آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه گرفت که تا عمق بین ۲۰ تا ۳۰ متری از ناحیهٔ بررسی شده شامل آبرفت‌های درشت‌دانه شن و ماسه رس‌دار با تراکم زیاد است. هم‌چنین سنگ بستر از نوع کنگلومرا، سنگ آهک و در برخی موارد آندزیت است. سنگ آهک از نظر هوازدگی عمدتاً از نوع هوازدگی کم تا بکر و از نظر مقاومت عمدتاً در محدودهٔ نیمه‌قوی تا قوی است. سنگ آندزیت از نظر هوازدگی در رده با هوازدگی کم و از نظر مقاومت در ردهٔ قوی تا بسیار قوی قرار دارد. در برخی از موارد زون‌های خردشده و گسله نیز در اعماق مختلف سنگ بکر وجود دارد.

بررسی‌های پتروگرافی انجام شده نشان می‌دهد که کانی‌های اولیه تشکیل‌دهندهٔ موادی سیمانی رسوبات اغلب کلسیت‌های اسپاریتی و میکریتی و کانی‌های ثانویه شامل کوارتز، کلسیت و دولومیت است (جدول ۲). از این رو سیمان اسپاریتی و کوارتز به‌صورت پرکننده درز و شکستگی‌ها و در مواردی به‌صورت سیمان در نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۲).

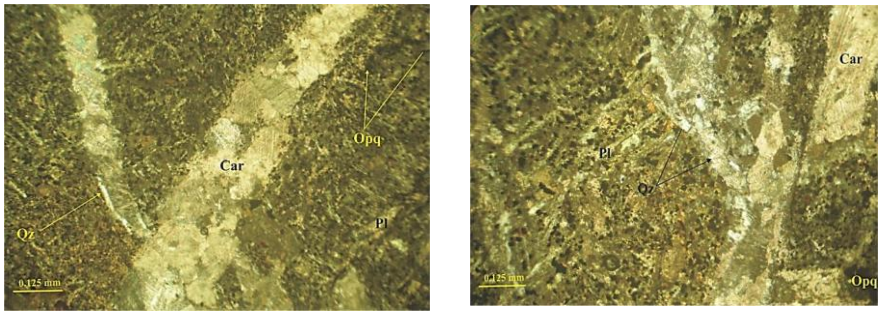
تجزیهٔ شیمیایی سیمان خاک

شناسایی کانی‌ها یکی از راه‌های شناخت بهتر خصوصیات خاک است. از طرف دیگر وجود رس در خاک، اهمیت ویژه‌ای در شیمی خاک دارد. بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تأثیر نوع و مقدار کانی‌ها، به‌ویژه کانی‌های رسی است. به‌منظور شناسایی نوع و الگوی توزیع کانی‌ها تجزیهٔ شیمیایی روی خمیره سیمان خاک در دو بخش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

خیابان دماوند (نمونه خاک شمارهٔ ۱) و بزرگراه یاسینی (نمونه خاک شمارهٔ ۲) انجام شده است. در این آزمایش‌ها از روش‌های ۱. طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، ۲. طیف-سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و ۳. روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. ضمن این که می‌توان با انجام آزمایش XRF نسبت به شناخت درصد اکسیدهای موجود در خاک اقدام کرد. نمونه‌ها از عمق بیست متری چاهک‌های شناسایی گرفته شده‌اند.



Pl: پلاژیوکلاژ ($NaAlSi_3O_8$, $CaAl_2Si_2O_8$)، Qz: کوارتز (SiO_2)، Car: کربنات (کلسیت اسپاری، کلسیت میکریتی) ($CaCO_3$)، Opq: کانی‌های کدر

شکل ۲. مقطع میکروسکوپی نمونه BH 08 Z – کلسیت‌های اسپاریتی (Car) و کوارتزهای ثانویه که به‌صورت پرکننده درز و شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند (بزرگ‌نمایی (10X، نور XPL)

۱. پراش اشعه ایکس (XRD)

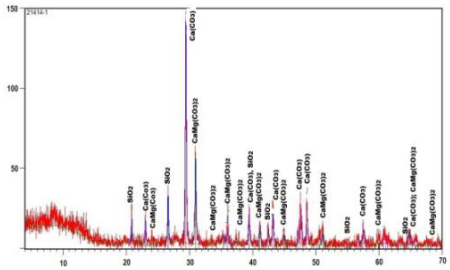
مقدار کربنات کلسیم در خاک، تأثیر به‌سزایی در افزایش مقاومت آن دارد. چندین روش مختلف برای اندازه‌گیری مقدار کربنات کلسیم به‌وسیلهٔ محققان مختلف پذیرفته شده است [۲۲]، [۲۳]. این در حالی است که مقدار کربنات کلسیم اندازه‌گیری‌شده با هر یک از این روش‌ها ممکن است تفاوت داشته باشد. نتایج تجزیهٔ XRD نمونه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. براساس این نتایج، پیک‌های[1] XRD فازهای کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و کلسیم آلومیناسیلیکات ($CaAl_2Si_2O_8$) و سیلیس (SiO_2) در نمونه‌ها وجود دارد.

1. Peaks

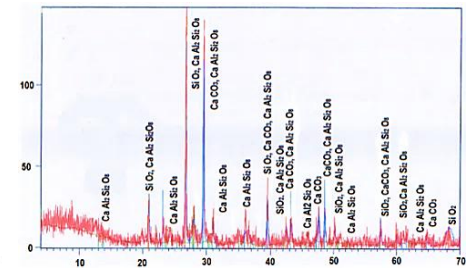
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

جدول ۲. نمونه‌های مقطع نازک بررسی شده و مشخصات کلی آن‌ها

شمارهٔ نمونه	عمق نمونه‌گیری (متر)	نام سنگ	کانی های اولیه	کانی های ثانویه	کانی های فرعی	بافت	دگرسانی
BH 05-Z	۱۱	سنگ آهک ماسه‌ای	کلسیت‌های اسپاریتی و میکریتی، کوارتز	کوارتز	کانی‌های کدر		
BH 06-Z	۱۰	میکریت	کلسیت‌های میکریتی و اسپاریتی	کوارتز	کانی‌های کدر		
BH 08-Z	۲۵	آندزیت	پلاژیوکلاز	کوارتز، کلسیت، سریسیت	کانی‌های کدر	میکروپورفیری	کربناتی، سریسیتی، سیلیسی
BH 09-Z	۳۰	اسپارایت	کلیست‌های میکریتی و اسپاریتی	کوارتز	کانی‌های کدر		
BH 09-Z	٦۰	میکریت	کلیست‌های میکریتی و اسپاریتی	کوارتز، دولومیت	کانی‌های کدر		
BH 09-Z	۱۰۰	آندزیت	پلاژیوکلاز	کلیست‌های اسپاریتی، کوارتز، سریسیت	کانی‌های کدر	میکروپورفیری	کربناتی و سریسیتی
BH 09-Z	۱۳۰	اسپارایت	کلیست‌های میکریتی و اسپاریتی	کوارتز	کانی‌های کدر		
BH 10-Z	٤۰	اسپارایت	کلیست‌های میکریتی و اسپاریتی		کانی‌های کدر		
BH 11-Z	۲۰	داسیت دگرسان شده	پلاژیو کلاز، کوارتز، الکالی فلدسپار	سریسیت،کربنات	کانی‌های کدر	میکروپورفیری	سریسیتی، کربناتی
BH 11-Z	٤۰	اسپارایت	کلیست‌های اسپاریتی و میکریتی	دولومیت	کانی‌های کدر		



