[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

ارائه اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای ساختگاه شهر سنندج

بهروز صمدیان؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه عمران، تهران،

علی فاخر*؛ دانشگاه تهران، دانشکدهٔ عمران

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۶/۰۵ پذیرش ۹۷/۰۱/۲۲

چکیده

با ترکیب مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی می‌توان اطلاعات زمین شناسی- ژئوتکنیکی ارائه کرد که در طراحی و برنامه‌ریزی فعالیت‌های عمرانی در منطقه‌ای بزرگ مانند شهرها مفید باشد. در این تحقیق مراحل گام به‌گام انجام این کار برای ساختگاه شهر سنندج ارائه شد که این مراحل در سایر مناطق نیز قابل انجام است. بدین‌منظور، ابتدا انواع واحدهای زمین‌شناسی سنندج شناسایی و خصوصیات آن‌ها شامل نحوهٔ تشکیل و منشأ پیدایش آن‌ها تشریح و از نظر زمین‌شناسی طبقه‌بندی شدند. برای اضافه کردن متغیرهای مهندسی به این طبقه‌بندی زمین‌شناسی، از نتایج ۲۱۱ گمانه ژئوتکنیکی در سطح شهر سنندج استفاده شد. برای تکمیل و کنترل متغیرهای ژئوتکنیکی به‌دست آمده، ۹ چاه در نقاط مختلف سنندج حفاری و یک سری آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شد. نهایتاً علاوه بر ارائهٔ نقشهٔ زمین‌شناسی و طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای واحدهای سنندج، معیارهای زمین‌شناسی برای تشخیص نوع واحد مورد برخورد در محل یک پروژه در سنندج ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: ساختگاه سنندج، زمین‌شناسی شهری، آزمایش‌های ژئوتکنیکی، طبقه‌بندی.

مقدمه

شناسایی ژئوتکنیکی زمین در منطقه‌ای بزرگ فقط با گمانه زنی و آزمایش‌های مهندسی مشکل است زیرا بسیار پرخرج و زمان‌بر است. این نوع شناسایی‌های گسترده نیازمند

*نویسنده مسئول afakher@ut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

بررسی‌های زمین‌شناسی در گام اول و سپس اضافه کردن اطلاعات ژئوتکنیکی به آن است که در نهایت منجر به طبقه‌بندی زمی‌شناسی- ژئوتکنیکی منطقه می‌شود. این نوع طبقه‌بندی‌ها در برنامه‌ریزی‌های کلان شهری و انتخاب سریع متغیرهای ژئوتکنیکی در پروژه‌های کوچک به‌کار می‌رود. علاوه بر آن این نوع طبقه‌بندی‌ها اطلاعات مفیدی در بارهٔ تأثیر اجرای ساخت و سازها بر تغییرات احتمالی شرایط محیطی و زمین‌های اطراف آن در اختیار قرار می‌دهد. طبقه‌بندی‌های زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی شهری زیادی در مناطق مختلف انجام شده است که به اختصار به بعضی از این تحقیقات اشاره می‌شود. فاخر و همکاران آبرفت تهران را که به‌وسیلهٔ ریبن از لحاظ سن زمین‌شناسی به ٤ گروه تقسیم شده بود بررسی کردند و علاوه بر عوامل زمین‌شناسی تأثیرگذار، اطلاعات ژئوتکنیکی هر کدام از گروه‌ها را استخراج و طبقه‌بندی جدید زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای آبرفت‌های تهران ارائه کردند [۱]، [۲]. چشمی و همکاران تأثیر شکل دانه‌ها را بر زاویهٔ اصطکاک آبرفت‌های تهران بررسی و روابط تجربی را برای انواع آبرفت‌های طبقه‌بندی شده تهران ارائه کردند [۳]. اسکیپر و همکاران ضمن شناسایی زمین‌شناسی رسوبات کواترنری شهر دابلین خصوصیات و مخاطرات رس این شهر را ارائه کردند [٤]. استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای شناسایی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک جاماییکا به‌همراه بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی خاک محل انجام شد [٥]. هم‌چنین فوچو و همکاران بررسی زمین‌شناسی مهندسی شهر تانگ چوان در چین را انجام دادند که در آن تحقیق به مشکلات اصلی ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی این شهر به‌همراه مشکلات ایجاد شده ناشی از فعالیت‌های عمرانی همانند شیروانی‌های ایجاد شده پرداخته شد [٦].

در تحقیق حاضر مثالی از مراحل این نوع تحقیقات و طبقه‌بندی‌ها برای شهر سنندج انجام شد. بر این اساس با ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی شهر سنندج با داده‌های ژئوتکنیکی جمع‌آوری حاصل از گمانه‌های حفاری شده و هم‌چنین به‌کمک حفر چندین چاه در نقاط مختلف این شهر، ارائه یک طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای شهر سنندج بررسی و علاوه بر آن، شناخت واحدهای زمین‌شناسی در نقاط مختلف این شهر و به نوعی پهنه‌بندی

آن بررسی شد. برای اینکه توسعهٔ شهری در سنندج با نگاه عمیق به شرایط ژئوتکنیکی انجام شود تهیهٔ طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی و شناخت جنس لایه‌ها در نقاط مختلف این شهر بسیار اهمیت داشت.

موقعیت شهر سنندج

شهر سنندج مرکز استان کردستان و در غرب ایران واقع شده است. مساحت شهر سنندج حدود $۸۰km^2$ و جمعیت آن از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ از ۳۰۰۰۰۰ به ۴۰۰۰۰۰ نفر افزایش یافته است. شکل ۱ موقعیت سنندج و معابر اصلی آن را نشان می‌دهد. از آن‌جا که سنندج در یک دره بزرگ واقع شده و از چهار طرف توسط کوه‌های بلند محاصره شده است، امکان زیادی برای گسترش سطحی شهر وجود ندارد و این موضوع باعث ازدیاد تعداد طبقات ساختمان‌ها و هم‌چنین احداث زیرزمین‌های عمیق می‌شود.

مواد و روش‌ها

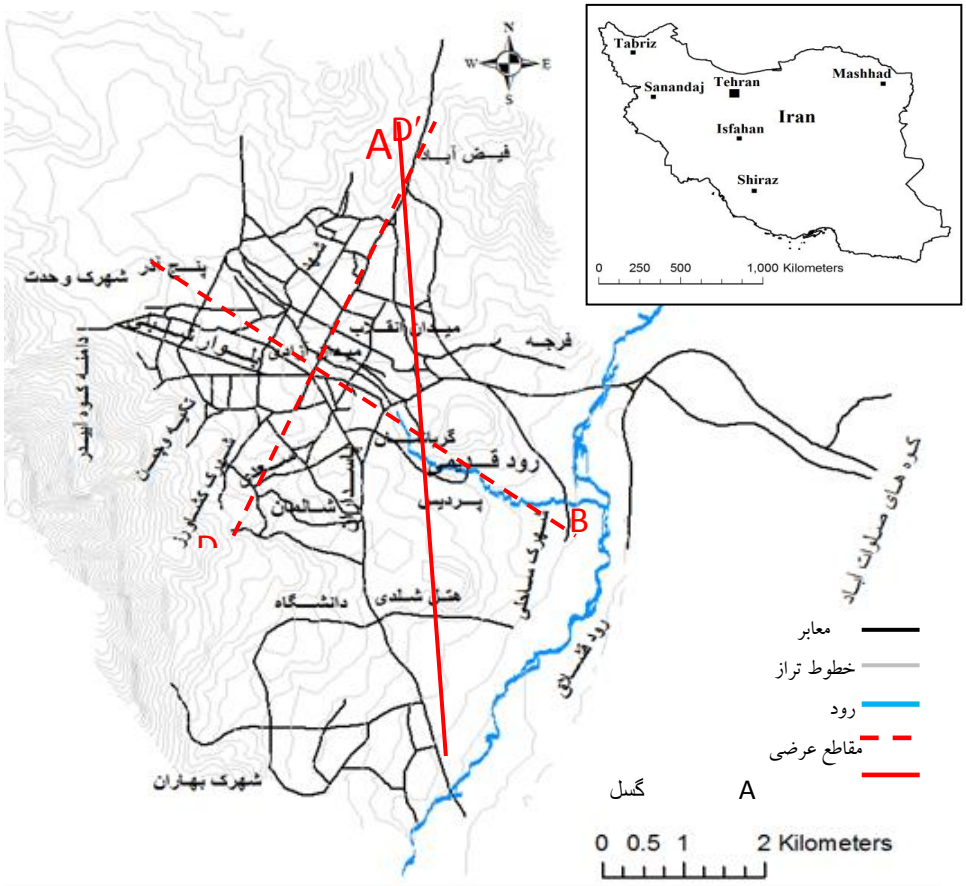
تحقیق ارائه شده در این مقاله در شش گام برای ساختگاه شهر سنندج انجام شد. مراحل انجام گام‌های این تحقیق و هدف از انجام آن‌ها به‌طور اختصار در جدول ۱ نشان داده شده است.

