بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک سازندهای ایلام- سروک در خرم‌آباد

محمدحسین قبادی*؛ دانشگاه بوعلی سینا، گروه زمین‌شناسی
اعظم قربانی‌صابر؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
حسن محسنی؛ دانشگاه بوعلی‌سینا، گروه زمین‌شناسی
علی ارومیه‌ای؛ دانشگاه تربیت مدرس، گروه زمین‌شناسی

چکیده

تاریخ: دریافت ۹۰/۱۰/۷ **پذیرش** ۹۲/٦/۱۷

شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سازندهای کربناته ایران به‌منظور تهیهٔ بانک اطلاعاتی ضروری است. در این پژوهش ضمن انجام بررسی‌های صحرایی، بررسی‌های آزمایشگاهی به‌منظور تعیین خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی روی پنج نوع از سنگ آهک‌های سازندهای ایلام- سروک در شهر خرم‌آباد صورت گرفته است. با توجه به داده‌های به‌دست آمده ارتباط بین خصوصیات سنگ‌شناسی با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بررسی شده است. برای بررسی ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی از نرم‌افزار ()[۱] استفاده شد. روابط به‌دست آمده ضرایب هم‌بستگی مناسبی دارند. با توجه به بررسی‌های مقاطع نازک سنگ عمده نمونه‌ها بر اساس رده‌بندی فولک، بایومیکرایت هستند. خمیره آهکی تیره حاوی ماده آلی و احتمالاً کانی‌های رسی است. محیط تشکیل اکثر سنگ‌های آهکی بررسی شده عمیق بوده است. سنگ آهک‌های ایلام- سروک سخت‌شدگی زیاد و تخلخل کم دارند و دانسیته متوسط تا زیاد دارند. سنگ‌های مذکور از دیدگاه دوام‌پذیری در ردهٔ خیلی مقاوم قرار می‌گیرند. مقاومت تراکمی تک‌محوری آن‌ها متوسط تا زیاد است. از لحاظ تراوایی سنگ‌های بکر نفوذناپذیر هستند. با توجه به رده‌بندی مهندسی سنگ بکر سنگ آهک‌های ایلام- سروک در ردهٔ CM و CL قرار می‌گیرند. مطابق با آزمایش انحلال‌پذیری سنگ آهک، متوسط ثابت سرعت انحلال سنگ آهک‌ها برابر با $۱/۳۹ \times ۱۰^{-٦}$ متر بر ثانیه محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی، سنگ آهک، سازندهای ایلام- سروک، خرم‌آباد.

* **نویسنده مسئول** amirghobadi@yahoo.com

۱. IBM SPSS Statistics (version 19.0)

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

مقدمه

باتوجه به این‌که ساخت اکثر پروژه‌های عمرانی در ارتباط مستقیم با سنگ است و سنگ به‌عنوان مصالح و یا به‌عنوان پی و ساخت‌گاه پروژه‌ها مطرح است، آنون[۱] (۱۹۷) وسویرز[۲] (۱۹۷۵) بررسی‌های مربوط به شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ را انجام داده‌اند. در این راستا بل[۳] (۱۹۹۸) شناخت خصوصیات فیزیکی بعضی از سنگ‌های کربناته، تامراکار[٤] و همکاران (۲۰۰۷) ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی و سنگ‌شناسی، د. آندره[٥] و همکاران (۱۹٦٤) رابطه بین مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت بار نقطه‌ای را بررسی کرده‌اند. پاچیک[٦] و هاتزر[۷] (۲۰۰٤) تأثیر تخلخل بر مقاومت کششی و تراکمی در گچ متخلخل، قهرمان[۸] و همکاران (۲۰۰٥) بررسی رابطهٔ بین مقاومت تک‌محوری و شاخص بار نقطه‌ای ۳۸ نوع سنگ مختلف، وایلی[۹] و همکاران (۱۹٥۸) بررسی عوامل مؤثر بر سرعت امواج الاستیک در محیط متخلخل، یسار[۱۰] و اردوغان[۱۱] و نیز قهرمان و یکن[۱۲] (۲۰۰۸) بررسی ارتباط سرعت صوت با دانسیته، مقاومت تراکمی و مدول یانگ سنگ‌های کربناته را انجام داده‌اند.

خرم‌آباد مرکز استان لرستان بین ٤۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ٤۸ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی قرار دارد [۲٦]. سازندهای آهکی ایلام- سروک با سن کرتاسه بخش وسیعی از این شهر را پوشانده‌اند.

در این پژوهش با هدف شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های آهکی سازندهای ایلام– سروک در خرم‌آباد، بر روی پنج نوع سنگ آهک، بررسی‌های سنگ‌شناسی انجام شده و با تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی نمونه‌ها، ارتباط بین ویژگی‌های مذکور بررسی شده است و روابط تجربی بین آن‌ها با هم‌بستگی زیاد به‌دست آمده است. از این روابط می‌توان به‌منظور شناخت اولیهٔ خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک‌های مذکور استفاده کرد و به این صورت در هزینهٔ پژوهشی پروژه صرفه‌جویی کرد.

---

۱. Anon ۲. Sowers ۳. Bell ٤. Tamrakar ٥. D'Andrea
٦. Palchik ۷. Hatzor ۸. Kahraman ۹. Wyllie ۱۰. Yasar
۱۱. Erogan ۱۲. Yeken

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

زمین‌شناسی

نهشته‌های ناحیه به دوران‌های دوم و سوم تعلق دارند. واحدهای سنگی دوران دوم که شامل سنگ‌های آهکی و آهک‌های مارنی هستند ارتفاعات بلند منطقه را تشکیل می‌دهند. واحدهای سنگی دوران سوم که از لایه‌های آهکی، مارنی و تبخیری تشکیل شده قسمت اعظم پوشش خارجی ساختمان‌های زمین‌شناسی منطقه را به‌وجود آورده‌اند. رسوبات آبرفتی عهد حاضر هم نواحی هموار را تشکیل داده‌اند [۱].

ساختمان اصلی زمین‌شناسی شهر خرم‌آباد تاقدیسی است با طول ٦٥ و عرض متوسط ۷ کیلومتر که محور آن هم‌روند با زاگرس یعنی جنوب شرقی- شمال غربی است. تاقدیس مذکور متشکل از سازندهای ایلام-سروک، گورپی، امیران، تله‌زنگ، کشکان، آسماری، شهبازان، گروه فارس و سازند بختیاری است.

با وجود این تاقدیس که ارتفاعات بلند منطقه را تشکیل داده، خرم‌آباد در امتداد دره‌ای تاقدیسی توسعه پیدا کرده ا ست [۳]. گسل معکوس خرم‌آباد با امتداد جنوب‌شرق- شمال‌غرب که یال جنوب غربی تاقدیس خرم‌آباد را تحت تأثیر قرار می‌دهد از روستای پل بابا حسین شروع و با عبور از روستای ماسور به موازات جاده خرم‌آباد-کوهدشت در دامنهٔ جنوبی تاقدیس خرم‌آباد تا روستای درب چاه ادامه می‌یابد [٤]، [۲۷].