الف



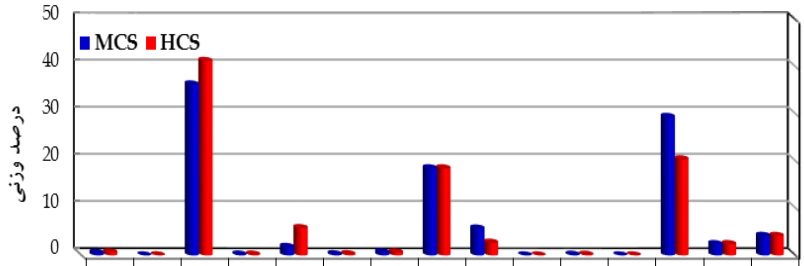
ب

شکل ۳. طیف پراش پرتو ایکس (XRD) الف) نمونهٔ خاک شمارهٔ یک (HCS)، ب) نمونهٔ خاک شمارهٔ دو (MCS)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

۲. فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

به‌منظور شناسایی درصد اکسیدهای موجود در سیمان خاک، آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به‌روش XRF مطابق با استاندارد ASTM E1621(2013) روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج این تجزیهٔ شیمیایی در شکل ٤ ارائه شده است. مطابق با نتایج این آزمون در-می‌یابیم که آهک و سیلیس، بیش‌ترین درصد وزنی نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند. هم‌چنین کلسیم و منیزیم به‌عنوان کاتیون‌های با قدرت بالای فلوکولاسیون در نمونه خاک شمارهٔ یک (خاک با سیمانتاسیون بالا[1]) از نمونهٔ خاک شمارهٔ دو (خاک با سیمانتاسیون متوسط[2]) بیش‌تر است. این موضوع موجب افزایش درجه سیمانتاسیون نمونه خاک شمارهٔ یک نسبت به نمونه خاک شماره دو شده است.



	Na2O	P2O5	CaO	BaO	MgO	SO3	TiO2	L.O.I	Al2O3	Cl	MnO2	La&Lu	SiO2	K2O	Fe2O3
MCS	0.54	0.01	36.3	0.18	1.8	0.25	0.64	18.5	5.7	0.01	0.14	0.01	29.4	2.4	4.15
HCS	0.64	0.02	41.3	0.18	5.8	0.25	0.64	18.5	2.7	0.01	0.14	0.01	20.4	2.4	4.15

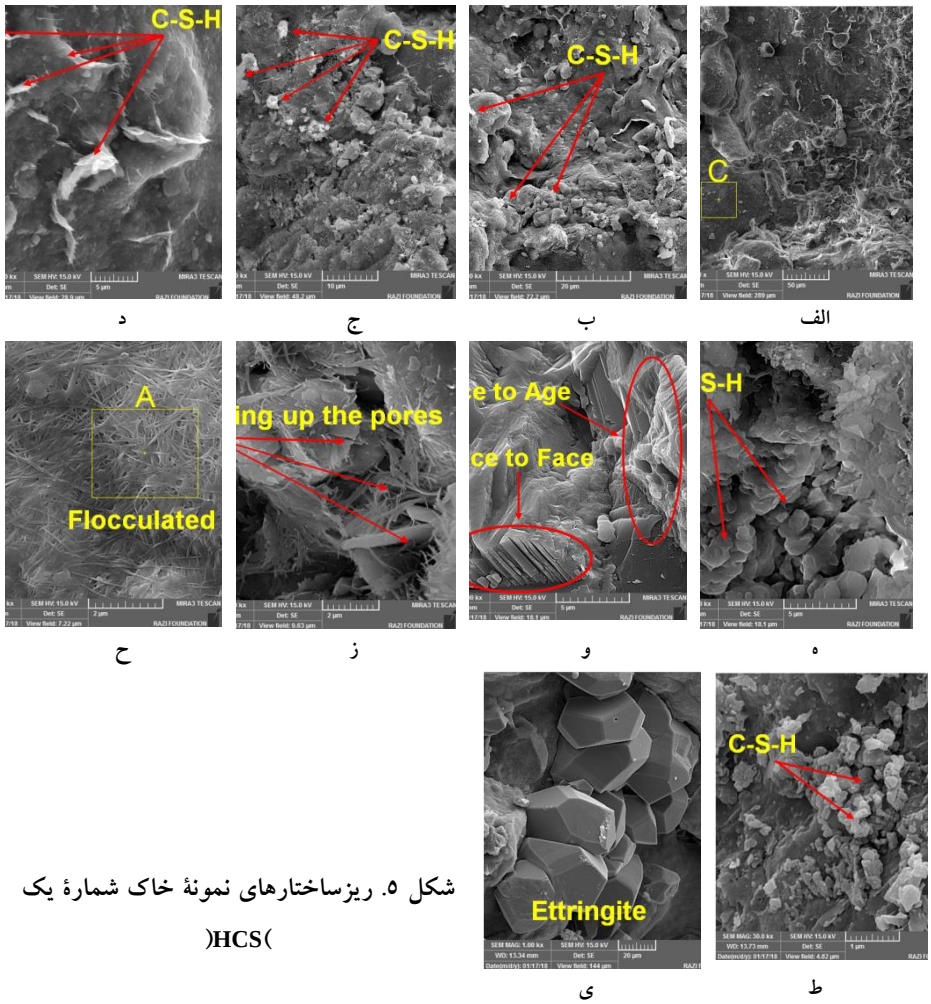
شکل ٤. مقادیر ترکیب شیمیایی به‌روش XRF

۳. بررسی ساختار خاک با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDX)

در شکل ۵ ریزساختارهای خاک شمارهٔ یک (HCS) در یک سطح با بزرگ‌نمایی ۱ تا ۵۰ میکرون نشان داده شده است. فازهای سیمان، به‌علت کریستالیزاسیون تدریجی مواد معدنی ثانویه، موجب افزایش مقاومت خاک شده‌اند. شکل ۵ الف میکروگرافی نمونه را در یک سطح با بزرگ‌نمایی ۵۰ میکرون نشان می‌دهد. چنان‌که در این تصویر مشاهده می‌شود سطح به‌صورت کاملاً یک‌پارچه بدون داشتن حفراتی نمایش داده شده است. در تصاویر با درشت نمایی ۲۰، ۱۰و ۵ میکرون در شکل ۵ ب، ج و د، می‌توان ساختار کریستال مانند بلورهای هیدروکسید کلسیم را به‌صورت مشخص مشاهده کرد که نشان‌دهندهٔ وجود نقاط هیدراته -