۱. گام اول بررسی زمین‌شناسی عمومی محدودهٔ مورد نظر

منطقهٔ بررسی شده در ناحیهٔ فعال لرزه‌ای در پهنه سنندج- سیرجان قرار دارد. طول پهنهٔ سنندج- سیرجان حدود ۱۵۰۰ و عرض آن ۱۵۰ تا $۲۰۰km$ است و از غرب دریاچه ارومیه آغاز و در راستای شمال غربی- جنوب شرقی تا گسل میناب در شمال بندرعباس ادامه دارد. همهٔ سنگ‌های سنندج- سیرجان در سه واحد زمین ساختی- چینه نگاشتی الف) پرکامبرین پسین-تریاس میانی، ب) تریاس بالایی-کرتاسه و ج) مجموعه ترشیری قرار گرفته است [۷]. رسوبات کرتاسه بالایی ناحیهٔ سنندج دارای ضخامت حدود $۱۷۰۰m$ از شیل تیره‌رنگ هستند که بعضاً لایه‌هایی از سنگ آهک و آتشفشانی دارند و شهر سنندج روی آن ساخته شده است و به‌همین دلیل شیل سنندج نامیده می‌شود [۸]. با توجه به نقشهٔ زمین‌شناسی سنندج،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]



شکل ۱. نقشهٔ موقعیت و معابر سنندج

واحدهای تشکیل‌دهندهٔ ناحیهٔ سنندج سنگ شیل، سنگ آهک، سنگ‌های آتشفشانی، و رسوبات آبرفتی عهد حاضر(کواترنری) هستند [۹]. وجود گسل‌ها در منطقه به‌عنوان عامل تکتونیکی، باعث تسریع در تخریب و فرسایش و منجر به تشکیل رسوبات آبرفتی کواترنری شده است. هم‌چنین وجود رودخانه قشلاق در منطقه و عبور آن از شهر سنندج در تشکیل رسوبات آبرفتی مؤثر بوده است. عامل دیگر در تسریع تشکیل لایه‌های خاک در سنندج وضعیت توپوگرافی و شرایط آب و هوایی منطقه است. وجود کوه‌ها و پستی بلندی‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

بسیار زیاد در سنندج و اطراف آن باعث شده شهر سنندج مانند یک کاسه و در گودی آن قرار گیرد و کوه‌ها اطراف آن را محاصره کنند به‌همین دلیل سیلاب‌ها و رودهای فصلی با سرعت زیاد رسوب‌گذاری کرده و لایه‌های آبرفتی به ضخامت چندین متر را تشکیل داده‌اند.

جدول ۱. مراحل انجام گام‌های این تحقیق

گام	عنوان	هدف یا نتیجه
اول	بررسی زمین‌شناسی عمومی محدودهٔ مورد نظر	شناخت خصوصیات عمومی زمین‌شناسی
دوم	تعیین شواهد ظاهری لایه ها با بازدیدهای میدانی	الف) تعیین واحدهای سنگی و لایه‌های خاکی دارای رخنمون و بررسی وضعیت ظاهری آن‌ها، ب) ارائه نقشهٔ پراکندگی واحدهای سنندج
سوم	شناخت لایه‌های زیرسطحی	تعیین نوع لایه‌ها و ترسیم نیم‌رخ‌های طولی و عرضی
چهارم	طبقه‌بندی زمین‌شناسی بر اساس مراحل تشکیل واحدها	تعیین خصوصیات واحدهای زمین‌شناسی و نحوهٔ پیدایش آن‌ها
پنجم	تعیین خواص ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی	الف) جمع‌آوری اطلاعات موجود، ب) کنترل اطلاعات موجود، ج) تکمیل اطلاعات
ششم	ارائهٔ طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای منطقهٔ بررسی شده	الف) ارائهٔ طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی، ب) ارائه معیارهای تشخیصی زمین‌شناسی برای تعیین نوع واحد در محل یک پروژه

۲. گام دوم تعیین شواهد ظاهری واحدها با بازدیدهای میدانی

بازدیدهای میدانی در نوبت‌های متفاوت به‌صورت گسترده طی چند سال (از سال ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۳) برای این پروژه انجام شد. شواهد ظاهری و واحدهای اصلی مشاهده شده سنندج، شامل مشخصات انواع سنگ‌های غالب به‌همراه لایه‌های خاکی که بیش‌تر سنندج را می‌پوشاند در این قسمت تشریح شده است.

۲-۱. واحدهای سنگی

قرارگیری شهر سنندج در دره و توپوگرافی آن به‌صورتی است که تمام واحدهای سنگی دارای رخنمون ظاهری در دیواره این دره هستند. واحدهای مشاهده شده در سنندج شامل سنگ شیل، آهک و آندزیت است که مشخصات هر یک جداگانه تشریح شده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

۲-۱-۱. سنگ شیل

بنابر بررسی‌های XRD این واحد سنگی از کوارتز، فلدسپار و کانی‌های رسی تشکیل شده و این واحد سنگی متعلق به کرتاسه پسین است [۸]. شیل سنندج در بسیاری از نقاط شهر همانند دامنهٔ کوه آبیدر، کمربندی آبیدر- حسن‌آباد، شهرک سعدی، شهرک کشاورز، شهرک بهاران، شهرک پیام، شهرک بعثت، قوپال، پشت هتل شادی، دگایران، تپه شیخ سلام، تپه روسی و بسیاری از نقاط و تپه‌های داخل شهر دیده شد. شکل ۲ نمونه‌ای از سنگ شیل مشاهده شده را نشان می‌دهد. ناپیوستگی‌های شیل سنندج در سطح آن زیاد و هر چه عمق بیش‌تر می‌شود ناپیوستگی‌های آن کاسته می‌شود. این سنگ دارای هوازدگی بسیار زیاد بوده است و مخصوصاً در سطح زمین به‌دلیل وجود رطوبت و هوا کاملاً خرد و متلاشی شده است. مطابق مشاهدات انجام گرفته فاصلهٔ ناپیوستگی‌ها در نزدیکی سطح زمین از ۲۰ cm کم‌تر و باز شدگی آن‌ها از ۵ mm بیش‌تر بود. شیل، سنگ اصلی سنندج محسوب می‌شود و بنابر بازدیدهای انجام گرفته در این تحقیق، تخمین زده می‌شود ۷۰ درصد سطح شهر سنندج از سنگ شیل تشکیل شده باشد. بارگذاری و باربرداری در دوران‌های زمین‌شناسی نقش مهمی را در شکل دهی خصوصیات شیل بازی می‌کند شیل‌ها در هنگام باربرداری منبسط شده و درزه‌ها و ترک‌ها به‌وجود می‌آید. در نزدیکی سطح زمین، آب می‌تواند در درزه و ترک‌ها نفوذ کند و باعث افزایش رطوبت و کاهش مقاومت برشی شود. این کاهش مقاومت، شکاف و ترک‌های بیش‌تر را به‌دنبال خواهد داشت و گاهاً هوازدگی بسیار شدید سنگ و تبدیل شدن به خاک برجا را باعث می‌شود [۱۰]. این نوع شواهد ظاهری در بخش‌های مختلف سنندج مشاهده شد.

۲-۱-۲. سنگ آهک

این سنگ در سنندج به‌رنگ خاکستری و خاکستری تیره دیده می‌شود و ضخامت آن ۲۰۰ تا ۳۰۰ m و متعلق به کرتاسه پسین است. کاهش سطح آب دریاها و رسوب‌گذاری آهک بر روی شیل و تکرار تناوبی رسوب‌گذاری آن‌ها باعث به‌وجود آمدن میان لایه‌های آهک در شیل شده است [۹]. بنابر مشاهدات این تحقیق سنگ آهک در ارتفاعات سنندج همانند کوه

آبیدر و دامنه های آن یافت شد. شکل ۳ رخنمونی از سنگ آهک در سنندج را نشان می‌دهد. این سنگ عمدتاً روی سنگ شیل قرار دارد ولی به‌صورت میان لایه‌هایی در سنگ شیل نیز دیده می‌شود. سنگ آهک به‌تدریج در پای کوه آبیدر مخروط افکنه به‌وجود آورده است. البته قلوه سنگ‌های آهکی در نقاط دور از کوه آبیدر تا مرکز سنندج نیز مشاهده شد. مطابق این تحقیق در بیش‌تر نقاط مشاهده شده، فاصلهٔ ناپیوستگی‌های سنگ آهک سنندج ۱ تا ۲ m و بازشدگی آن‌ها از ۱ mm کم‌تر بود.