روش پژوهش

در این پژوهش پنج ایستگاه به نام‌های پل کرگانه (PK)، سراب کیو (SQ)، گرداب سنگی (GS)، گورستان خضر (GK) و سنگ سوراخ (SS) تعیین شد که مختصات آن‌ها بر اساس"UTM" و نیز "درجه، دقیقه، ثانیه" به‌همراه "فرازا از سطح دریا" در جدول ۱ آمده است. به‌منظور بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک‌ها ضمن بررسی‌های صحرایی نمونه‌برداری انجام شد و آزمون تعیین سختی واجهشی اشمیت در محل انجام شد. برای بررسی خصوصیات سنگ‌شناسی از سنگ آهک‌ها مقاطع نازک تهیه شد.

نام‌گذاری نمونه‌ها نیز به‌روش فولک[۱] (۱۹۷٤) انجام گرفت. سپس نمونه‌های پودرشده برای آنالیز XRF[۲] آمـاده شد. با تهیهٔ مغزه‌های استوانـه‌ای از بلوک‌های سنگی، آزمون‌های لازم

۱. Folk ۲. X-ray fluorescence

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آهکی مطابق بـا اسـتاندارد ASTM D٤٥٤٣، ۱۹۸٦ انجام شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های بررسی شده

ردیف	نام ایستگاه بررسی شده	(UTM)	(° ′ ″)	فرازا از سطح دریا(m)	موقعیت ایستگاه
۱	پل کرگانه (PK)	۳۹S۰۲۵۵٦۷۲ ۳۷۰۸٤۲٦	N ۳۳° ۲۹ ′ ۱۵/۱″ E۰٤۸° ۲۲ ′ ۱۳/۵″	۱۲۵۰	شرق خرم‌آباد
۲	سراب کیو (SQ)	۳۹S ۰۲۵٤۰۵۱ ۳۷۱۱۰۹۰	N ۳۳° ۳۰ ′ ٤۰/۰″ E۰٤۸° ۲۱ ′ ۰۷/۹″	۱۲۲٤	شمال‌غرب خرم‌آباد
۳	گرداب سنگی (GS)	۳۹S۰۲۵۳٦۹٤ ۳۷۰۸۹۰۲	N ۳۳° ۲۹ ′ ۲۹/۰″ E۰٤۸° ۲۰ ′ ۵۵/٦″	۱۲۵٤	غرب خرم‌آباد
٤	گورستان خضر (GK)	۳۹S ۰۲۵۲۹۹۱ ۳۷۰۷۱٤۳	N ۳۳° ۲۸ ′ ۳۱/۱″ E۰٤۸° ۲۰ ′ ۳۰/۸″	۱۲۰۳	جنوب‌غرب خرم-آباد
۵	سنگ سوراخ (SS)	۳۹S ۰۲۵٤٦۸۱ ۳۷۰۷۱٦٦	N ۳۳° ۲۸ ′ ۳۳/٤″ E۰٤۸° ۲۱ ′ ۳٦/۰″	۱۲٦۸	جنوب‌شرق خرم-آباد

پژوهش‌های صحرایی

بر اساس بررسی‌های صحرایی، واحدهای سنگی بررسی شده متوسط تا ضخیم‌لایه هستند. سیستم‌های شکستگی به‌طور عمده موازی و عمود بر لایه‌بندی هستند. از دیدگاه سنگ‌شناسی، لایه‌های آهکی و یا تناوب آهک و مارن هستند. علاوه بر گسل خرم‌آباد (با راستای شمال غربی- جنوب شرقی) گسل‌های محلی نیز در ناحیهٔ بررسی شده دیده می‌شوند که به‌طور عمده از راستای گسل خرم آباد تبعیت می‌کنند.

۱. تعیین سختی واجهشی اشمیت سنگ

سختی سنگ معیاری فیزیکی برای ارزیابی مقاومت سنگ محسوب می‌شود. با توجه به این‌که آزمایش سختی واجهشی‌سنگ آزمایشی غیرمخرب است به‌منظور شناخت مقاومت سنگ در پروژه‌های کوچک به‌کار گرفته می‌شود [۱۷]. در این پژوهش برای تعیین عدد واجهش اشمیت از چکش نوع L و روش استاندارد (ISRM ،۱۹۷۸) استفاده شد که نتایج آن در جدول۲ نشان داده شده است.

چنان‌که در جدول دیده می‌شود مقادیر به‌دست آمده برای هر پنج نوع سنگ آهک بسیار به‌هم نزدیک است، سختی واجهشی اشمیت به‌دست آمده برای سنگ آهک گورستان خضر(GK)، بیش‌ترین و برای سنگ آهک گرداب سنگی(GS)، کم‌ترین مقدار است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

جدول ۲. نتایج میانگین آزمون سختی واجهشی چکش اشمیت

ایستگاه	PK	GK	GS	SS	SQ
سختی واجهشی اشمیت	٤٥	٥١	٤٤	٤٨	٥٠

پژوهش‌های آزمایشگاهی

به‌منظور شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک‌های سازندهای ایلام-سروک علاوه بر بررسی‌های صحرایی، پژوهش‌های آزمایشگاهی شامل بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی، تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بدین‌شرح بر روی نمونه‌ها انجام شد:

۱. سنگ‌شناسی

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها به بافت و ترکیب سنگ‌شناسی وابسته است. این خصوصیات به شناخت محیط و شرایط تشکیل سنگ‌ها کمک زیادی می‌کند و اطلاعات اساسی و پایه برای انجام طراحی‌های مهندسی در اختیار قرار می‌دهد [۳۵]. به‌دلیل بافت و ساختار یک‌نواخت سنگ‌های آهکی، همواره ویژگی‌های فیزیکی و خصوصیات مهندسی این سنگ‌ها روابط دارند [۲].