1. Highly Cemented Soil (HCS)
2. Moderately Cemented Soil (MCS)

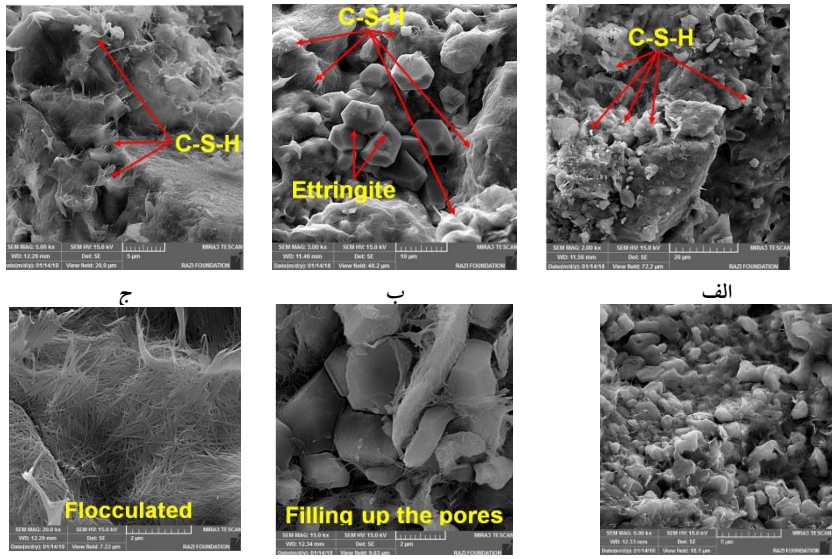
شده و تشکیل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) است. هم‌چنین در شکل ۵ ز با بزرگ‌نمایی ۲ میکرون می‌توان مشاهده کرد، منافذ با مواد هیدراته‌شده، کاملاً پرشده و تشکیل سطحی یک‌پارچه و مستحکم را داده‌اند. هم‌چنین با توجه به شکل ۵ ی می‌توان مشاهده کرد کانی اترینگایت تشکیل شده است. اترینگایت یک ماده معدنی است که در حضور ترکیبات سولفات، کلسیم و آلومینیوم خاک رس رشد و توسعه پیدا می‌کند [۳۵]. مشاهدات مشابه در شکل ٦ نیز برای خاک شمارهٔ دو (MCS) وجود دارد.



شکل ۵. ریزساختارهای نمونهٔ خاک شمارهٔ یک (HCS)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

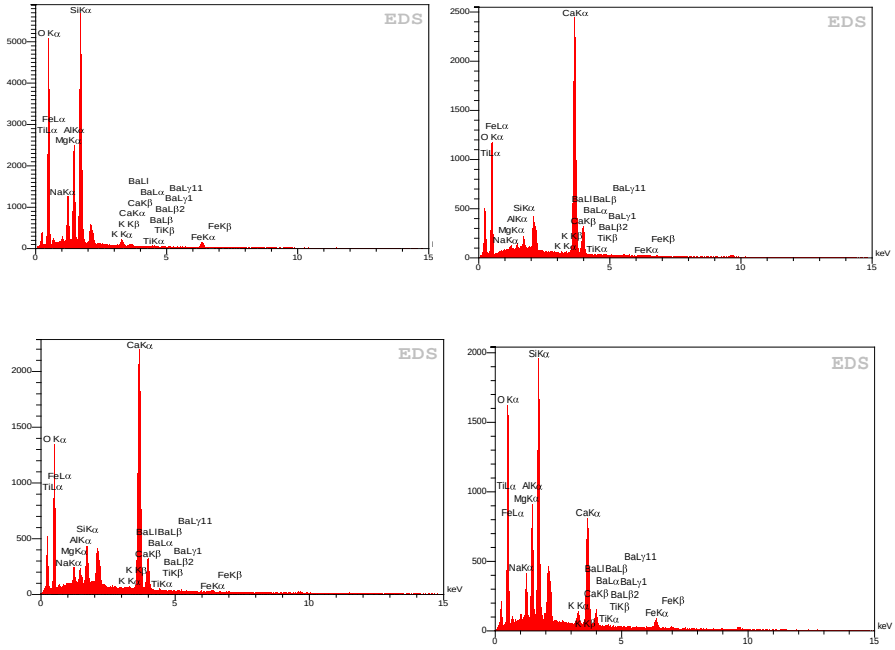
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

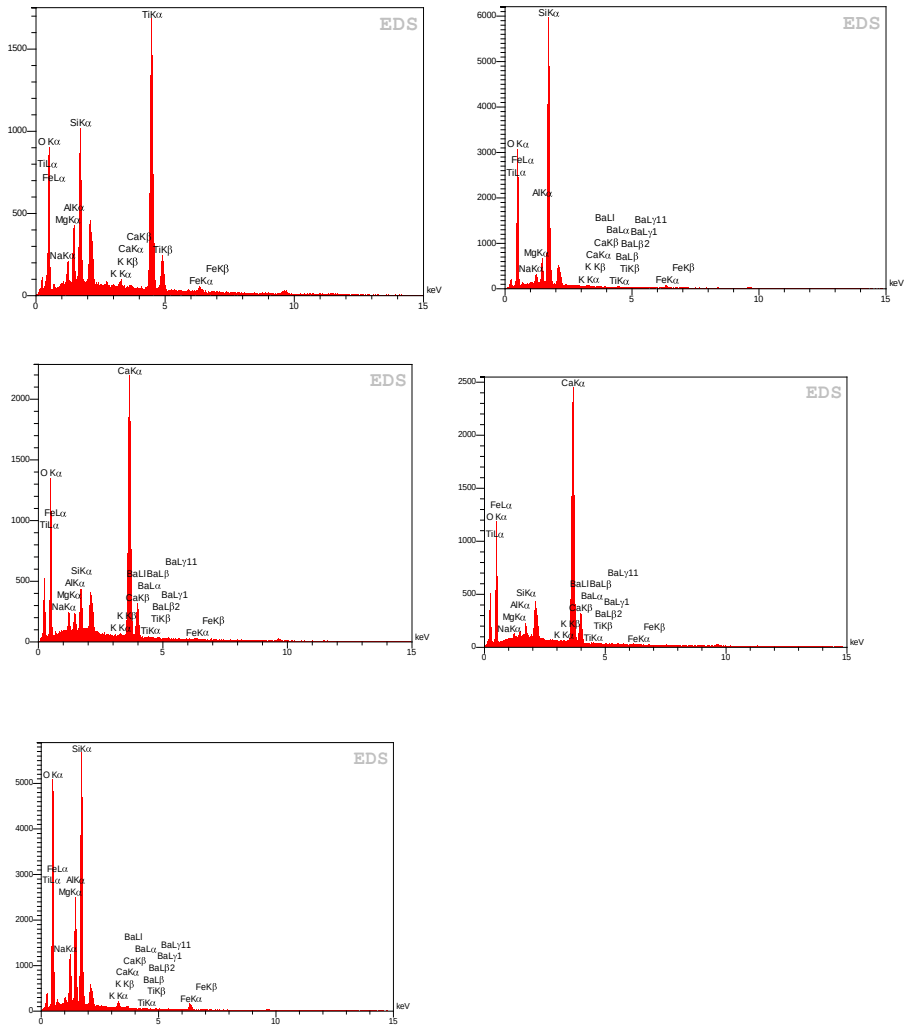


الف ب ج

د ه و

شکل ٦. ریزساختارهای نمونهٔ خاک شمارهٔ دو (MCS)





شکل ۷. نمودار آنالیز عنصری EDX ، الف) نمونه خاک شماره یک (HCS)، ب) نمونه خاک شماره دو (MCS)

سیمانتاسیون

سیمانتاسیون مهم‌ترین پارامتر متصل‌کردن دانه‌ها و ایجاد چسبندگی در آبرفت‌های تهران است. درجه چسبندگی بستگی به ساختار آبرفت، جنس و شکل دانه‌ها، سن زمین‌شناسی،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

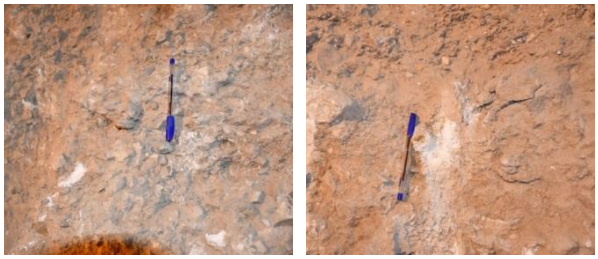
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

تراز آب زیرزمینی، شرایط تکتونیکی، عمق و هوازدگی دارد. منشأ سیمانتاسیون طبیعی آبرفت‌های شرق تهران ۱. وجود سیمان‌های طبیعی همانند سیلیکا، هیدرات سیلیکات و کربنات‌ها که در نقاط تماس ذرات رسوب می‌کند و ۲. گذشت زمان[1] و قفل و بست دانه‌های خاک با یک‌دیگر و وجود ماتریس رس در بین دانه‌های شن و ماسه است.