۲-۱-۳. سنگ آندزیت

گسترده‌ترین مناطقی در سنندج که سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه رخنمون دارند منطقه‌ای بین سنندج و دیواندره در ۹۰ کیلومتری شمال سنندج است که آن را با عنوان ولکانیک‌های بین چینه‌ای کرتاسه می‌شناسند. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی با رنگ خاکستری مایل به سبز تا تیره به‌صورت بین لایه‌ای با شیل‌های زغالی و آهک‌های روشن تا خاکستری قرار گرفته‌اند و ضخامت این سنگ ۳۰۰ تا ٤۰۰ m است [۹]. این سنگ آتشفشانی در کوه‌های صلوات‌آباد و دامنهٔ آن، کوه کوچکه رش، فرجه، بلوار دکتر حسینی و اطراف شهرک ساحلی مشاهده شد. در شکل ٤ رخنمونی از سنگ آندزیت سنندج نشان داده شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، فاصلهٔ ناپیوستگی‌ها در این سنگ ۰/۵ تا ۲ m و بازشدگی آن‌ها کم‌تر از ۱ mm است.

۲-۲. لایه‌های خاک

چنان‌که قبلاً گفته شد شهر سنندج در یک دره واقع شده است بنابراین در نقاط مختلف سنندج مخصوصاً در نقاط مرکزی (که مرکز درهٔ مذکور است) به لایه‌های خاکی به نسبت عمیق برخورد می‌شود. در این بخش لایه‌های خاکی مشاهده شده تشریح شده است.

۲-۲-۱. رس آبرفتی

این رس در سنندج حاصل عملکرد سیلاب‌ها است و از ناحیهٔ غرب سنندج تا شرق و بخصوص در مرکز سنندج دیده شد. ضخامت این لایه حدوداً ۵ الی ٤۰ m و ضخامت آن در بخش مرکزی سنندج (میدان آزادی) حدوداً به ٤۰ m می‌رسد. شکل ۵ رخنمونی از رس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

آبرفتی در گودبرداری را نشان می‌دهد. رس آبرفتی سنندج دارای دانه‌بندی نسبتاً یک‌نواخت بوده است و مقدار ناچیزی سنگ‌دانه درشت (کم‌تر از ٪۳۰) به اندازهٔ حداکثر cm ۲ در آن دیده می‌شود. شواهد فرسایش این سنگ‌دانه‌ها آشکار است و اغلب گردگوشه و یا پولکی هستند و بعضاً در برخی نقاط مقدار سنگدانه‌ها بیش‌تر از ٪۵۰ می‌شود. بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، طبق طبقه‌بندی متحد [۱۱] رس آبرفتی سنندج CL است که بعضاً به SC و یا GC تغییر نام می‌دهد. در شکل ٦ ازدیاد سنگ‌دانه‌ها در خاک رسی مشاهده می‌شود. البته سنگ‌دانه‌ها در تماس با هم نیستند و می‌توان قضاوت کرد که نقش مهمی در رفتار مکانیکی رس ندارند. هم‌چنین قلوه سنگ‌های آهکی سرگردان به قطر حدود ۷ الی cm ۱۵ که از کوه آبیدر و دامنه‌های غربی سنندج به بخش مرکزی سرازیر شده‌اند در میان لایه‌های رسی دیده می‌شود. هر چه فاصله رس از کوه‌های اطراف بیش‌تر می‌شود قطر سنگ‌دانه‌ها کم‌تر می‌شود. انباشته شدن رسوبات آبرفتی و سرازیر شدن آن از کوه‌های غربی سنندج، باعث به‌وجود آمدن مخروط افکنه شده است.

۲-۲-۲. رس برجا

این رس حاصل هوازدگی سنگ‌ها بخصوص شیل است و معمولاً در ارتفاعات غربی و برخی تپه‌های شیلی داخل سنندج که در سطح دچار هوازدگی شدید شده‌اند دیده می‌شود. ضخامت خاک رس برجا کم و معمولاً از چند متر تجاوز نمی‌کند. از خصوصیات ظاهری این رس آن است که در آن سنگ‌دانه‌های به‌نسبت درشت ۳ الی cm ٤ وجود دارد. این سنگ‌دانه‌ها تیز گوشه است و شواهد فرسایش آبی در آن‌ها کم‌تر دیده شد. شکل ۷ نمونه‌ای از رس برجا همراه با سنگ‌دانه تیزگوشه در آن را نشان می‌دهد. در جدول ۲ نیز دو نوع رس سنندج با هم مقایسه شده است. شکل سنگ‌دانه‌های درشت در رس‌های آبرفتی و برجا فرق دارد و به‌خوبی نشان‌دهندهٔ آبرفتی یا برجا بودن لایه است.

۲-۲-۳. شن و ماسه

با توجه به نقشهٔ سنندج در شکل ۱، بخشی از سنندج در دو طرف رودخانهٔ قدیمی بنا شده است و بخشی نیز در حاشیهٔ رود قشلاق قرار دارد. رودخانهٔ قدیمی سنندج از ارتفاعات

غربی این شهر سرچشمه گرفته و از سمت غرب به‌شرق و به رودخانهٔ قشلاق می‌پیوندد. لایه‌های شن و ماسه در مسیر رود قشلاق و اطراف آن به ضخامت حداکثر ۲۵ m و هم‌چنین در مسیر رود قدیمی (بلوار کردستان) به‌ضخامت چند متر مشاهده شد. با توجه به چاه آب‌های مشاهده شده در برخی نقاط سنندج مثل بلوار شبلی، بلوار چمران، مردوخ جنوبی و میدان آزادی در زیر لایه‌های رسی، میان لایه شن و ماسه تمیز وجود داشته که آب‌های زیرزمینی در آن جریان دارند. لازم به ذکر است در مسیل رودخانه‌ها خصوصیات خاک می‌تواند تغییرات چشم‌گیری نسبت به سایر خاک‌های ساختگاه داشته باشد. شکل ۸ نمونه‌ای از شن و ماسه رودخانه‌ای در اطراف رود قشلاق را نشان می‌دهد.



شکل ۲. شیل در شهرک سعدی



شکل ۳. آهک در دامنه کوه آبیدر



شکل ٤. آندزیت در بلوار دکتر حسینی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]



شکل ۵. رس آبرفتی



شکل ٦. دانه‌های درشت گردگوشه در رس آبرفتی



شکل ۷. دانه‌های تیزگوشه در رس برجا

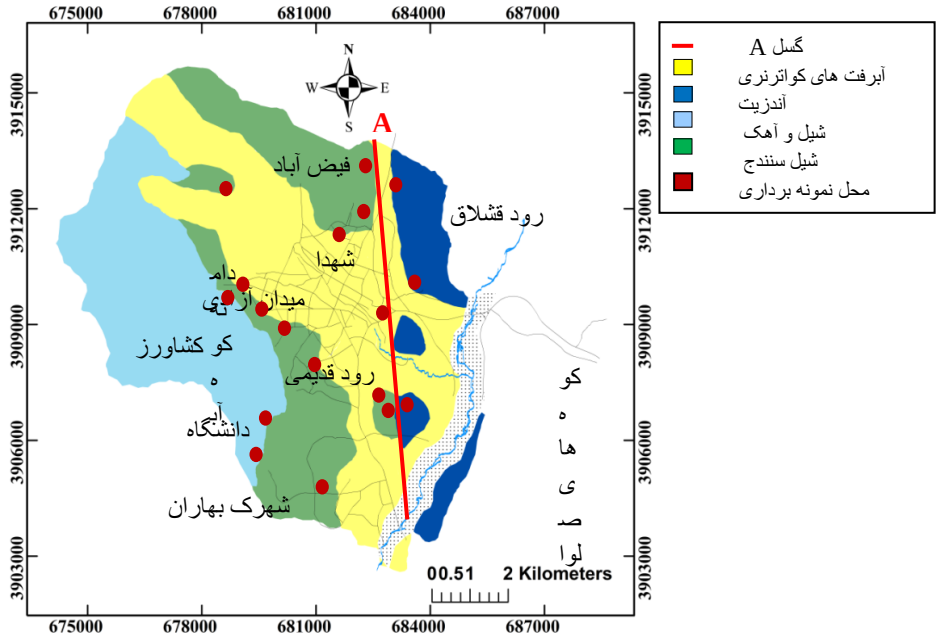


شکل ۸. شن و ماسه رودخانه‌ای اطراف رود قشلاق

۲-۳. نقشهٔ زمین‌شناسی سنندج

در این تحقیق، بر اساس پیمایش‌ها و بازدیدهای میدانی انجام شده و به‌کمک برداشت‌های انجام گرفته با دستگاه GPS، نقشهٔ پراکندگی واحدهای زمین‌شناسی شهر سنندج به‌صورت تقریبی تهیه **شد** (شکل ۹). در این نقشه، واحدهای سنندج شامل شیل، سنگ‌آهک، آندزیت و آبرفت‌های کواترنری به‌همراه گسل A و هم‌چنین محل نمونه‌برداری از واحدهای سنگی نیز مشخص شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]