۱-۱. بررسی‌های مقاطع نازک

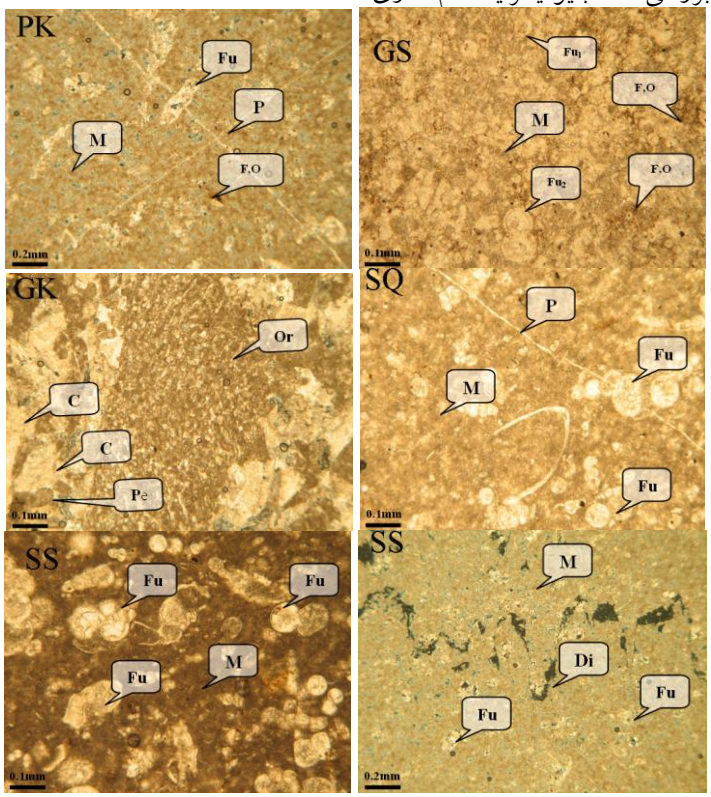
پس از تهیه و بررسی مقاطع نازک از۵ نوع سنگ آهک، ضمن تشخیص کانی‌ها و بافت سنگ، بررسی محیط تشکیل سنگ‌ها و وضعیت شکستگی‌ها انجام شد. نوع فسیل‌ها، میزان تخلخل و نوع آن مشخص شد. سپس نام‌گذاری سنگ به روش فولک [۲۳] انجام گرفت. روش میکروسکوپی برای برآورد حجم منافذ سنگ مناسب نیست؛ بنا بر این باید آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی سنگ انجام شود [۲۱].

با توجه به مقاطع نازک، فسیل‌های غالب مشاهده شده شامل گلوبیژرینا، اکینودرم، اوربیتولینا، گلوبوروتالیا، خرده‌های دوکفه‌ای، پلت و پلوئید است. خمیره آهکی تیرهٔ حاوی ماده آلی و احتمالاً کانی‌های رسی است (شکل ۱). محیط تشکیل اکثر سنگ‌های آهکی عمیق

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

و محیط نیز کم انرژی بوده است در نتیجه اغلب فسیل‌ها حفظ شده‌اند. نمونهٔ سنگ آهک سراب کیو (SQ) نسبت به گورستان خضر (GK) در محیط عمیق‌تری تشکیل‌شده است. انحلال فشاری در مقطع سنگ سوراخ (SS) دیده می‌شود که وجود استیلولیت مؤید آن است (شکل ۱). تخلخل موجود در این مقاطع از نوع حفره‌ای، شکستگی و بین دانه‌ای است و اکثراً با ژیپس، انیدریت و سیمان کلسیتی پرشده‌اند. میزان تخلخل در مقاطع کم‌تر از ۱ تا حدود ۳ درصد است. در برخی مقاطع اکسید آهن و مواد آلی مشهود است. بر اساس رده‌بندی فولک، نمونه‌های بررسی شده بایومیکرایت نام‌گذاری شدند.



شکل ۱. تصاویر مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های سنگ آهک‌ها P) تخلخل، M) میکرایت، Fu_1,Fu) فسیل‌های پلانکتونیک، F,O) مادهٔ آلی یا اکسید آهن، Pe) پلت و پلوئید، C) سیمان، Or) اوربیتولینا، Bi) خرده‌های بایوکلاستی، Fu_2) فسیل گلوبیژرینا، Di) انحلال فشاری(پدیده استیلولیت)

۲-۱. آزمایش فلورسانس اشعهٔ ایکس(XRF)

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

در این آزمایش میزان خلوص تودهٔ سنگ براساس تجزیهٔ شیمیایی مشخص شده و درصد اکسیدهای MgO,Al_2O_3, $CaO\ SiO_2$, و ... سنگ معین می‌گردد. نتایج آنالیز XRF در جدول ۳ آورده شده است.

جدول۳. نتایج آنالیزXRF

Lithology	سنگ آهک				
FIELD NO.	PK	GK	GS	SS	SQ
Formula	%	%	%	%	%
$SiO_۲$	٦/٤١	۲/۷۲	۰/۷۱	۲/۰٦	۲/۷۳
$Al_۲O_۳$	۲/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/٦۹	۱/۰٦
$Fe_۲O_۳$	۰/۹٥	۰/۱٤	۰/۱۳	۰/۳٥	۰/٤۷
CaO	٤۹/۹۷	٥٤/۰۱	٥٥/۱۸	٥۳/٦۸	٥۲/۹٥
MgO	۰/۳٦	۰/٤۱	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۱۹
$K_۲O$	۰/۳٤	۰/۱<	۰/۱<	۰/۱۱	۰/۱۹
$P_۲O_۳$	۰/۱<	۰/۱<	۰/۱<	۰/۱<	۰/۱<
$SO_۳$	۰/۱<	۰/۱<	۰/۱۰	۰/۱٤	۰/۱٤
SrO	۰/۱۹	۰/۱<	۰/۱<	۰/۱۳	۰/۱۱
$TiO_۲$	۰/۱۲	-	-	-	۰/۱<
L.O.I.	۳۹/۰٦	٤۲/۱٤	٤۳/۱۸	٤۲/۳٦	٤۱/۹۰

مقدار اکسیدهای $SiO_۲$ و $Al_۲O_۳$ نشان‌دهندهٔ خمیره دانه‌ریز (میکرایت) است. درصد CaO در چهار ایستگاه بیش از ٥۰ درصد است و درصد MgO کم‌تر از ۰/٥ درصد است سنگ آهک گورستان خضر (GK) و پل کرگانه (PK) به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر CaO وMgO را دارند.

از آن‌جا که زیاد بودن درصد CaO در سنگ نشانهٔ خلوص بیش‌تر و معیاری برای ارزیابی انحلال سنگ کربناته است، سنگ آهک گرداب سنگی(GS) خلوص بیش‌تری دارد.

۲. خصوصیات فیزیکی

با انتخاب بلوک‌های سنگی سالم به ابعاد ۲٥×۲٥×۳۰ از نقاط مورد نظر و پس از تهیهٔ مغزه‌های سنگ، دانسیته (خشک، مرطوب و اشباع)، درصد رطوبت، وزن مخصوص بخش

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

جامد، تخلخل، نسبت تخلخل و شاخص پوکی (درصد جذب آب) برای هر نوع سنگ آهک مطابق با استاندارد (ISRM, ۱۹۸۱) تعیین شد (جدول ٤). چنان‌که در جدول ٤ دیده می‌شود کم‌ترین مقدار تخلخل، درصد رطوبت و شاخص جذب آب برای سنگ آهک گورستان خضر (GK) و بیش‌ترین مقادیر برای سنگ آهک گرداب سنگی (GS) به‌دست آمده است.