بر اساس بررسی مقاطع نازک نمونه سنگ‌های محدودهٔ بررسی شده (جدول ۳) کریستال‌های کلسیت و کوارتز مولفه‌های منابع سنگ آبرفت تهران است. در این راستا درمی‌یابیم که حل-شدگی کریستال‌های کلسیت و سپس تبلور مجدد بین دانه‌ها، سیمانتاسیون را ایجاد کرده است. این مواد در ناحیه تماس ذرات یا اطراف دانه‌ها نهشته‌شده و پیوند شیمیایی تشکیل داده و سیمانی می‌کنند. این موضوع عامل اصلی پایداری شیب‌های تند طبیعی و ترانشه‌های بلند در آبرفت‌های سازند هزاردره است (شکل ۸). این درحالی است که علی‌رغم این‌که آبرفت‌های سازند هزاردره درشت‌دانه هستند، پدیده سیمانتاسیون باعث به‌وجود آمدن چسبندگی قابل توجه در آن‌ها شده است.

بررسی‌های انجام‌شده در چاهک‌های شناسایی حفاری‌شده، دیواره‌های گودبرداری‌شده و تونل، نشان می‌دهد که در مسیر رودخانه سرخه حصار و آبراهه‌های قدیمی به‌دلیل این‌که شرایط برای نهشته‌شدن املاح کربناتی ناشی از فرسایش سنگ‌ها مهیا بوده است و نفوذپذیری رسوبات که معمولاً تابعی از بافت است، سیمانتاسیون بیش‌تر است. این مواد سیمانی به‌رنگ سفید و به‌عنوان پرکننده بیش‌تر خلل و فرج خاک قابل مشاهده است (شکل ۹).

شکل ۸. تصویری از پایداری شیب‌های تند محدودهٔ آزاد راه تهران–پردیس



شکل ۹. سیمانتاسیون آبرفت‌ها در تونل حفاری‌شده در محدودهٔ بررسی شده

1. Aging

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

بررسی خواص مکانیکی آبرفت‌های سیمانته

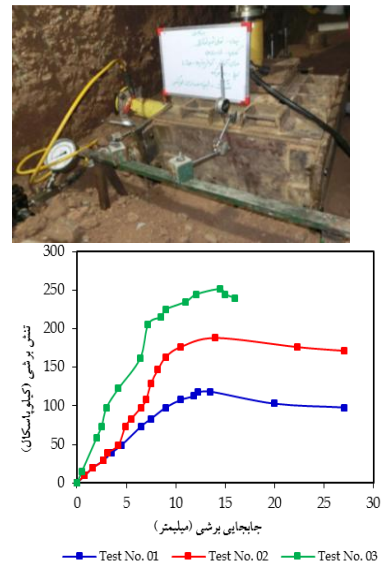
خصوصیات فیزیکی و مکانیکی رسوبات به جنس خاک‌ها، تراکم، ترکیب شیمیایی مواد سیمانته و درجه سیمانتاسیون وابسته است. مقایسه مقاومت برشی خاک دست‌نخورده و بازسازی‌شده تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. در خاک‌های سیمانته همانند آبرفت‌های سری A تهران، طبیعت سیمانی‌شده و درشت‌دانه بودن این خاک، تهیه نمونه‌های دست‌نخورده به‌منظور انجام آزمایش را تقریباً غیرممکن یا خیلی دشوار ساخته است. از طرف دیگر نمونه‌های دست‌خورده که به‌منظور انجام آزمایش تهیه می‌شوند نمی‌توانند برای اندازه‌گیری چسبندگی به‌کار روند. این نمونه‌ها چسبندگی خاک را بسیار کم‌تر از مقدار واقعی و برجا نشان می‌دهند (جدول ۳). از آن‌جاکه مهم‌ترین عامل چسبندگی در این نوع خاک‌ها سیمانتاسیون است، بعد از دست‌خوردگی، ساختار خاک تغییریافته و پارامتر چسبندگی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این در حالی است که زاویهٔ اصطکاک داخلی تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). تفاوت بین زاویهٔ اصطکاک حالت بحرانی خاک سیمانته و غیرسیمانته (بازسازی‌شده) با مقدار ثابت (k) تعریف می‌شود. حمیدی و سلیمانی [۳٦] مقادیر k را برای آهک، گچ و سیمان به‌ترتیب ۳/۹، ٦/۱ و ۳/٦ درجه به‌دست آوردند. در این پژوهش طبق آزمایش‌های انجام‌شده بین نمونه بازسازی‌شده و برجا، مقدار k را حدود ۳ درجه به‌دست آمده است. از این‌رو، با مقایسه نتایج درمی‌یابیم که شناخت رفتار مکانیکی آبرفت‌ها به‌ویژه خاک‌های درشت‌دانه همانند سری A تهران مستلزم انجام آزمایش‌های برجا و بزرگ مقیاس است. آزمایش‌های نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط نیز به‌علت درشت‌دانه بودن و سختی بالای این خاک‌ها، کاربرد مفیدی ندارند [۳۷].

در این راستا تعداد ۳۰ آزمایش برش برجا، تعداد ۳۰ آزمایش بارگذاری صفحه، تعداد چهار آزمایش پرسیومتری، و هشت آزمایش لرزه‌ای درون‌گمانه‌ای به‌همراه اخذ نمونه‌های دست‌نخورده به‌منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها تعیین پارامترهای مقاومتی خاک مانند چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک داخلی، مدول تغییر شکل‌پذیری، مدول برشی و سرعت موج برشی متوسط خاک و تأثیر سیمانتاسیون خاک در مقادیر این پارامترها با مقایسه با نتایج تجزیهٔ شیمیایی خاک بود.

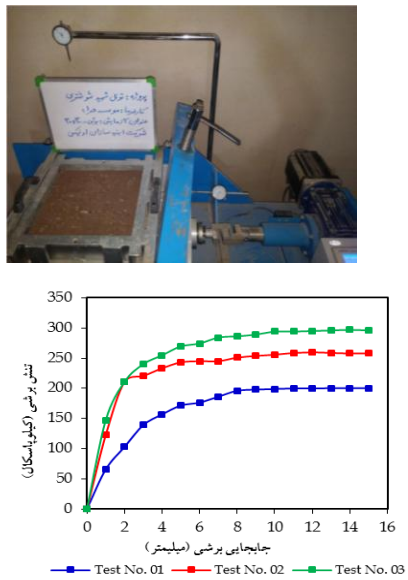
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

جدول ۳. مقایسهٔ نتایج آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی روی نمونه‌های بازسازی‌شده

نوع آزمایش	برش برجا (گالری حفاری‌شده در تونل)	برش مستقیم
عمق نمونه‌برداری (متر)	۱۵	۱۵
نوع نمونه	دست‌نخورده	بازسازی‌شده
طبقه‌بندی خاک	GW-GC	GW-GC
ابعاد نمونه – (میلی‌متر)	۶۰۰*۶۰۰	۳۰۰*۳۰۰
ارتفاع نمونه (میلی‌متر)	۳۰۰	۱۵۰
سرعت برش	تند	تند
چسبندگی (کیلوپاسکال)	۵۳	۱۱
زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	٤۲	۳۹