شکل ۹. نقشهٔ زمین‌شناسی واحدهای سنندج به‌صورت تقریبی

۳. گام سوم شناخت لایه‌های زیرسطحی

برای شناخت لایه‌های زیرسطحی لازم است از نتایج حاصل از گمانه‌زنی استفاده شود. اطلاعات گمانه‌های استفاده شده در این تحقیق، شامل عمق سنگ بستر، تراز آب زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌ها در نقاط مختلف سنندج است که در بخش‌های بعدی تشریح شده است. بر اساس نتایج ۲۱۱ گمانه جمع‌آوری شده در سطح شهر سنندج که قبلاً حفاری شده بود، نیم‌رخ‌های عبوری از مرکز سنندج ترسیم شد. در شکل ۱۰، نیم‌رخ B-B′ در امتداد رود قدیمی و نیم‌رخ D-D′ عمود بر آن که از مرکز سنندج عبور کرده نشان داده شده است. هم‌چنین در این شکل مقطع نیم‌رخ‌های ذکر شده ارائه شده است. لازم به ذکر است این رود هم اکنون به‌دلیل کم آبی در مرکز سنندج دیده نمی‌شود و روی آن پوشیده و بلوار احداث شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

جدول ۲. مقایسهٔ ظاهری رس آبرفتی و برجای سنندج

نوع رس	منشأ تشکیل	وجود سنگ‌دانه شنی و ماسه‌ای			وجود قلوه سنگ آهکی و آندزیتی	ضخامت	سفتی
		درصد سنگ‌دانه	اندازهٔ سنگ‌دانه	شکل سنگدانه			
آبرفتی	هوازدگی و فرسایش سنگ‌های اطراف سنندج و حمل آن‌ها در اثر سیلاب‌ها	تا ۳۰ درصد	حداکثر ۲۰ میلی‌متر	گردگوشه و پولکی	قلوه سنگ تا قطر ۱۵۰ میلی متر و حداکثر ۲۰ درصد	کم‌تر از ٤٠ متر	متوسط تا خیلی محکم
برجا	هوازدگی سنگ اطراف سنندج	تا ٤٠ درصد	حداکثر ٤٠ میلی‌متر	تیزگوشه	–	کم‌تر از ۵ متر	نرم تا متوسط

٤. گام چهارم طبقه‌بندی زمین‌شناسی بر اساس مراحل تشکیل واحدها

در این گام لازم است طبقه‌بندی زمین‌شناسی واحدهای تعیین شده در گام‌های سوم و چهارم بر اساس مراحل تشکیل آن‌ها ارائه شود. از این‌رو مراحل تشکیل واحدهای زمین‌شناسی سنندج به‌صورت تقریبی در جدول ۳ ارائه شد.

۵. گام پنجم تعیین خواص ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی

این گام با چند فاز طی شد. ابتدا اطلاعات موجود گردآوری، سپس اطلاعات موجود کنترل و نهایتاً اطلاعات تکمیلی به‌وسیله شناسایی‌های میدانی اضافه شد.

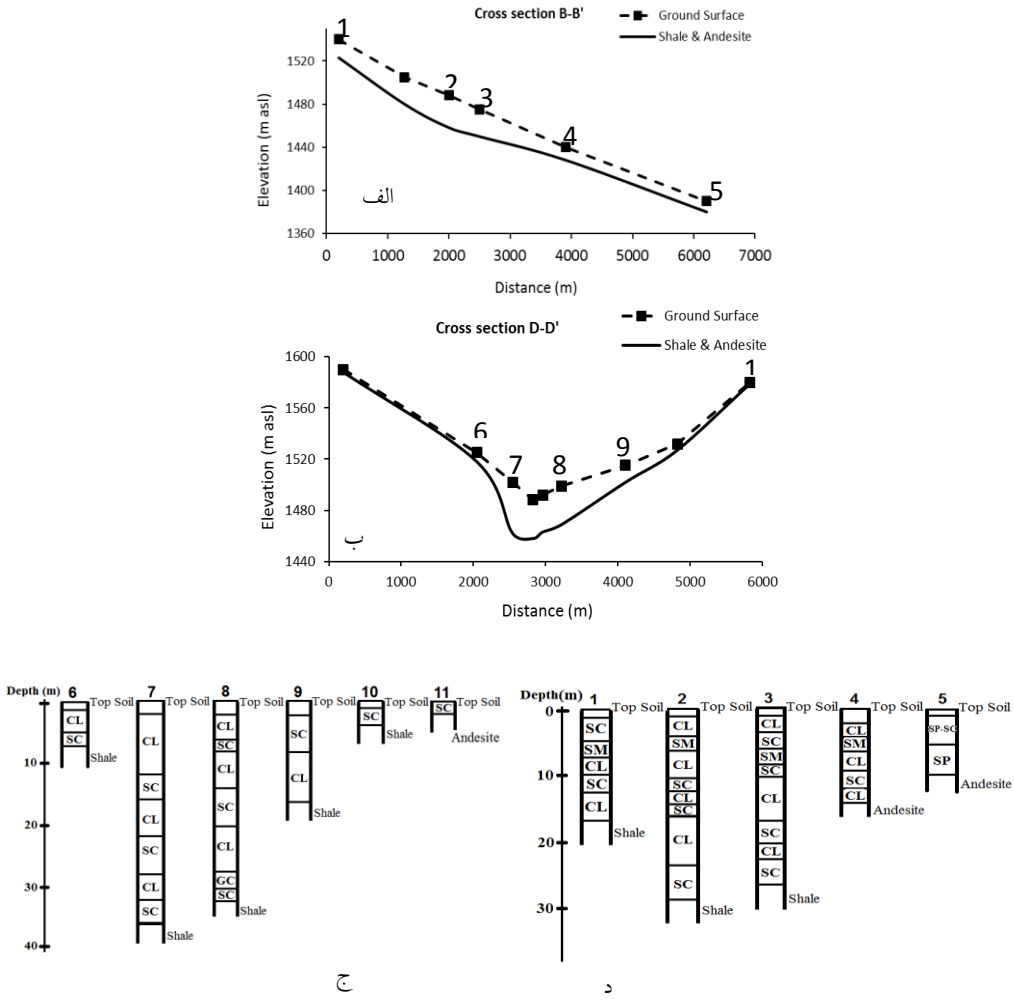
۵-۱. جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی موجود

در این تحقیق برای تأمین داده‌های ژئوتکنیکی از خواص مهندسی لایه‌ها، اطلاعات گمانه‌زنی و شناسایی‌های ژئوتکنیکی انجام شده در سطح شهر سنندج جمع‌آوری شد. این اطلاعات حاصل از ۲۱۱ گمانه حفاری شده به عمق حداکثر ٤٠ m بود. برای استفاده سریع از داده‌های ژئوتکنیکی و تصمیم‌گیری و مدیریت پروژه‌ها داده‌های ژئوتکنیکی با سیستم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) ذخیره و بانک اطلاعاتی تشکیل شد. برای تشکیل بانک اطلاعاتی، ابتدا با توجه به در اختیار داشتن لایه‌های GIS شامل معابر، رودخانه‌ها و توپوگرافی نقشه سنندج تشکیل شد. سپس با تـوجه بـه مختصات جغرافیایی گمانـه‌ها، محل



شکل ۱۰. نیم‌رخ‌های طولی و عرضی به‌همراه مشخصات گمانه‌ها الف) نیم‌رخ B-B′ در امتداد رود قدیمی، ب) نیم‌رخ D-D′ عبوری از مرکز شهر، ج) لایه‌های مشاهده شده در گمانه‌های حفر شده در نقاط ۱ تا ۵، د) لایه های مشاهده شده در گمانه‌های حفر شده در نقاط ٦ تا ۱۱

گمانه‌ها روی نقشهٔ سنندج به‌صورت عارضه نقطه‌ای پیاده و اطلاعات ژئوتکنیکی به‌صورت جداول روی عارضه‌ها ذخیره شد. در این بانک اطلاعاتی مشخصات کامل گمانه‌ها به‌همراه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و تغییرشکل‌پذیری لایه‌ها و برخی اطلاعات کلی مربوط به پروژه‌ها وجود دارد. شکل ۱۱ محل گمانه‌هایی را نشان می‌دهد که اطلاعات آن‌ها جمع‌آوری شده است.