بر اساس طبقه‌بندی آنون [۹] سنگ آهک گورستان خضر (GK) در ردهٔ تخلخل خیلی کم و بقیهٔ سنگ آهک‌ها در ردهٔ تخلخل کم قرار می‌گیرند. بیش‌ترین و کم‌ترین دانسیتهٔ خشک نیز به‌ترتیب متعلق به سنگ‌آهک گورستان خضر (GK) و گرداب سنگی (GS) است. بر طبق طبقه‌بندی مذکور دانسیتهٔ خشک سنگ آهک گورستان خضر (GK)، سنگ سوراخ (SS) و سراب کیو (SQ) در ردهٔ بالا و سنگ آهک پل کرگانه (PK) و گرداب سنگی (GS) در ردهٔ متوسط هستند. مقدار شاخص جذب آب تمامی نمونه‌ها کم‌تر از ۲ درصد است.

۳. هدایت هیدرولیکی

به‌منظور ارزیابی هدایت هیدرولیکی روی پنج نمونه سنگ آهک، آزمون نفوذپذیری به‌روش بار هیدرولیکی متغیر انجام شد [۵]، میانگین پنج سیکل به‌عنوان ضریب نفوذپذیری هر نمونه در جدول ۵ نشان داده شده است. سنگ آهک گورستان خضر (GK) با $۱/۹۱\times۱۰^{-۹}$ m/s، کم‌ترین هدایت هیدرولیکی و سنگ آهک پل کرگانه (PK) با مقدار $۲/۵۰\times۱۰^{-۹}$ m/s بیش‌ترین هدایت هیدرولیکی را در بین نمونه‌ها داشتند. سنگ آهک‌های بکر بررسی شده بنا به تقسیم‌بندی وتوکوری و کاتسویاما در ردهٔ سنگ‌های نفوذناپذیر قرار می‌گیرند [۸].

٤. خصوصیات مکانیکی

٤-۱. شاخص دوام‌پذیری

شاخص‌دوام‌پذیری که قابلیت سنگ‌ها را نسبت به هوازدگی نشان می‌دهد، درصد باقی‌مانده نمونه پس از دو مرحلهٔ خشک و ترشدن است. هرچه مقدار این شاخص بیش‌تر باشد میزان فرسایش، انحلال و خردشدن سنگ در برابر هوازدگی کم‌تر است. نتایج آزمایش دوام‌پذیری که بر اساس استاندارد ۱۹۸۸، ASTM D٤٦٤٤ انجام شده، در جدول ٦ آورده شده

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

است. در این پژوهش به‌علت این‌که سنگ‌های آهکی بررسی شده بسیار پایدار بودند و تغییر وزن بسیار جزئی پس از هر سیکل نشان دادند آزمایش دوام‌پذیری به‌جای دو سیکل، در پانزده سیکل انجام گرفت.

جدول٤. ویژگی‌های فیزیکی

ایستگاه	تخلخل (٪)	نسبت تخلخل	درصد جذب آب (٪)	درصد رطوبت (٪)	دانسیته (gr/cm^3)			G_S
					خشک	مرطوب	اشباع	
PK1	۳	۰/۰۳۱	۱/٤٤	۰/٤۷	۲/٥٦	۲/٥٦۳	۲/٥۹٦	۲/٦۳
PK2	٤	۰/۰٤۱	۱/٥۸	۰/٥۳	۲/٥٥	۲/٥٥٦	۲/٥۹٥	۲/٦۳
PK3	٤/٥	۰/۰٤٦	۱/۷٦	۰/٦٥	۲/٥٤	۲/٥٥٤	۲/٥۸۷	۲/٦۳
GK۱	۰/٦۷	۰/۰۰۷	۰/۲٥	۰/۰٦۹	۲/٦٦	۲/٦٦	۲/٦۷	۲/٦۸
GK۲	۰/۷۰	۰/۰۰۷	۰/۲۷	۰/۰۷۲	۲/٦٥	۲/٦٥	۲/٦٦	۲/٦۷
GK۳	۰/۷۹	۰/۰۰۸	۰/۳۰	۰/۰۸	۲/٦٤	۲/٦٤	۲/٦٥	۲/٦۷
GS۱	۳/٦۹	۰/۰۳۸	۱/۳۸	۰/٤۹	۲/٥٥	۲/٥٦	۲/٥۹	۲/٦٤
GS۲	٤/۸۳	۰/۰٥۰	۱/٥۹	۰/٦۱	۲/٥٤	۲/٥٥	۲/٥۸	۲/٦۳
GS۳	٥/۳۹	۰/۰٥٦	۲/۰۳	۰/۷۸	۲/٥۲	۲/٥۳	۲/٥۷	۲/٦۱
SS۱	۲/۹۰	۰/۰۳۰	۱/۱۰	۰/۳٤	۲/٥۹	۲/٦۰	۲/٦۲	۲/٦٤
SS۲	۳/۰۹	۰/۰۳۲	۱/۳۲	۰/٤۹	۲/٥٦	۲/٥۸	۲/٦۰	۲/٦٤
SS۳	٤/۳۸	۰/۰٤٦	۱/۷۲	۰/٦۲	۲/٥٥	۲/٥٦	۲/٥۸	۲/٦۳
SQ۱	۱/۹۳	۰/۰۲۰	۰/۷٦	۰/۲۷	۲/٦۰	۲/٦۲	۲/٦۳	۲/٦۷
SQ۲	۲/۷۱	۰/۰۲۸	۱/۰٦	۰/۳۷	۲/٥۸	۲/٥۹	۲/٦۰	۲/٦٤
SQ۳	۳/۰۲	۰/۰۳۱	۱/۲۰	۰/٤۹	۲/٥٦	۲/٥۷	۲/٥۹	۲/٦٤

جدول٥. میانگین هدایت هیدرولیکی برای سنگ آهک‌ها

ایستگاه	PK	GK	GS	SS	SQ
میانگین هدایت هیدرولیکی (m / sec)	$۲/٥۰\times۱۰^{-۹}$	$۱/۹۱\times۱۰^{-۹}$	$۲/٤۷\times۱۰^{-۹}$	$۲/٤۰\times۱۰^{-۹}$	$۲/۰۹\times۱۰^{-۹}$

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

جدول٦. نتایج حاصل از آزمایش دوام پذیری

ایستگاه	سیکل‌های دوام							
	Id_1	Id_3	Id_5	Id_7	Id_9	Id_{11}	Id_{13}	Id_{15}
PK	۹۹/۸۸	۹۹/۷۹	۹۹/٦۰	۹۹/۲۷	۹۹/۰٤	۹۸/۸۱	۹۸/٦۹	۹۸/٦۳
GK	۹۹/۹۵	۹۹/۸۵	۹۹/۷٦	۹۹/٦۹	۹۹/٦۳	۹۹/٦۰	۹۹/۵۲	۹۹/٤۷
GS	۹۹/۸۵	۹۹/۰٦	۹۸/۸۹	۹۸/۸٤	۹۸/۷٦	۹۸/٦۲	۹۸/۵۲	۹۸/٤۱
SS	۹۹/۸۹	۹۹/۷٤	۹۹/۵۷	۹۹/٤۸	۹۹/۳۷	۹۹/۱۸	۹۹/۱۱	۹۹/۰٤
SQ	۹۹/۹۱	۹۹/۷۸	۹۹/٦۵	۹۹/۵٦	۹۹/٤۳	۹۹/۳۱	۹۹/۲۱	۹۹/۰۷

بر اساس طبقه‌بندی گمبل [۲۵] و نیز رده‌بندی فرانکلین و چاندرا [۲٤] تمام سنگ آهک‌های بررسی شده در ردهٔ خیلی مقاوم قرار دارند و احتمال وارفتن و کاهش شدید مقاومت آن‌ها در مقابل آب بسیار کم است.