شکل ۱۰. آزمایش برش برجا (بالا) و نمودار تنش- جابه‌جایی برشی (پایین)



شکل ۱۱. آزمایش برش مستقیم نمونهٔ بازسازی-شده در آزمایشگاه (بالا) و نمودار تنش-جابه‌جایی برشی (پایین)

۱. دانه‌بندی رسوبات

عامل تشکیل آبرفت‌های سری A تهران، عموماً جریان‌های سیلابی و رودخانه‌ای بوده است. بنابراین مهم‌ترین عامل بروز اشکال مختلف و تنوع در اندازه دانه‌ها، مسافت حمل شده است. با توجه به این که عامل حمل و نقل یک‌سان است، ذرات با اندازه‌های مختلف

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

تشکیل شده‌اند. از این‌رو بیش‌تر نمودارهای دانه‌بندی در محدوده خوب دانه‌بندی شده قرار دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده درمی‌یابیم که مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک بین ۳۵ تا ٤۲ درجه متغیر باشد. هم‌چنین زاویهٔ اصطکاک داخلی با افزایش یا کاهش مقادیر شن و ماسه رابطه مستقیمی ندارد. از طرف دیگر نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی، درصد شن و ماسه را بین ۲۰ تا ٦۰ درصد و رس را از ۵ تا ٤۵ درصد متغیر نشان می‌دهد. این در حالی است که در عمق‌های بیش‌تر از ۲۵ متر درصد شن حدود ۱۰ درصد افزایش و به همین تناسب درصد ماسه و رس کاهش داشته است.

۲. آزمون‌های برجا

به‌منظور تأثیر درجهٔ سیمانتاسیون بر پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل آبرفت‌های درشت‌دانه شرق تهران و مقایسه آن با نتایج تجزیهٔ شیمیایی، آزمایش‌های برش برجا، چاهک‌های شناسایی در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر انجام شده است.

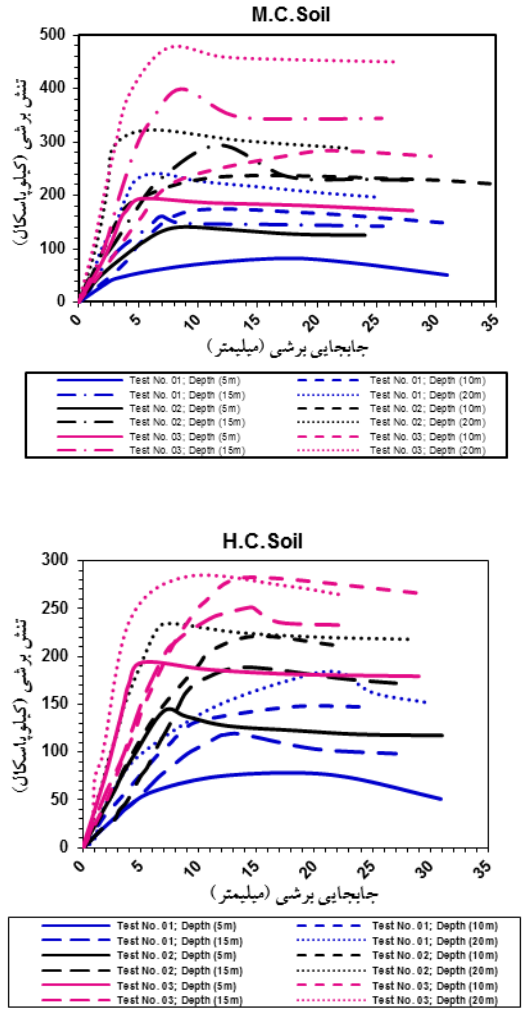
آزمایش برش برجا در داخل گالری‌های کناری چاهک‌های شناسایی و به تعداد سه عدد در هر گالری انجام شده است. نمونه‌های خاک در جعبه‌ها با سه تنش عمودی مختلف آزمایش انجام شد. در این آزمایش‌ها، مقادیر تنش برشی بیشینه و تغییر مکان متناظر با آن استخراج شد.

نتایج آزمون‌های برش برجا، افزایش سریع در تنش تا رسیدن به یک مقدار حداکثر τ_p (نقطه اوج) در تغییر مکان‌های برشی پایین و سپس کاهش در تنش برشی را با رفتار نرم-شونده را نشان می‌دهد (شکل ۱۲). هم‌چنین با افزایش عمق مقادیر چسبندگی و مقاومت برشی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در عمق‌های مختلف نیز افزایش مدول‌های تغییرشکل خاک را با افزایش عمق را نشان می‌دهد.

با بررسی مقدار سیمان خاک و نتایج تجزیهٔ شیمیایی درمی‌یابیم که پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل خاک با درجه سیمانتاسیون خاک‌ها رابطهٔ مستقیم دارد. از این‌رو به‌طورکلی درمی‌یابیم که تأثیر درجه سیمانتاسیون در افزایش مقدار چسبندگی بین ۱۰ تا ۱۰۰ درصد و مدول تغییر شکل‌پذیری خاک بین ۲۰ تا ۳۵ درصد است (جدول ٤).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

در خاک‌های سیمانته تحت بارگذاری برشی پس از فشردگی ابتدایی کوچک، تمایل زیادی به افزایش حجم و اتساع مشاهده می‌شود. رفتار تردتر توام با بروز نقطه اوج مشخص در نمونه‌های سیمانته مشاهده می‌شود. افزایش قابل توجه در مقاومت وابسته به نرخ شدید اتساعی است که در نمونه‌های سیمانته مشاهده می‌شود. اگر این سیمان در جابه‌جایی ذرات شکسته شود، مقاومت برشی به‌طور ماندگار کاهش می‌یابد (شکل ۱۳).

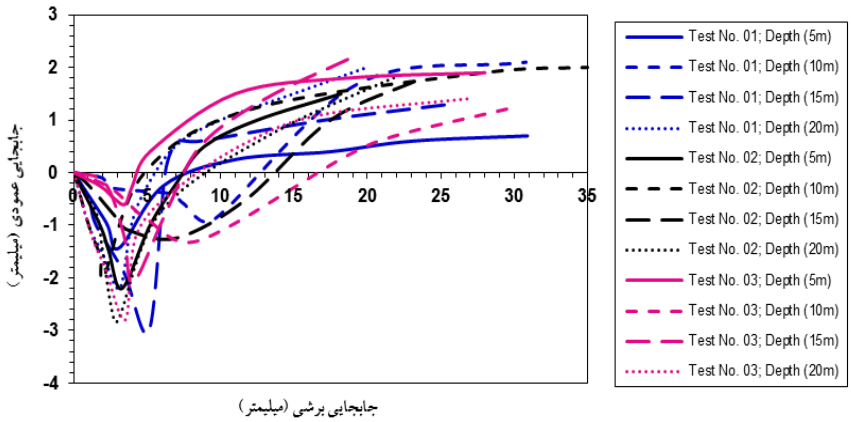


شکل ۱۲. نتایج آزمون‌های برش برجا در عمق‌های مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