۵-۲. کنترل اطلاعات گمانه‌های جمع‌آوری شده و شناسایی تکمیلی لایه‌ها

در این تحقیق تعدادی چاه دستی حفاری و یک سری آزمایش‌ها انجام شد. اهداف حفر چاه‌ها و آزمایش‌های جدید را می‌توان: الف) مقایسه و کنترل اطلاعات قبلی و ب) تهیه اطلاعات تکمیلی ذکر کرد.

۵-۲-۱. حفر چاه‌های دستی در آبرفت و انجام آزمایش‌های شناسایی

در این تحقیق به‌منظور شناسایی و مشاهده دقیق تر خاک سنندج، ۹ چاه به قطر ۱ تا m ۱/۲ در نقاط مختلف سنندج به‌روش دستی حفاری شد. انتخاب این محل‌ها به‌دلیل نزدیکی آن‌ها با محل گمانه‌های حفاری شده قبلی است تا مقایسه و مطابقت با آن‌ها میسر باشد. شکل ۱۱ محل چاه‌ها را روی نقشه سنندج و جدول ٤ نیز مشخصات چاه‌ها را نشان می‌دهد. برای شناسایی، یک سری آزمایش‌ها مطابق استاندارد ASTM برنامه‌ریزی شد. بدین‌منظور در هر متر از عمق چاه‌ها آزمایش‌های مخروط ماسه‌ای، دانه‌بندی، حد روانی و حد خمیری انجام شد [۱۲]، [۱۳]، [١٤]. علاوه بر آن، آزمایش‌های برش مستقیم، سه‌محوری و تحکیم نیز در هر چاه انجام شد [١٥]، [١٦]، [١٧]. جدول ٥ تعداد آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که محدودیت عمق چاه‌ها به‌دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی و یا برخورد به سنگ بستر بوده است و در صورت نیاز به اعماق بیش‌تر، از برداشت‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شود. بعد از تکمیل آزمایش‌ها روی نمونه‌های تهیه شده از چاه‌ها و مقایسه با داده‌های جمع‌آوری شده حاصل از گمانه‌ها، صحت اطلاعات جمع‌آوری شده تأیید شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

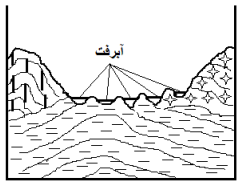
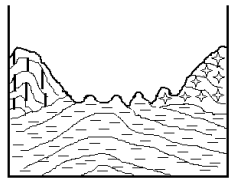
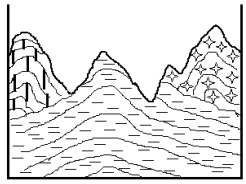
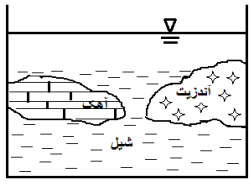
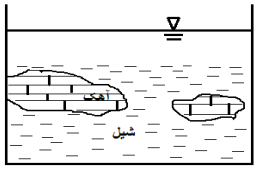
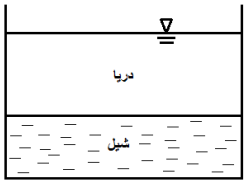
۵-۲-۲. شناسایی تکمیلی واحدهای سنگی سنندج

به‌طور معمول واحدهای سنگی برای ساخت و سازهای سبک شهری مقاومت کافی دارند بنابراین در پروژه‌های قبلی انجام شده در شهر سنندج کم‌تر به آن‌ها توجه شده است و اطلاعات چندانی از آن‌ها در دسترس نیست. در این تحقیق برای شناخت واحدهای سنگی سنندج، طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس سیستم طبقه‌بندی RMR و سیستم امتیازدهی سنگ شیل فرانکلین مد نظر قرار گرفت [۱۸]، [۱۹]. بر این اساس آزمایش‌های وزن مخصوص و درصد جذب آب، شاخص دوام و بار نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM انجام شد [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]. انتخاب آزمایش بار نقطه‌ای به‌دلیل سادگی، سرعت و هم‌چنین وجود هم‌بستگی با آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بود. با توجه به این‌که سنگ آهک و سنگ آندزیت سنندج جزء سنگ‌های خوب محسوب شده و زوال‌پذیر نیستند آزمایش شاخص دوام در آن‌ها به تعداد کم انجام شد. اما در خصوص سنگ شیل می‌توان گفت شیل‌ها به هنگام خاک‌برداری سریعاً هوازده شده و به‌شدت با کاهش مقاومت مواجه می‌شوند و جزء سنگ‌های زوال‌پذیر محسوب می‌شوند. به این علت برای شناخت پارامترهای مهندسی این سنگ، ارزیابی دوام این نوع سنگ مورد توجه قرار گرفت. جدول ٦ تعداد آزمایش‌های انجام شده بر واحدهای سنگی سنندج را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است برای آزمایش بار نقطه‌ای، نمونه‌های سنگ آهک و سنگ آندزیت به‌وسیله دستگاه کرگیری تهیه شدند اما به‌دلیل متورق بودن سنگ شیل، نمونه‌ها شکل نامنظم داشتند.

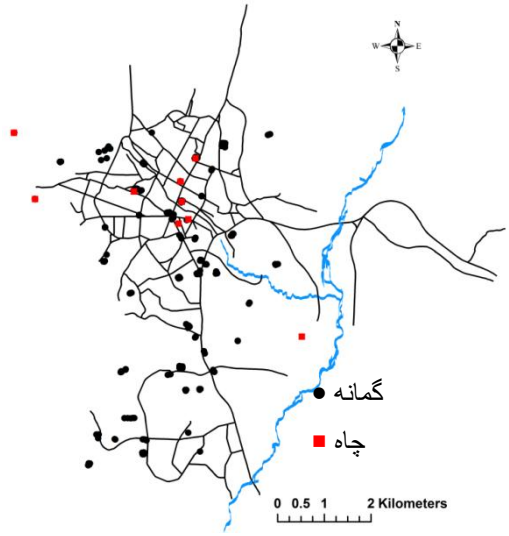
۵-۳. جمع‌بندی خصوصیات ژئوتکنیکی

با توجه به بانک اطلاعاتی تشکیل شده و نتایج آزمایش‌های تکمیلی انجام گرفته خصوصیات فیزیکی و شکل پذیری خاک سنندج در جدول ۷ و خصوصیات مقاومتی در جدول ۸ ارائه شده است. هم‌چنین شرایط ناپیوستگی‌ها و خصوصیات واحدهای سنگی نیز مطابق جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شد.