٤-۲. آزمایش لوس‌آنجلس

در این پژوهش مقدار افت وزنی سنگ بر اثر سایش در دستگاه لوس‌آنجلس پس از ۱۰۰۰ دوران بر اساس استاندارد (ASTM C۱۳۱ ،۱۹۹٦) به‌دست آمده است. نتایج حاصل از آزمایش مذکور در جدول ۷ آورده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود سنگ آهک گورستان خضر (GK) با مقدار ۲۱/٦٦ درصد کم‌ترین افت وزنی و سنگ آهک گرداب سنگی (GS) با مقدار ۲۷/۰۳ درصد، بیش‌ترین افت وزنی را نشان می‌دهد.

جدول۷. نتایج درصد افت وزنی آزمایش لوس‌آنجلس

ایستگاه	وزن اولیه (kg)	عبوری از الک ۷۵ و مانده روی الک٦۳ (kg)	عبوری از الک ٦۳ و مانده روی الک۵۳ (kg)	عبوری از الک ۵۳ و مانده روی الک ۳۸ (kg)	درصد افت وزنی (٪)
PK	۱۰/۰۵۵	۲/۵۲۹	۲/۵۲٦	۵/۰۰۰	۲۵/٤۷
GK	۱۰/۰۱۳	۲/۵۱٤	۲/۵٤۸	٤/۹۵۱	۲۱/٦٦
GS	۱۰/۰۰۳	۲/٤۸۱	۲/۵۱۸	۵/۰۰۳	۲۷/۰۳
SS	۱۰/۰٦۹	۲/۵۲۹	۲/۵۰٤	۵/۰۳٦	۲۳/۳٤
SQ	۱۰/۱۰۵	۲/۵۸۲	۲/۵۱۷	۵/۰۰٦	۲۲/٤۰

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

٤-۳. آزمایش ارزش ضربه

آزمایش ارزش ضربه به‌منظور سنجش مقاومت سنگ در برابر ضربات وارده در حین فرآوری مصالح و در طی دورهٔ ساخت سازه و هم‌چنین در برابر عوامل مخرب در مدت بهره‌برداری انجام می‌شود. مصالح با کیفیت زیاد، میزان ذرات ریز کم‌تری را در اثر ضربات وارده تولید می‌کنند. نتایج حاصل از این آزمایش که براساس استاندارد BSI انجام گرفته در جدول ۸ نشان داده شده است [۱۹].

جدول۸. نتایج آزمایش ارزش ضربه

ایستگاه	وزن اولیه (gr)	وزن مانده روی الک۸ (gr)	وزن عبوری از الک ۸ (gr)	شاخص ارزش ضربه (٪)	شرایط نمونه
PK	٤۹۹/۷	٤۰۳/۹	۹٥/۸	۱۹/۱۷	قابل قبول
GK	٤٥۷/۲	٤۱٥/۱	٤۲/۱	۹/۲۱	قابل قبول
GS	٤۹٥/۲	۳۹۰/۱	۱۰٥/۱	۲۱/۲۲	قابل قبول
SS	٤۹۹/۳	٤۱٤/۷	۸٤/٦	۱٦/۹٤	قابل قبول
SQ	٤٥۲/۲	۳۹٤/٥	٥۷/۷	۱۲/۷٦	قابل قبول

معمولاً نتایج ارزش ضربه به‌میزان ۳۰ درصد و بیش‌تر از آن غیرقابل قبول است [۱۹]. براساس نتایج حاصل از آزمایش تعیین ارزش ضربه حداکثر و حداقل مقاومت در برابر ضربه به‌ترتیب مربوط به سنگ آهک گورستان خضر (GK) و گرداب سنگی (GS) است.

٤-٤. مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS)

آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D۲۹۳۸ بر روی مغزه‌های با قطر ٥٤ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر ۲ تا ۲/٥ انجام گرفت [۱٥]. نرخ بارگذاری بین ۱-۰/٥ مگاپاسکال بر ثانیه بود. مطابق با رده‌بندی ISRM تمامی سنگ آهک‌های آزمایش شده در ردهٔ سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک‌محوری متوسط و زیاد و طبق رده‌بندی دیر و میلر در ردهٔ سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک‌محوری متوسط قرار می‌گیرند. سنگ آهک گورستان خضر (GK) نسبت به سایر نمونه ها در حالت خشک بیش‌ترین مقاومت تراکمی تک‌محوری را دارد (جدول ۹).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

٤-٥. آزمایش مقاومت کشش برزیلی (BTS)

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D۳۹٦۷ بر روی مغزه‌ها با قطر ٥٤ میلی‌متر و نسبت ضخامت به قطر ۰/٥ انجام گرفت [۱۲]. نرخ استرس هم به ۲۰۰ نیوتن بر ثانیه محدود شد. در این آزمایش‌ها اگر نمونه‌ای سطح ضعف داشته کنار گذاشته شد. لازم به یادآوری است که نتایج معتبر زمانی مورد قبول است که شکست نمونه با گسترش یک ترک قائم کششی از بخش‌های داخلی آن آغاز گردد [۳۲]. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع به‌ترتیب متعلق به گورستان خضر (GK) و گرداب سنگی (GS) است (جدول ۹).

جدول ۹. میانگین نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مقاومت تراکمی تک‌محوری، کشش برزیلی و شاخص مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