جدول ٤. میانگین نتایج آزمون‌های برش برجا

شماره نمونه	عمق (متر)	USCS	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویهٔ اصطکاک داخلی اوج (درجه)	مدول تغییر شکل (مگاپاسکال)
خاک با سیمانتاسیون متوسط (M.C. Soil)	۵	GW-GM	۳۰–۳۵	۳۹	۵۰–۶۰
	۱۰	SP-SC	۵۰–۶۰	٤۱	۷۵–۸۵
	۱۵	GW-GC	۵۰–۶۰	٤۱	۸۵–۹۰
	۲۰	GW-GC	۵۰–۶۰	٤۱	۹۵–۱۰۵
خاک با سیمانتاسیون زیاد (H.C. Soil)	۵	GW-GM	۳۵–٤۰	۳۹	۶۰–۷۰
	۱۰	GW-GC	۵۰–۶۰	۳۹	۷۵–۸۵
	۱۵	GW-GC	۶۵–۷۵	٤۲	۱۱۰–۱۲۰
	۲۰	GC	۱۱۰–۱۲۰	٤۱	۱۲۵–۱٤۰



شکل ۱۳. منحنی جابه‌جایی عمودی در مقابل تغییر مکان برشی در آزمون‌های برش برجا

تعیین سرعت موج برشی

خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زمین یک ساخت‌گاه تأثیر مهمی بر مشخصات زمین‌لرزه در سطح زمین دارد. سرعت موج برشی آبرفت، یکی از پارامترهای مهم در تحلیل اثرات ساختگاه است. در رسوبات آبرفتی، سرعت موج برشی عمدتاً وابسته به جنس خاک، بافت، تاریخچهٔ بارگذاری، سیمانتاسیون و تنش موثر همه جانبه (عمق قرارگیری لایه مورد نظر) است [۳۸].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

بورچرت و همکاران (۱۹۹۱) نشان دادند که رابطهٔ بین بزرگ‌نمایی جنبش زمین و متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی زمین وجود دارد. در این راستا نقشه‌ای برای سانفرانسیسکو تهیه کردند که در آن واحدهای زمین‌شناسی در چهار گروه بر اساس Vs_{30} طبقه‌بندی شد [۳۹]. پس از آسیب‌های وارده به زلزله نورث‌ریج (۱۹۹٤) پژوهش‌های انجام شده نشان داد مناطقی که آسیب‌های گسترده دیده‌اند با نوع ساخت‌گاه در ارتباط مستقیم هستند. برای این منظور تحقیقات روی اندازه‌گیری سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر و ۹۰ متر با استفاده از آزمون‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای در آمریکا انجام شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که رفتار زمین تا عمق ٤۰ متر تقریبا مشابه به عمق ۹۰ متر است. بنابراین عمق ۳۰ متر به‌عنوان عمق اندازه‌گیری میانگین سرعت موج برشی ملاک قرار گرفت. در این راستا ضوابط طراحی لرزه‌ای Caltrans، ساختگاه را بر اساس سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر پروفیل خاک، طبقه‌بندی کرده است. مطابق با این ضابطه، پروفیل خاک به شش گروه (A تا F) طبقه‌بندی می‌شود. معیار طبقه‌بندی Caltrans به‌وسیلهٔ سایر استانداردها و آیین‌نامه‌های دیگر همانند برنامه ملی کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله (۱۹۹۷)، آیین‌نامه ساختمانی یک‌نواخت (۱۹۹۷) و آیین‌نامه مهندسین عمران آمریکا (۲۰۱۵) پذیرفته شده است [٤۰]، [٤۱]، [٤۲].

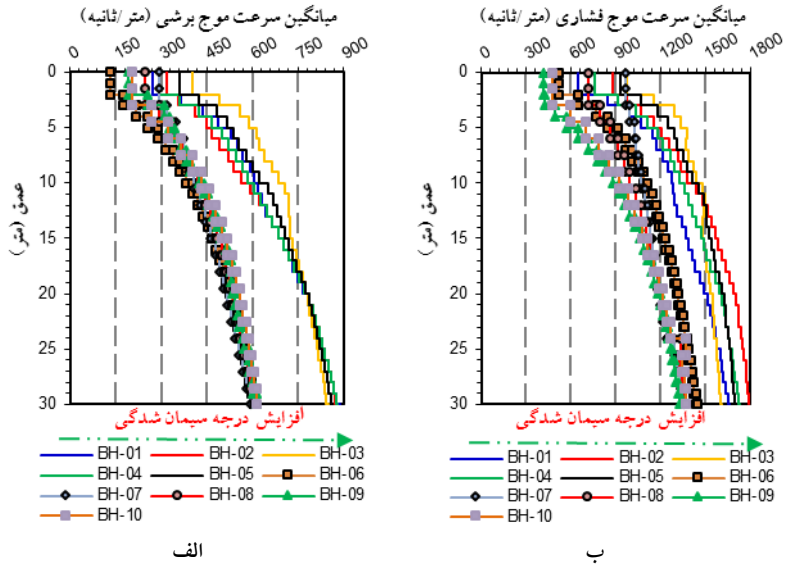
در آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) ایران-ویرایش چهارم، میانگین سرعت موج برشی با اقتباس از آیین‌نامه‌ی آمریکا، تا عمق ۳۰ متر اندازه‌گیری می‌شود. در این آیین‌نامه طبقه‌بندی زمین با استفاده از سه معیار: میانگین سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد یا مقاومت برشی زهکشی‌نشده انجام می‌شود [٤۳]. این در حالی است که طبقه‌بندی زمین بر اساس $V_{s,30}$ برای شرایطی که عمق سنگ بستر لرزه‌ای زیاد است. از این‌رو در آبرفت‌های درشت‌دانه شهر تهران به‌ویژه در نزدیکی ارتفاعات شمال و شرق تهران، با توجه به این که عمق سنگ بستر لرزه‌ای کم است، معیار اندازه‌گیری سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر خاک را سفت‌تر نشان می‌دهد.

در شکل ۱٤ نتایج آزمون‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای نشان داده شده است. مطابق با این شکل در می‌یابیم که $V_{s,30}$ در خاک‌های با سیمانتاسیون متوسط در حدود ٦۰۰ متر بر ثانیه است در حالی که در خاک‌های با سیمانتاسیون بالا به حدود ۸۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد.

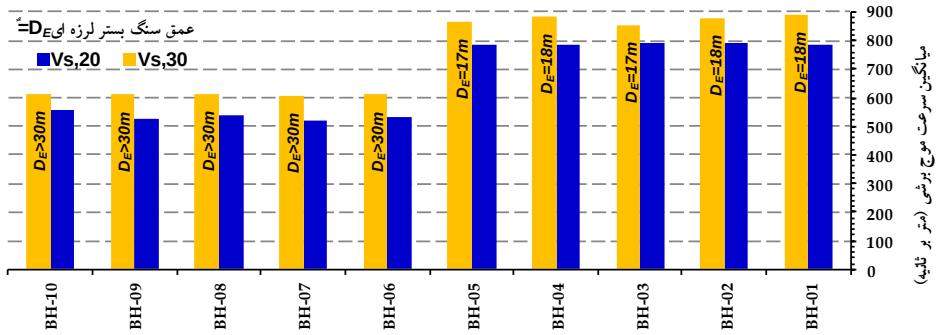
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

هم‌چنین با افزایش عمق با توجه به همگن‌بودن و یکنواختی نهشته‌های رسوبی، به‌دلیل تراکم بیش‌تر لایه‌ها و سیمانتاسیون بیش‌تر در هر دو نوع خاک، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. این در حالی است که این افزایش در عمق‌های بالاتر از ۲۵ متر چندان قابل توجه نیست.