جدول ۳. مراحل تشکیل واحدهای زمین‌شناسی سنندج به‌صورت تقریبی

زمان تقریبی	اتفاق مهم در سنندج	شکل
۲ میلیون سال قبل	ایجاد رسوب‌های آبرفتی و برجا در دره سنندج (به‌دلیل وضعیت توپوگرافی و گسل‌های منطقه فرسایش به سرعت انجام شده است)	
کم‌تر از ٦٥ میلیون سال تا کنون (پالئوسن)	فرسایش شدید و به‌وجود آمدن دره سنندج همراه با تپه‌های کوچک	
٦٥ میلیون سال قبل	ایجاد کوه‌ها در منطقه سنندج به‌دلیل کوه‌زایی لارامین و بسته شده دریای نئوتتیس	
۸۰ میلیون سال قبل (کرتاسه پسین)	ایجاد سنگ آندزیت در بخش شرقی سنندج بر اثر فعالیت‌های آتشفشانی در کف دریای نئوتتیس و ته نشست مجدد شیل روی آهک و آندزیت	
کم‌تر از ۹۸ میلیون سال قبل (کرتاسه پسین)	تشکیل رسوبات پلیتی و میان لایه‌های آهکی	
۹۸ میلیون سال قبل (کرتاسه پسین)	پیش‌روی دریای نئوتتیس در کرتاسه و ته نشست رسوبات پلیتی و تشکیل شیل در این دریا	

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]



شکل ۱۱. محل گمانه‌های قبلی و چاه‌های جدید حفاری شده در این تحقیق

جدول ٤. مشخصات چاه‌ها

چاه	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
محل	دبیرستان قدس	مدرسه ۱۳ آبان	مدرسه حیات طیبه	بلوار نمکی	ساختمان فلسطین	مجتمع مولوی	شهرک ساحلی	دامنه کوه آبیدر	شهرک وحدت
عمق (m)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵	۱۰	۳	۱۰
نوع خاک	آبرفتی	آبرفتی	آبرفتی	آبرفتی	آبرفتی	آبرفتی	آبرفتی	برجا	آبرفتی

جدول ۵. تعداد آزمایش‌های انجام شده روی لایه‌های خاک در این تحقیق

آزمایش دانه‌بندی	آزمایش رطوبت	آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری	آزمایش برش مستقیم تحکیم یافته زهکشی شده	آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده	آزمایش تحکیم	آزمایش مخروط ماسه‌ای
۸۱	۸۱	۸۱	۱۸	۱۸	۱۸	۸۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

جدول ٦. تعداد آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های سنگ در این تحقیق

نوع سنگ	محل نمونه‌برداری در سنندج	وزن مخصوص و در صد جذب آب	شاخص دوام	شاخص بار نقطه‌ای
شیل	شهرک سعدی- ۵ آذر- پردیس- تپه روسی- تکیه وچمن- هتل شادی- شهدا- انقلاب- مبارک‌آباد- شالمان- شهرک کشاورز- ویلا شهر- بهاران	٦۵ نمونه	۳۹ نمونه	۲٦ نمونه
آهک	شهرک زاگرس- دامنه کوه آبیدر- بهاران	۱۵ نمونه استوانه‌ای با D=76 (mm) و L/D=2	۹ نمونه	۱۵ نمونه استوانه‌ای با D=76 (mm) و L/D=2
آندزیت	پردیس- فیض آباد- فرجه	۱۵ نمونه استوانه‌ای با D=76 (mm) و L/D=2	۹ نمونه	۱۵ نمونه استوانه‌ای با D=76 (mm) و L/D=2

در این جدول D قطر نمونه و L ارتفاع نمونه است.

جدول ۷. محدوده خصوصیات فیزیکی و تغییر شکل‌پذیری لایه‌های خاک سنندج

لایه	خواص فیزیکی					خواص تغییر شکل پذیری			
	γ (kN/m^3)	PI	LL	ω %	Unified Classification	E (MN/m^2)	ν	Cc	Cs
رس برجا	۱٦-۱۸	۱۰-۲۵	۳۰-٤۸	۱۰-۳۰	CL,SC	۵-۱۵	۰/۳-۰/٤۵	۰/۲-۰/۳	-۰/۰۳ ۰/۰۲
رس آبرفتی	۱۸-۲۰	۱۰-۲۵	۳۰-٤۸	۵-۳۵	CL,SC	۷-۳۵	۰/۲۵-۰/٤	۰/۱-۰/۲	-۰/۰۲ ۰/۰۱
شن و ماسه	۱۸-۲۲	-	-	-	SM,SP,GM,GP	۲۰-۵۰	۰/۲-۰/۳	-	-

در این جدول Cc ضریب قابلیت فشردگی، Cs ضریب تورم، ν ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته، ω رطوبت، LL حد روانی، PI نشانه خمیری و γ وزن مخصوص است.

جدول ۸. خصوصیات مقاومتی خاک سنندج

لایه	خواص مقاومتی				
	c_u (kPa)	ϕ_u	c' (kPa)	ϕ'	SPT
رس برجا	۳۰-٦۰	۰-۵	۰-۳	۲۵-۳۰	۳-۱۰
رس آبرفتی	٦۰-۱۰۰	۰-۱۰	۳-۱۰	۲۵-۳۲	٦-۲۵
شن و ماسه	-	-	۰-۵	۳۲-۳۸	۱۵-٤۵

در این جدول SPT عدد نفوذ استاندارد، c چسبندگی و ϕ زاویهٔ اصطکاک است.

جدول ۹. وضعیت ناپیوستگی واحدهای سنگی سنندج

نوع سنگ	فاصله ناپیوستگی	بازشدگی	شرایط رطوبت
سنگ شیل	< ۲۰cm	> ۵ mm	کمی مرطوب تا مرطوب
سنگ آهک	۱ تا ۲ m	< ۱mm	کمی مرطوب تا مرطوب
سنگ آندزیت	۰/۵ تا ۲ m	< ۱mm	کمی مرطوب تا مرطوب

جدول ۱۰. خصوصیات واحدهای سنگی سنندج

نوع سنگ	شاخص دوام %	وزن مخصوص (kN/m^3)	جذب آب %	بار نقطه ای (MPa) Is(50)	RQD %	q_u (MPa)	E_M (GPa)	RMR
سنگ شیل	۸۵-۹۷	۲/۷۱-۲/۷۵	۲/۵-٤/۵	۰/۵-۲/۹	۰-٤۰	۵-۳۰	۰/۰۵-۲	IV-V
سنگ آهک	۹۸-۱۰۰	۲/٦۸-۲/۷۱	۰/۱-۱/۰	۳/۲-۸/۵	٤۰-۸۰	۳۰-۲۰۰	۵-۵۰	II-III
سنگ آندزیت	۹۷-۱۰۰	۲/۷۱-۲/۸۱	۰/۲-۲/۰	۲/۳-۱۳/۳	٤۰-۹۰	۳۰-۲۵۰	۵-۵۰	II-III

در این جدول RQD شاخص کیفیت سنگ، E_M مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ و q_u مقاومت فشاری تک‌محوری است.

٦. گام ششم ارائه طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای منطقهٔ بررسی شده

چنان‌که قبل از این اشاره شد طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی یک محدوده می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان و هم‌چنین شناسایی سریع و اولیه زمین در یک پروژه استفاده شود. با توجه به اطلاعات ارائه شده در بندهای قبلی این مقاله، طبقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای سنندج مطابق جدول ۱۱ پیشنهاد شد. در این طبقه‌بندی، واحدهای زمین‌شناسی به‌همراه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مخاطرات ژئوتکنیکی هر کدام از آن‌ها نشان داده شده است. از مزایای این نوع طبقه‌بندی‌ها این است که می‌تواند احتمال مواجهه به واحدهای مختلف در محدودهٔ بررسی شده را نیز مشخص کند. در این تحقیق، پژوهش‌های زمین‌شناسی، مشاهدات ظاهری و اطلاعات ژئوتکنیکی شهر سنندج نشان داد که برخی از عوامل بر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

احتمال برخورد به واحدهای خاص اثر می‌گذارند. برخی از این عوامل عبارتند: الف) تراز ارتفاعی، ب) فاصله از رود قشلاق و رود قدیمی و ج) فاصله از گسل A نشان داده شده در شکل ۱. این عوامل در ادامه تشریح شده‌اند.

جدول ۱۱. طبقه‌بندی زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی پیشنهادی برای سنندج در ترکیب با شکل ۱۲

ردیف	نوع واحد	مخاطرات ژئوتکنیکی	خواص فیزیکی	خواص مکانیکی	
۱	رس برجا	- مقاومت کم و نشست‌پذیری حتی در حالت خشک - احتمال زیاد ریزش در صورت گودبرداری با دیواره قائم	ضخامت (m)< ٥٠ γ (kN/m^3)=۱٦-۱۸ PI=۱۰-۲٥ LL=۳۰-٤۸ ω %=۱۰-۳۰	خواص تغییرشکل‌پذیری	Cc=۰/۲-۰/۳ Cs=۰/۰۲-۰/۰۳ E (MN/m^2)=-۱٥٠ ν=۰/۳-۰/٤٥
				خواص مقاومتی	c_u (kPa)=-٦۰۳۰ ϕ_u=۰-٥ c′(kPa)=۰-۳ ϕ′=۲٥-۳۰
۲	رس آبرفتی	-کاهش مقاومت و نشست(پذیری) در صورت جذب آب	ضخامت (m)< ٤۰ γ (kN/m^3)=۱۸-۲۰ PI=۱۰-۲٥ LL=۳۰-٤۸ ω %=٥-۳۰	خواص تغییرشکل پذیری	Cc=۰/۱-۰/۲ Cs=۰/۰۱-۰/۰۲ E (MN/m^2)=-۳٥۷ ν=۰/۲٥-۰/٤
				خواص مقاومتی	c_u (kPa)=-۱۰۰٦۰ ϕ_u=۰-۱۰ c′(kPa)=۳-۱۰ ϕ′=۲٥-۳۲
۳	شن و ماسه	- ناپایداری در گودبرداری قائم	ضخامت (m)< ۲٥ γ (kN/m^3)=۱۸-۲۲	خواص تغییرشکل پذیری	E (MN/m^2)=-٥۰۲۰ ν=۰/۲-۰/۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