Code	dry			moist			sat		
	$I_{S(50)}$	UCS	BTS	$I_{S(50)}$	UCS	BTS	$I_{S(50)}$	UCS	BTS
PK۱	٤/۳٤	٤۸/۱۷	۱۲/۰۹	٤/۰۱	٤۱/۰۸	۷/۰۲	۳/۸۷	۳۲/٤۸	٦/۸۰
PK۲	٥/۰٤	٥٦/٤٤	۱۰/۹٥	٤/٤۲	٤۲/٤۷	۹/۹٤	۳/۹٦	۳۲/۷۰	٥/۹۰
PK۳	٥/٥۷	٥۸/۸۹	۷/۹۲	٤/۹۷	٤٥/٤۳	٦/٥٥	٤/۸۹	۳٦/۰۲	٤/۲٤
GK۱	٦/۳۱	٦٤/۳۸	۱۲/٦٦	٥/٥۸	٤٥/٦۷	۱۳/٤٦	٥/۳۰	۳٦/٦٦	۱۰/۳۷
GK۲	٦/۷۷	۷۱/٤۲	۱٥/۲۱	٦/۰۸	٥۱/۷۹	۱۱/۸۲	٥/۹٥	۳۹/۳۸	۱۰/۸۱
GK۳	٦/۳۹	٦٥/۸٦	۱٤/٦۷	٥/۹٦	٤۸/۲۱	۱۳/٥۲	٥/٦۳	۳۸/٤۳	۹/۸۹
GS۱	٤/۸٦	٥۲/٦٥	۸/۹٦	۳/۲۹	۳۷/۲۸	۸/۰۹	۲/۲۸	۲۷/۹۷	٤/٤٤
GS۲	٥/۰٤	٥۸/۱٥	۹/٥۷	٤/۲۷	٤۲/٦٤	۷/۸۷	۳/۸۰	۳۱/٥٥	٦/۳۹
GS۳	٥/٦۳	٥۹/۷۷	۹/۲۳	٤/۷۹	٤۳/٤٥	۸/۷۳	٤/٥۳	۳۳/۰۲	٤/۲۹
SS۱	٤/٤۲	٥۱/٤۹	۱۳/۰۹	٤/۰۳	٤۱/۸٦	۱۰/٤٦	۳/٥۲	۳۱/۳۳	٦/۹۳
SS۲	٥/۰۳	٥٦/۸۱	۹/۸٥	٤/٥٦	٤۳/۹٤	۷/٦۷	٤/۰۰	۳۳/۱۱	٥/۱۰
SS۳	٦/۰۹	٦۳/۸۸	۱۰/۲۰	٥/۳۷	٤٦/٦۰	۹/٤۳	٤/٥۷	۳۳/۳٦	۸/٤۷
SQ۱	٤/۹۸	٥۹/۸۳	۱۲/۲۲	٤/٥۷	٤۰/۲۷	۱۱/٤۳	۳/۸٥	۳٤/٦۳	۷/۹٦
SQ۲	٥/٤۳	٦٤/۲٤	۱۲/٦٥	٤/۷٤	٤۳/۷٤	۱۱/٦۱	٤/٥۳	۳٦/۲۰	۱۰/۳۷
SQ۳	٦/۸۷	٦۷/۱٥	۱۳/٦٦	٥/٥٦	٤۷/۸٦	۱۳/۲٤	٤/٦٥	۳٦/۳۸	۹/۲۲

٤-٦. آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D٥۷۳۱ بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۱ به ۳ تا ۱ به ۱ (به روش محوری) انجام گرفت [۱٦]. شاخص بار نقطه‌ای

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

محاسبه‌شده برای قطر ۵۰ میلی‌متر تصحیح و به‌صورت $I_{S(50)}$ در جدول ۹ نمایش داده شده است. سنگ آهک‌ها بر اساس رده‌بندی دیر و بنیاوسکی [۵]، در ردهٔ مقاومت زیاد و براساس رده‌بندی براش و فرانکلین [۲۰] در ردهٔ مقاومت خیلی زیاد قرار می‌گیرند.

٤-۷. مدول‌های تغییرشکل‌پذیری استاتیکی

نسبت پواسون سنگ‌های آهکی ایلام-سروک بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۲ (به‌طور متوسط ۰/۳۰) است. برای محاسبه مدول یانگ معمولاً شیب خط مماس بر منحنی در تنشی معادل ۵۰ درصد مقاومت نهایی اندازه‌گیری می‌شود که به آن مدول مماسی[۱] می‌گویند و با E_t نمایش داده می‌شود. کمّیت دیگری به‌نام نسبت مدولی اندازه‌گیری شده که عبارت از نسبت مدول مماسی به حداکثرمقاومت تراکمی تک‌محوری است [۳٤]. رده‌بندی سنگ بکر پنج نوع سنگ آهک به‌دست آمده در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

نسبت مدولی سنگ آهک‌ها متوسط (M) و پایین(L) است. طبق رده‌بندی دیر و میلر هم تمامی سنگ آهک‌ها در رده سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک‌محوری متوسط (C) قرار دارند. در ضمن با توجه به تغییر رطوبت طبیعی نمونه در مراحل مختلف مغزه‌گیری و آماده‌سازی، برای رده‌بندی از حالت خشک نمونه استفاده شده است.

٤-۸. سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی

آزمایش عبور سرعت موج مطابق با استاندارد ASTM D۲۸٤۵ بر روی ۱۵ مغزه آماده‌شده در سه حالت خشک، مرطوب و اشباع انجام شد [۱۱]. نتایج حاصل از انجام آزمایش مذکور در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول۱۰. رده‌بندی سنگ بکر برای سنگ آهک‌های ایلام-سروک

ایستگاه	PK	GK	GS	SS	SQ
رده‌بندی سنگ بکر	CL	CM	CL	CM	CM

۱. Tangent modulus

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

جدول۱۱. مقادیر مدول یانگ، نسبت پواسون و سرعت عبور موج فشاری در حالت خشک، مرطوب و اشباع

ایستگاه	حالت	E (GPa)	υ	Vp (km/s)	Vs (km/s)
PK	خشک	٤۳/٥۳	۰/۲۸۹	٤/۷۳	۲/٥۷
	مرطوب	٤۷/۷۱	۰/۲۹۷	٤/۹۹	۲/٦۸
	اشباع	٤۸/٦۷	۰/۲۹۸	٥/۰۲	۲/٦۹
GK	خشک	٥۹/۳٤	۰/۳۱۳	٥/٦۰	۲/۹۲
	مرطوب	٥۹/۹٦	۰/۳۱٤	٥/٦۳	۲/۹۳
	اشباع	٦۸/۷٦	۰/۳۲۳	٦/۱۲	۳/۱۳
GS	خشک	٤۲/٦٥	۰/۲۸۷	٤/٦۸	۲/٥٥
	مرطوب	٤۷/۰۰	۰/۲۹۷	٤/۹۷	۲/٦۷
	اشباع	٤۸/۱٤	۰/۲۹۸	٤/۹۹	۲/٦۸
SS	خشک	٤۷/۸۱	۰/۲۹۷	٤/۹۹	۲/٦۸
	مرطوب	٥۳/٥٦	۰/۳۰۷	٥/۳٤	۲/۸۲
	اشباع	٥۸/۲۰	۰/۳۱۲	٥/٥۹	۲/۹۲
SQ	خشک	٤۸/٤۲	۰/۲۹۸	٥/۰۱	۲/٦۹
	مرطوب	٥۲/۱۳	۰/۳۰٤	٥/۲۳	۲/۷۸
	اشباع	٥۸/٦۳	۰/۳۱۳	٥/٦۱	۲/۹۳