مطابق با تحقیقات انباژگان و همکاران (۲۰۱۳) سنگ بستر لرزه‌ای به‌صورت N_{SPT} (میانگین مقدار N تا عدد ۱۰۰ هیچ نفوذی نداشته باشد) برای آزمایش نفوذ استاندارد و V_s



شکل ١٤. نتایج آزمون‌های لرزه‌ای درون‌گمانه‌ای، الف) میانگین سرعت موج برشی، ب) میانگین سرعت موج فشاری



شکل ۱۵. مقایسه میانگین سرعت موج برشی بر اساس عمق ۳۰ و ۲۰ متر و سنگ بستر لرزه‌ای در خاک‌های با سیمانتاسیون بالا و متوسط

(میانگین V_s تا مقدار ۷۰±۷۰۰ متر بر ثانیه) برای مقادیر میانگین سرعت موج برشی است [٤٤].

مقایسه اندازه‌گیری میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ (مطابق با آیین‌نامه‌های ایران، ایالات متحده، اروپا و استرالیا) و ۲۰ متر (آیین‌نامه چین) نشان می‌دهد که در خاک‌های با سیمانتاسیون بالا، رده‌بندی زمین بر اساس $V_{s,20}$ در رده‌بندی نوع ۲ قرار می‌گیرد در حالی‌که در صورتی اندازه‌گیری V_s تا عمق ۳۰ متر، نوع زمین در رده یک قرار می‌گیرد [٤٠]، [٤٨]. از طرف دیگر، در خاک‌های با سیمانتاسیون بالا، عمق سنگ بستر لرزه‌ای، کم‌تر از ۲۰ متر است. این در حالی است که در خاک‌های با سیمانتاسیون متوسط، این مقدار بیش‌تر از ۳۰ متر است. بنابراین درمی‌یابیم که اندازه‌گیری میانگین سرعت موج برشی در خاک‌های با سیمانتاسیون بالا که عمق سنگ بستر لرزه‌ای در فاصله کمی از سطح زمین (فصل مشترک خاک و سنگ) قرار دارد، چندان مناسب نیست و موجب می‌شود که خاک سفت‌تر در نظر گرفته‌شده و طبقه‌بندی آن بالاتر از مقدار مناسب در طراحی لرزه‌ای قرار گیرد. بنابراین در آبرفت‌های با سیمانتاسیون بالا، عمق مناسب برای اندازه‌گیری میانگین سرعت موج برشی، ۲۰ متر یا عمق سنگ بستر لرزه‌ای است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارتباط درجه سیمانتاسیون بر مشخصات مکانیکی و دینامیکی آبرفت‌های درشت‌دانه سری A شرق تهران با بررسی نتایج آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی بررسی شد. یافته‌های این تحقیق شامل این موارد است:

- نتایج آنالیز شیمیایی روی خمیره سیمان خاک نشان می‌دهد که آهک و سیلیس، بیش‌ترین درصد وزنی سیمان نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند.
- بررسی نتایج آزمون‌های برجا و تجزیهٔ شیمیایی نشان می‌دهد که چسبندگی و تغییر شکل خاک هم‌چنین سرعت موج برشی با درجه سیمانتاسیون خاک‌ها رابطهٔ مستقیمی دارد. این در حالی است که سیمانتاسیون تأثیری در زاویهٔ اصطکاک خاک ندارد.
- سیمانتاسیون باعث رفتار ترد در خاک‌های درشت‌دانه‌شده و محدوده الاستیک را افزایش داده است. در این راستا درمی‌یابیم که بیشینه جابه‌جایی برشی در خاک‌های با سیمانتاسیون زیاد بین ۵ تا ۷/۵ میلی‌متر و در خاک‌های با سیمانتاسیون متوسط بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

- سیستم طبقه‌بندی زمین در استاندارد ۲۸۰۰ ایران با اقتباس از آیین‌نامه‌های ایالات متحده امریکا بر مبنای اندازه‌گیری میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. این نوع سیستم طبقه‌بندی برای مناطقی همانند آبرفت‌های سیمانته شمال و شرق تهران که عمق سنگ بستر لرزه‌ای کم است (کم‌تر از ۲۰ متر)، مناسب نیست و خاک را سفت‌تر نشان می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود که نیروی زلزله کم‌تر از مقدار واقعی تخمین زده شود.

تشکر و قدردانی

نتایج آزمایش‌های این مقاله از گزارش بررسی‌های مرحلهٔ اول و دوم پروژه بزرگراه شرق تهران اخذ شده است. بررسی‌های مرحله اول به‌وسیلهٔ مهندسین مشاور ساحل و زمیران با تمرکز بیش‌تر در بخش حفاری در سنگ انجام شده است. آزمایش‌های مرحلهٔ دوم به‌منظور طراحی دسترسی‌ها، تونل‌های بخش آبرفتی، طراحی پل‌ها و کالورت‌های مسیر هم‌چنین تونل‌های کند و پوش و بزرگراه پایین‌افتاده به‌وسیلهٔ مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، ابنیه-سازان اونیکس و سازمان مشاور فنی و مهندسی شهرداری تهران با تأکید بر انجام آزمون‌های برجا، لرزه‌ای و تجزیهٔ شیمیایی انجام شده است. نظارت بر انجام همهٔ پژوهش‌ها به‌وسیلهٔ شرکت مهندسین مشاور سازبن پژوه انجام شده است.

از سازمان مهندسی و عمران شهر تهران به‌دلیل در اختیار گذاشتن اطلاعات فنی هم‌چنین آقای آقای دکتر محمد حسین صدقیانی برای راهنمایی‌هایی ارزنده ایشان در برنامه‌ریزی و انجام بررسی‌ها تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

1. Rieben E. H., "The geology of Tehran plain", American Journal of Science (1955) 617-639.
2. Rieben E. H., "Geological observations on alluvial deposits in northern Iran", Geological Survey of Iran 9 (1966) 39.
3. Engalenc M., "Contribution a la Geologie Geomorphologie. Hydrogeologie, dela region de Teheran (Iran)", C.E.R.H., Montpellier, France (1968) 365.
4. Pedrami M., "Pasadenian Orogeny and Geology of Last 700,000 Years of Iran", Geological Survey of Iranian (1981) 273.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

5. Abbassi M., Farbod Y., "Faulting and folding in quaternary deposits of Tehran's piedmont (Iran)", Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 34 (4), (2009) 522-531.

٦. علیایی م.، یثربی س. ش.، امامی م.، "روشی برای بررسی رفتار لرزه‌ای دیواره‌های حفاظت شده گودبرداری‌های عمیق با سیستم دیوار برلنی در آبرفت درشت دانه"، مجلهٔ علمی- پژوهشی مهندسی عمران مدرس، ۱۲ (٤) (۱۳۹۱) ٤۹-۳۷.

۷. طارمی م.، حسینی م.، پورهاشمی م.، صادقی م.، "مهندسی ارزش بر اساس رفتارنگاری تونل طی مرحلهٔ حفاری (مطالعهٔ موردی تونل حکیم)". نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ۱۱ (۱) (۱۳۹٦) -۵۱ ۷۲.

8. Sharifzadeh M., Kolivand F., Ghorbani M., Yasrobi Sh., "Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground–Niayesh tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 35 (2013) 178-188.

۹. حائری م.، یثربی س. ش.، ارومیه‌ای ع.، اصغری ا.، "تأثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی آبرفت‌های درشت دانه تهران"، نشریهٔ علمی پژوهشی امیرکبیر، ۳۲ (۲) (۱۳۸٤).