ردیف	نوع واحد	مخاطرات ژئوتکنیکی	خواص فیزیکی	خواص مکانیکی	
				خواص مقاومتی	c′(kPa)=۰-۵ ϕ′=۳۲-۳۸
٤	سنگ شیل	- هوازدگی و متلاشی شدن سریع در معرض آب و هوا - ناپایداری در گودبرداری قائم با توجه راستای درزه ها	ضخامت (m)< ۱۷۰۰ γ (kN/m^3) =۲/۷۱-۲/۷۵ Slake durability %=۸۵-۹۷ Absorption % =-٤/٥ ۲/٥	Point load (MPa)=۰/٥-۲/۹ RQD=۰-٤۰ q_u (MPa)=٥-۳۰ E_M (GPa)=۰/۰٥-۲ , RMR=IV-V	
٥	سنگ آهک	- فاقد مخاطرات در پروژه های متداول	ضخامت (m)= ۲۰۰-۳۰۰ γ (kN/m^3) =۲/٦۸-۲/۷۱ Slake durability %=۹۸-۱۰۰ Absorption % =-۱/۰ ۰/۱	Point load (MPa)=۳/۲-۸/٥ RQD=٤۰-۸۰ q_u (MPa)=۳۰-۲۰۰ E_M (GPa)=٥-٥۰, RMR=II-III	
٦	سنگ آندزیت	- فاقد مخاطرات در پروژه های متداول	ضخامت (m)= ۳۰۰-٤۰۰ γ (kN/m^3)=۲/۷۱-۲/۸۱ Slake durability %=۹۷-۱۰۰ Absorption % =-۲/۰ ۰/۲	Point load (MPa)=۲/۳-۱۳/۳ RQD=٤۰-۹۰ q_u (MPa)=۳۰-۲٥۰ E_M (GPa)=٥-٥۰, RMR=II-III	

الف) تراز ارتفاعی

سنندج به‌وسیلهٔ کوه‌هایی در اطراف محاصره شده و هم‌چنین تپه‌هایی در داخل شهر وجود دارد هر چه به این ناهمواری‌ها (چه کوه‌های اطراف و چه تپه‌های داخل شهر) نزدیک‌تر باشیم احتمال برخورد به لایه‌های سنگی بیش‌تر است. تراز ارتفاعی بخش مرکزی شهر سنندج از سطح دریا حدود ۱٤٥۰ m است. حداکثر ارتفاع کوه‌های اطراف سنندج نیز حدود ۲٦۰۰m است و سنگ آهک از تراز ۱۷۰۰m به بالا مشاهده شد. بنابراین تراز ارتفاعی می‌تواند احتمال مواجهه به واحدهای مختلف را مشخص کند. هم‌چنین رس برجا در ترازهای ارتفاعی بالا و در دامنه کوه‌ها و بخصوص در مجاورت سنگ شیل به‌دلیل سست

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

بودن این سنگ دیده می‌شود. اما در مرکز شهر لایه آبرفتی ناشی از سیلاب‌ها تشکیل شده است. با توجه به پستی و بلندی‌های بسیار زیاد در سنندج اغلب پستی‌های بین تپه‌های کوچک، از رس آبرفتی پر شده‌اند.

ب) فاصله از رود قشلاق و رود قدیمی سنندج

به‌طور کلی خاک سنندج اغلب رس است و اغلب این رس آبرفتی است. ضخامت این خاک در بخش مرکزی که در اطراف رودخانه قدیمی قرار گرفته است نسبت به نقاط دیگر بیش‌تر است. در نزدیکی رودخانه قدیمی میان لایه هایی از ماسه به عمق ۲ الی ۳ m مشاهده شد. اغلب نوع خاک در نزدیکی رودخانه قشلاق شن و ماسه‌ای است. بنابراین فاصله از رود نیز می‌تواند به‌عنوان احتمال برخورد به نوع لایه خاکی مد نظر قرار گیرد.

ج) فاصله از گسل A

بر اساس نتایج تحقیق حاضر، در امتداد جنوب شرقی به‌سمت شمال سنندج گسل A قرار دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است مطابق نقشهٔ زمین‌شناسی سنندج، گسل صلوات‌آباد نیز با طول چند کیلومتر و با راستای شمال- جنوب که تقریباً با گسل A نیز هم‌راستا است در فاصلهٔ اندکی با آن، وجود دارد. لایه‌های سنگی در سمت راست گسل A عمدتاً سنگ آندزیت هستند و لایه‌های سنگی در سمت چپ این گسل سنگ شیل و یا سنگ آهک هستند (حدود ۹۰ درصد شیل و ۱۰ درصد آهک).

د) تعیین نوع واحدهای سنگی و لایه‌های خاکی در محل یک پروژه

نمودار شکل ۱۲ می‌تواند احتمال برخورد با نوع واحد سنگی و لایهٔ خاک سنندج را مشخص کند. نحوهٔ استفاده از این نمودار بدین‌شرح است:

برای تعیین نوع سنگ بستر در محل یک پروژه به بخش سمت راست نمودار مراجعه می‌شود. اگر محل پروژه در شرق گسل A قرار گرفته باشد سنگ بستر آندزیت است. در این صورت برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی آن به ردیف ٦ جدول ۱۱ مراجعه می‌شود. اما اگر محل پروژه در غرب گسل A قرار داشته باشد سنگ بستر شیل و یا سنگ آهک است. اگر

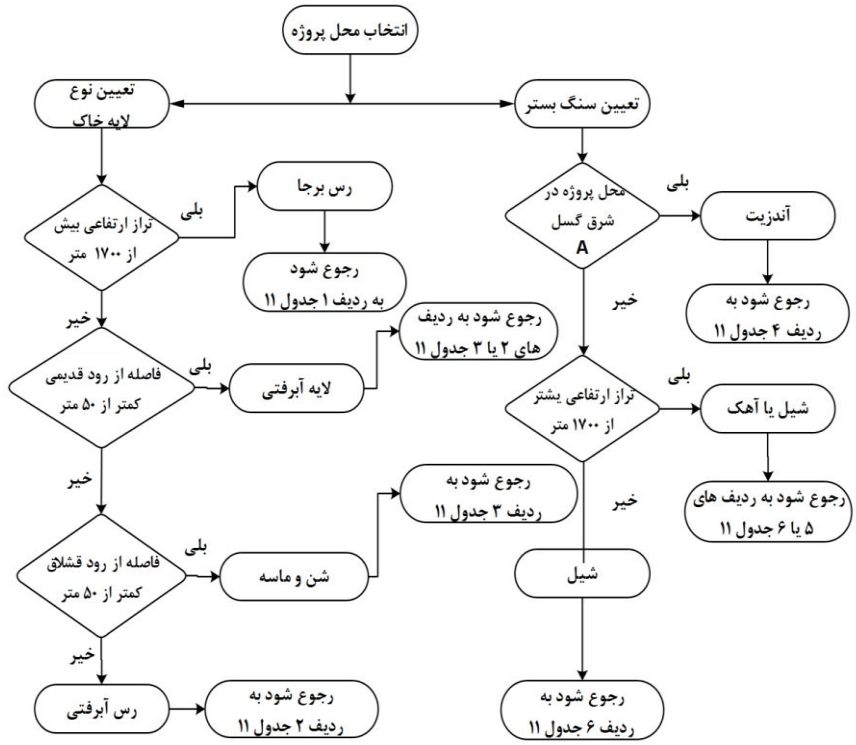
تراز ارتفاعی محل پروژه از m ۱۷۰۰ بیش‌تر باشد سنگ بستر شیل و یا آهک و در غیر این صورت سنگ بستر شیل است. برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی شیل و سنگ آهک به ترتیب به ردیف‌های ٤ و ٥ جدول ۱۱ مراجعه می‌شود.