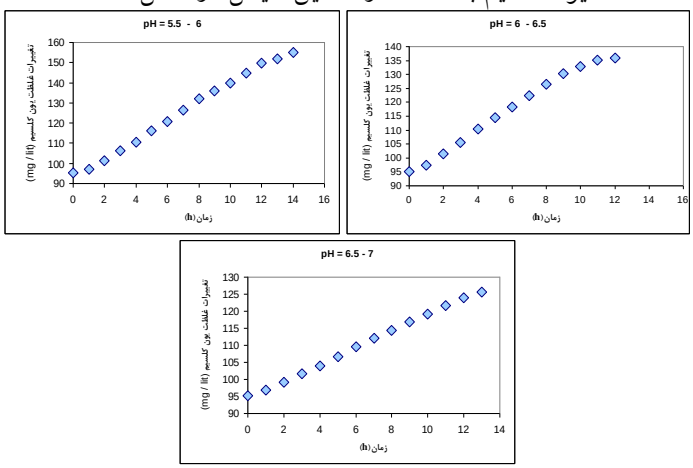
۵. انحلال‌پذیری

پدیدهٔ انحلال دو پارامتر اصلی قابلیت انحلال‌پذیری و ثابت سرعت انحلال دارد. محاسبهٔ ثابت سرعت انحلال‌پذیریسنگ‌های کربناته در این پژوهش به‌روش وزنی (جیمز و لاپتون) [٦] با استفاده از دستگاه سیرکولاسیون انحلال در ۳ سیکل (در اسیدیته‌های ٥/٥ تا ٦، ٦ تا ٦/٥ و ٦/٥ تا ۷) با مقادیر ثابتی از دی‌اکسیدکربن محلول در آب اندازه‌گیری شده است. در سیکل ٥/٥ تا ٦ آب مخزن بعد از گذشت ۱٥ ساعت اشباع شده و غلظت یون کلسیم در حالت اشباع به ۱٥٥/۱ mg/lit رسید. در سیکل ٦ تا ٦/٥ آب مخزن بعد از گذشت ۱۳ ساعت اشباع شده و غلظت یون کلسیم در حالت اشباع به ۱۳٦ mg/lit رسید و در سیکل ٦/٥ تا ۷ آب مخزن بعد

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

از گذشت ١٤ ساعت اشباع شده و غلظت یون کلسیم در حالت اشباع به ١٢٥/٦ mg/lit رسیده است. تغییرات غلظت یون کلسیم با گذشت زمان این سیکل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار تغییر غلظت یون کلسیم با گذشت زمان در سه سیکل با pHهای متفاوت

میانگین ثابت سرعت انحلال برای سنگ آهک پل کرگانه (PK) در اسیدیتهٔ ٥/٥ تا ٦ برابر $1/20 \times 10^{-6}$ m/s، در اسیدیتهٔ ٦ تا ٦/٥ برابر $1/35 \times 10^{-6}$ m/s و هم‌چنین در اسیدیتهٔ ٦/٥ تا ۷ برابر $1/62 \times 10^{-6}$ m/s به‌دست آمد که نشان می‌دهد با افزایش اسیدیته ثابت سرعت انحلال سنگ آهک افزایش و غلظت اشباع یون کلسیم کاهش می‌یابد.

بحث

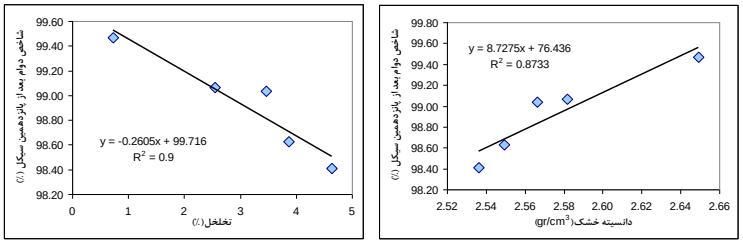
هدف از این پژوهش دست‌یابی به اطلاعات کلی از خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های آهکی ایلام-سروک به‌منظور تسریع درانجام بررسی‌های مقدماتی زمین‌شناسی مهندسی پروژه‌ها در منطقه بوده‌است. برای بررسی ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی از نرم‌افزار () استفاده و ضریب هم‌بستگی پیرسون تعیین شد. ضریب هم‌بستگی همراه با مقدار دقیق p-value (سطح معناداری) مربوط به آن، که وجود رابطهٔ بین دو متغیر را بررسی می‌کند به‌عنوان خروجی نرم‌افزار مطرح است. مقدار p-value در دو سطح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. اگر p-value به‌دست‌آمده از رابطهٔ بین دو متغیر بسیار کوچک‌تر از سطح

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

معناداری ۰/۰۵ یا ۰/۰۱ باشد دراین صورت رابطهٔ موردنظر به‌ترتیب با سطح اطمینان ۹۵٪ یا ۹۹٪ قابل قبول است؛ یعنی تفاوت معناداری بین دو متغیر وجود ندارد. زمانی‌که بین دو متغیر هم‌بستگی وجود داشته باشد، می‌توان یک متغیر را برحسب متغیر دیگر تعیین کرد.

در بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و فیزیکی می‌توان گفت با وجود سیمان‌کلسیتی، میزان تخلخل در سنگ‌آهک کاهش پیدا می‌کند، با ورود مواد ثانویه به درون شکستگی‌های ریز، کاهش چشم‌گیری در تخلخل سنگ رخ می‌دهد. شناخت خصوصیات سنگ‌شناسی موجب آگاهی از میزان مقاومت سنگ می‌گردد. توجه به بافت سنگ این موضوع را مشخص می‌سازد. سنگ‌های بررسی شده دانه‌های درشت کلسیت دارند. افزایش درشتی ذرات موجب شده مقاومت تا حد متوسط برسد (جدول ۱۰). در این پژوهش با شناخت خصوصیات فیزیکی و ایجاد ارتباط این ویژگی‌ها با شاخص دوام (سیکل۱۵) روابطی مناسب با هم‌بستگی زیاد به‌دست آمد (شکل۳ و جدول‌های ۱۲ و ۱۳).