۱۰. حائری م.، یثربی س.ش.، ارومیه‌ای ع.، اصغری، ا.، "ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آبرفتهای درشت‌دانه و سیمانی شده تهران"، علوم زمین، ۱۱ (٤۷-٤۸) (۱۳۸۲) ۲-۱۵.

۱۱. باغبان گل‌پسند م.ر.، نیکودل م.ر.، ارومیه‌ای ع.،" بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی مهندسی بر پارامترهای مرتبط با ارزیابی تجربی نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر، تهران"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ۱۰ (۳) (۱۳۹۵).

۱۲. بربریان م.، قریشی م.، ارژنگ روش ا.، مهاجر اشجعی ا. ، "پژوهش و بررسی ژرف نو زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون"، گزارش شمارهٔ ٥٦ سازمان زمین شناسی کشور (۱۳٦٤).

۱۳. جعفری م.، اصغری ا.، "ریزپهنه‌ندی ژئوتکنیک لرزه‌ای جنوب‌غربی تهران از دیدگاه تأثیرات ساختگاهی"، نشریهٔ ۳-۹۸-۷۷ مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷٦).

١٤. جعفری م.، ریز هنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شمال تهران از دیدگاه تأثیرات ساختگاهی"، مؤسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۱).

15. Akhtarpour A., Mortezaee M., "Dynamic response of a tall building next to deep excavation considering soil–structure interaction", Asian J Civ Eng, (2018) 1-24.

۱۶. علاءدین ی.، طالبیان م.، آرین، م.، احمدی م. م.، "بررسی ژئوتکنیکی و پهنه‌بندی لرزه‌ای آبرفت در باختر تهران"، نشریهٔ علوم زمین (زمین ساخت) ۹٤ (۱۳۹٤) ۳۳۳-۳٤۲.

۱۷. اصغری ابراهیم، "تأثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی و تغییر شکل خاک‌های درشت‌دانه با نگرشی به آبرفت‌های تهران"، رسالهٔ دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۱).

18. Haeri S. M., Hamidi A., Hosseini S. M., Asghari E., Toll D. G., "Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand", Geotechnical and Geological Engineering Journal, Vol.24 (2006) 335-360.

۱۹. چشمی ا.، فاخر ع.، خامه‌چیان م.، ا.، "زمین‌شناسی آبرفت‌های تهران و ارزیابی طبقه‌بندی ریبن جهت مطالعات زمین‌شناسی مهندسی"، مجلهٔ علوم دانشگاه تهران، ۳٤ (۱) (۱۳۸۷) ٤۷-٦۱.

۲۰. چشمی ا.، رمضان‌نژاد الیردی ر.، فاخر ع.، "توسعه طبقه‌بندی آبرفت‌های تهران بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی"، فصلنامهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ۱۱ (۱) (۱۳۹۷) ٦٥-۷۹.

۲۱. شرکت مهندسی مشاور پردیسان سازه ابنیه، "گزارش جمع‌بندی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک پروژه تونل و آزاد راه شهید شوشتری (مرحلهٔ اول و دوم)"، (۱۳۹۷).

22. Park S. S., Choi S. G., Nam I. H., "Effect of plant-induced calcite precipitation on the strength of sand", J. Mater. Civ. Eng., Vol. 26 (2014).

23. Choi S., Wu S., Chu J., "Bio cementation for sand using an eggshell as calcium source: J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 142 (2016).

24. Lin H., Suleiman M. T., Brown D. G., Kavazanjian Jr. E., "Mechanical Behavior of Sands Treated by Microbially Induced Carbonate Precipitation", Vol. 142 (2016).

۲۵.جوزانی کهن گ.، نوروزی غ.، سحابی ف. و اوجانی ح.، "مقایسهٔ روش‌های شناخت کانی‌های رسی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و پتروفیزیکی در یکی از میادین گازی شرق کپه‌داغ"، نشریه علمی – پژوهشی مهندسی معدن، ۱۱ (۳۰) (۱۳۹۵) ۱-۱۱.

26. Tchalenko J. S., Berberian M., Iranmanesh H., Bailly M., Arsovsky M., "Tectonic framework of Tehran region, geological survey of Iran", Report No. 29 (1974) 7-46.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

27. Vita Finzi C., "Contributions to the Quaternary geology of southern Iran". G.S. of Iran. Rep. No. 47 (1979) 52.
28. Asghari E., Toll D. G., Haeri S. M., "Triaxial behavior of a cemented gravely sand", Tehran alluvium, Geotechnical and Geological Engineering Journal, Vol. 21 (2003) 1-28.
29. El May M., Souissi D., Ben Said H., Dlala M., "Geotechnical characterization of the quaternary alluvial deposits in Tunis City (Tunisia)", Journal of African Earth Sciences, vol. 108 (2015) 89-100.
30. Hamidi A., Yarbakhti P., "Constitutive modeling of cemented gravely sands including the effects of cement type", jeg. Vol.6 (2013) 1525-1544.
31. Huber H., "The Quaternary deposits of the Darya-i-Namak, Central Iran, Iranaian Oil Company", Geol. Note 51 (1960).
32. Dellenbach J., "Contribution a l etude geologigue de la region situeo a l est de Tehran, Iran", Fac Sci, Univ. Strasbourg (France) (1964).
33. Allenbach P., "Geologic and petrographic des Damavand und seiner Umgeburg (Zentral Elburz), Iran". Mitteilung Nr. 63, Geologisches Institut, ETH, Zuurich (1966).
34. Shafiee A., Azadi A., "Shear-wave velocity characteristics of geological units throughout Tehran city, Iran", J. Asian Earth Sci., Vol. 29 (2007) 105-115.
35. Ouhadi V. R., Yong R. N., "Ettringite formation and behaviour in clayey soils", Applied Clay Science, Vol. 42 (2008) 258-265.
36. Hamidi A., Soleimani S., "Shear strength –dilation relation in cemented gravely sands". International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 6 (2012) 415-425.
37. Ghafghazi M., DeJong J. T., Wilson D. W., "Evaluation of Becker penetration test interpretation methods for liquefaction assessment in gravelly soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 54 (2017) 1272-1283.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.7.1]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.581]

38. Santamarina J. C., Klein K., Fam M.,"Soils and waves", Wiley, Chichester, U.K (2001).
39. Borcherdt R., Wentworth C. M., Janssen A., Fumal T., Gibbs J., "Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, CA", Proc. 4th Int. Conf. Seismic Zonation, (1991) 545-552.
40. International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code", Whittier, CA (1997).
41. Building Seismic Safety Council, "NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings (and Other Structures)", Washington, DC (1997).
42. American Society of Civil Engineers, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", ASCE/SEI 7-15, Reston, VA (2015).
٤٣. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۹۵)، "آئین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله"، استاندارد ۲۸۰۰ – ویرایش چهارم.
44. Anbazhagan P., Neaz Sheikh M., Parihar A., "Influence of Rock Depth on Seismic Site Classification for Shallow Bedrock Regions", Natural Hazards Review, Vol. 14 (2013).
45. Standards Australia, "Structural design actions-earthquake actions in Australia", AS 1170.4-2007, Sydney, Australia (2007).
46. China Net for Engineering Construction Standardization, "Code for seismic design of buildings", GB 50011-2010, China Building Industry Press, Beijing (2010).
47. Bureau of Indian Standards (BIS), "Indian standard criteria for earthquake resistant design of structures", Part 1-General provisions and buildings." BIS 1983, New Delhi, India (2002).
48. Eurocode 8., "Design of structures for earthquake resistance", European Committee for Standardization (2004).