برای تعیین نوع خاک محل یک پروژه به بخش سمت چپ نمودار مراجعه می شود. اگر تراز ارتفاعی از m ۱۷۰۰ بیش‌تر باشد خاک محل رس برجاست (SC یا CL). برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی آن به ردیف ۱ جدول ۱۱ مراجعه می‌شود. اما اگر تراز ارتفاعی از m۱۷۰۰ کم‌تر باشد خاک محل رس آبرفتی یا شن و ماسه است. در این صورت برای تشخیص نوع خاک فاصله از رود قدیمی در نظر گرفته می‌شود. اگر فاصله از رود کم‌تر از m ۵۰ باشد خاک محل آبرفتی است (SM، SP، SC یا CL). برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی آن‌ها به ردیف‌های ۲ و ۳ جدول ۱۱ مراجعه می‌شود. اگر فاصله از رود قدیمی از m۵۰ بیش‌تر باشد باید فاصله از رود قشلاق نیز مد نظر قرار گیرد. اگر فاصله از رود قشلاق از m۵۰ کم‌تر باشد خاک محل شن و ماسه است (GM، GP، SM یا SP). برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی آن‌ها به ردیف ۳ جدول ۱۱ مراجعه می‌شود. اما اگر فاصله از رود قشلاق از m۵۰ بیش‌تر باشد خاک محل رس آبرفتی است که برای تعیین خواص ژئوتکنیکی آن به ردیف ۲ جدول ۱۱ مراجعه می‌شود.

بحث

تحقیق حاضر روشی را برای ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ارائه می‌کند که تصویری از شرایط ژئوتکنیکی مناطق بزرگ همانند شهرها را مهیا می‌سازد. این روش بیش‌تر برای مناطقی کاربرد دارد که اطلاعات کافی گمانه‌ها در دسترس نباشد. در بسیاری از مطالعات شهری انجام شده تعداد گمانه‌های کافی در دسترس بوده است به‌عنوان مثال راسپا و همکاران از اطلاعات بیش‌تر از ۲۰۰۰ گمانه برای شناسایی بخش کوچکی از شهر رم استفاده کردند [۲۳].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]



شکل ۱۲. نمودارتعیین سنگ بستر و لایه محتمل در محل یک پروژه

در تحقیق حاضر تعداد گمانه‌های استفاده شده فقط ۲۱۱ و فاصله بین آن‌ها در برخی مناطق شهر سنندج بیش‌تر از km ۵ بود از این رو، با توجه به آن‌که اطلاعات کافی در بسیاری از نقاط سنندج در دسترس نبود اما به‌وسیله روش ارائه شده در این تحقیق، خواص ژئوتکنیکی تمامی لایه‌های خاکی و واحدهای سنگی شناسایی شد. بررسی‌های مشابه نیز به‌وسیلهٔ فاخر و همکاران و هم‌چنین چشمی و همکاران بر روی آبرفت تهران انجام شده است [۱]، [۳]. اما ساختگاه سنندج شامل واحدهای سنگی و لایه‌های آبرفتی است.

با توجه آن‌چه گفته شد تحقیق حاضر بر طبقه‌بندی زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تأکید می‌کند و یک روش گام به‌گام برای ارتباط سیستماتیک بین پژوهش‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ارائه می‌کند که با ترکیب کردن این طبقه‌بندی‌ها شناسایی ژئوتکنیکی مناطق بزرگ همانند شهرها حتی اگر فاقد گمانه‌های کافی باشند میسر می‌شود. علاوه بر آن با این

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

روش می‌توان معیارهای ساده تشخیصی نیز استخراج کرد تا خواص مهندسی لایه‌ها در هر نقطه قابل تعیین باشد. هم‌چنین این روش می‌تواند به‌عنوان یک روش بهینه و اقتصادی برای شناسایی ژئوتکنیکی مناطق بزرگ به‌کار گرفته شود.

نتیجه‌گیری

ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در یک منطقه بزرگ می‌تواند چارچوبی را فراهم آورد که در پژوهش‌*های* کلان توسعه‌ای مفید باشد. چنین چارچوبی می‌تواند اطلاعات ژئوتکنیکی را برای هر پروژه‌ای که در این منطقه مطرح شود، برای بررسی‌های اولیه پروژه در زمان کوتاه به‌دست دهد. با توجه به بررسی ارائه شده در این مقاله برای ساختگاه شهر سنندج نتایج زیر قابل ذکر است:

- مراحل گام به‌گام ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شهر سنندج تشریح شد که این مراحل منجر به تولید طیقه‌بندی زمین‌شناسی- ژئوتکنیکی برای این شهر شد. این نوع طبقه‌بندی برای شناسایی ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی در مناطق بزرگ همانند شهرها که گمانه‌های کافی در دسترس نباشند قابل استفاده است.
- واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده شهر سنندج عبارتند از شیل، آهک، آندزیت و واحد کواترنر که شامل لایه‌های رس آبرفتی، رس برجا و شن و ماسه رودخانه‌ای است. گستردگی و پراکندگی هر کدام از واحدهای ذکر شده در شهر سنندج شناسایی و ترسیم شد. هم‌چنین مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مخاطرات ژئوتکنیکی هر یک از واحدها تعیین و پیشنهاد شد.
- در این تحقیق معیارهای ساده زمین‌شناسی همانند گسل، تراز ارتفاعی، فاصله از رود که در شناسایی واحدهای زمین‌شناسی سنندج مؤثر بودند شناسایی شدند.
-اگر منطقه‌ای از سنندج برای توسعه شهری یا اجرای یک پروژه مطرح باشد با استفاده از شکل ۱۲ می‌توان نوع واحد مورد برخورد را پیش‌بینی کرد و سپس از جدول ۱۱) می توان خواص ژئوتکنیکی آنها را تخمین زد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

منابع

1. Fakher A., Cheshomi A., Khamechian M., "The addition of geotechnical properties to a geological classification of coarse grain alluvium a pediment zone", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 40 (2007) 163-174.
2. Rieben E. H., "Geological Observation on Alluvial Deposits in Northern Iran" Geological Organization of Iran, Report, 9 (in French) (1966).
3. Cheshomi A., Fakher A., Jones C. J. F. P., "A correlation between friction angle and particle shape metrics in Quaternary coarse alluvia", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 42 (2009) 145-155.
4. Skipper J., Follett B., Menkiti C. O., Long M., Clark-Hughes J., "The engineering geology and characterization of Dublin Boulder Clay", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38 (2005) 171-187.
5. Maharaj R. J., "Engineering-geological mapping of tropical soils for land-use planning and geotechnical purposes: A case study from Jamaica, West Indies", Engineering Geology, 40 (1995) 243-286.
6. Fuchu D., Yuhai L., Sijing D., "Urban geology: a case study of Tong Chuan city, Shaanxi Province, China", Engineering Geology, 38 (1994) 165-175.
7. Ghasemi A., Talbot C.J., "A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran)", Journal of Asian Earth Sciences, 26 (2006) 683-693.

۸. سهندی محمدرضا، "نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنندج"، شمارهٔ٥٤٦٠، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸٤).

۹. زاهدی مصطفی، "شرح نقشهٔ زمین‌شناسی چهارگوش سنندج مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۶۹).

10. Terzaghi K., Peck R., "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, New York (1976) 729.
11. ASTM D 2487-00., "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes" (2000).
12. ASTM D 1556-00., "Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method" (2000).
13. ASTM D 422-63., "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils" (2002).
14. ASTM D 4318-00., "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils" (2000).
15. ASTM D 3080-03., "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions" (2003).
16. ASTM D 2850-03a., "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils" (2003).
17. ASTM D 2435-03., "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading" (2003).
18. Bieniawski Z. T., "Engineering rock mass classifications", John Wiley & Sons, New York (1989) 251.
19. Franklin J. A., "A Shale Rating System and Tentative Application to Shale Performance, In Transportation Research Record 790", TRB, National Research Council, Washington D. C., (1981) 2-12.
20. ASTM D 6473-99., "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Rock for Erosion Control" (1999).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]

21. Bieniawski Z. T., "The point-load test in geotechnical practice", Engineering Geology, 9 (1975) 1-11.

22. Franklin J. A. & Chandra, R., "The Slake Durability Test", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 9 (1972) 325-341.

23. Raspa G., Moscatelli M., Stigliano F., Patera A., Marconi F., Folle D., Vallone R., Mancini M., Cavinato G.P., Milli S., Costa J.F.C.L., "Geotechnical characterization of the upper Pleistocene-Holocene alluvial deposits of Roma (Italy) by means of multivariate geostatistics: Cross-validation results". Engineering Geology, 101 (2008) 251-268.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.7.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.95]