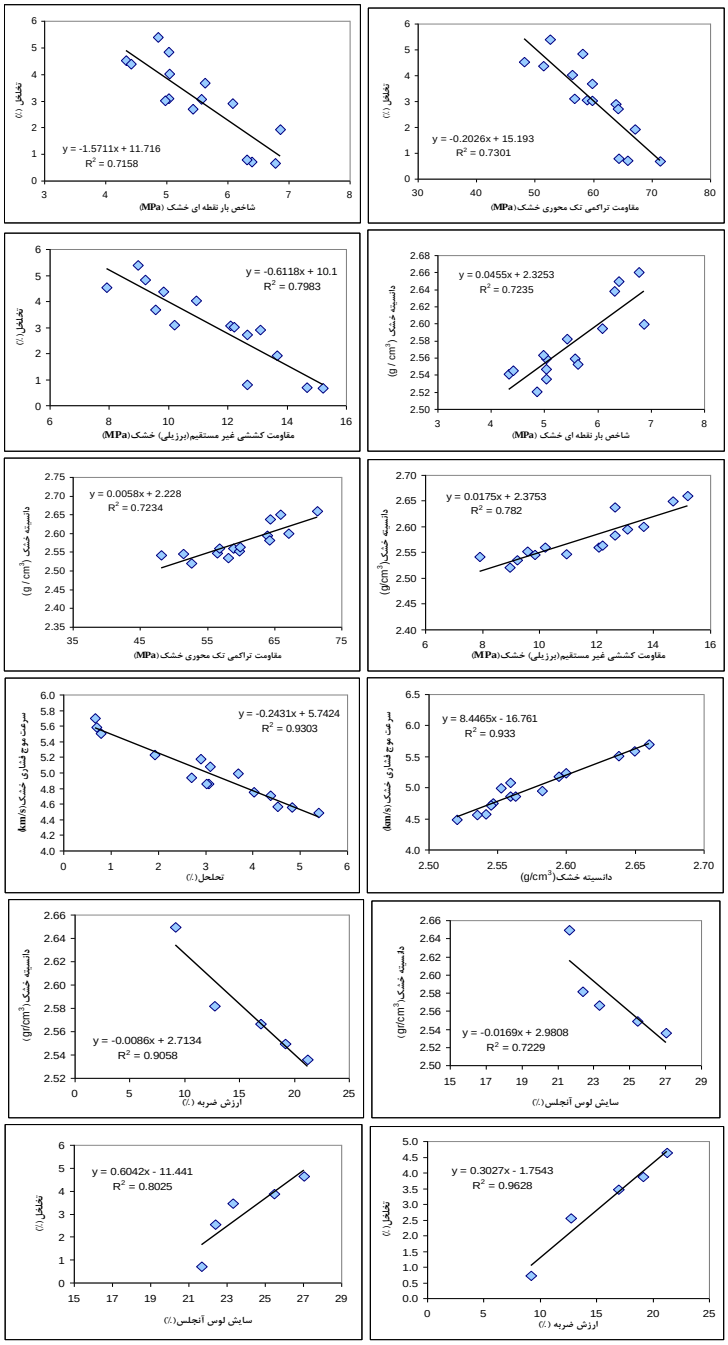


شکل ۳. ارتباط ویژگی‌های فیزیکی با شاخص دوام‌پذیری سنگ آهک‌های ایلام- سروک

در ارتباط بین خصوصیات فیزیکی با مکانیکی سنگ آهک‌ها، افزایش تخلخل، موجب کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت کششی و سرعت عبور موج فشاری می‌گردد. بین دانسیته و مقاومت‌های مذکور رابطه‌ای مستقیم وجود دارد. رابطه ارزش ضربه و درصد سایش لوس‌آنجلس با تخلخل و دانسیته به‌ترتیب مستقیم و معکوسند (شکل٤ و جدول‌های ۱۲و ۱۳).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

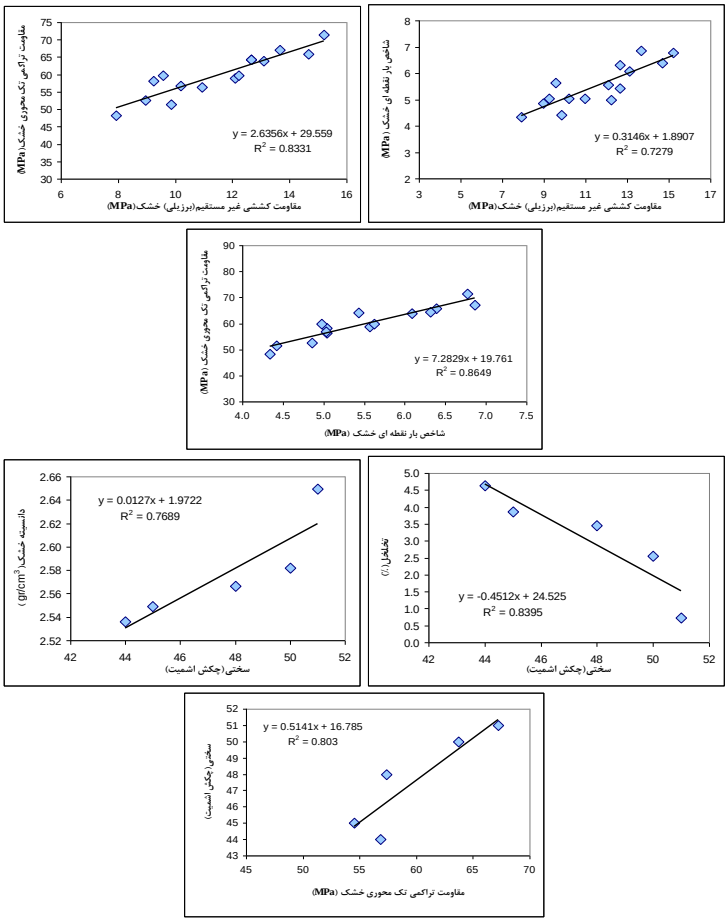


شکل ٤. ارتباط ویژگی‌های فیزیکی با ویژگی‌های مکانیکی در سنگ های ایلام- سروک

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

ارتباط خصوصیات مکانیکی با هم‌دیگر و رابطهٔ آزمون غیرمخرب سختی اشمیت با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در شکل ۵ نمایش داده شده است. هم‌بستگی بین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت تراکمی تک‌محوری بیش‌تر از هم‌بستگی بین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی (برزیلی) به‌دست‌آمده است [۷].



شکل ۵. ارتباط خصوصیات مکانیکی با هم‌دیگر و ارتباط سختی اشمیت با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

ارتباط سرعت عبور موج فشاری با مقاومت‌های فشاری، کششی و شاخص بار نقطه‌ای نشان‌دهندهٔ ضریب هم‌بستگی مناسب بین این ویژگی‌هاست. با افزایش مقاومت‌های مذکور، سرعت عبور موج فشاری سنگ آهک افزایش می‌یابد (شکل٦ و جدول‌های ۱۲ و ۱۳).

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

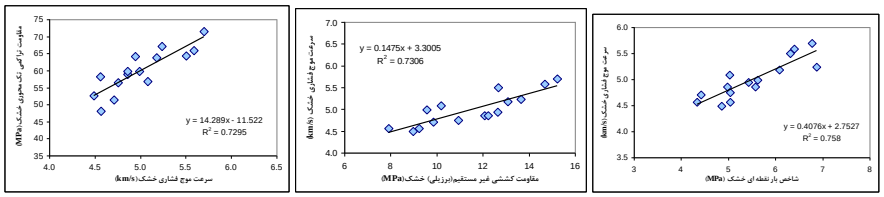
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

جدول ۱۲. نتایج آزمون هم‌بستگی خصوصیات مکانیکی (*: محاسبه هم‌بستگی در سطح ۰/۰۵ **: محاسبه هم‌بستگی در سطح ۰/۰۱)

متغیر۱	متغیر۲	سطح معناداری Sig. (2-tailed)	ضریب همبستگی پیرسون	شرط	نتیجه
سرعت موج فشاری خشک	بار نقطه‌ای خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۷۱**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	برزیلی خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۵۵**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
مقاومت تک‌محوری خشک	بار نقطه‌ای خشک	۰/۰۰۰	۰/۹۳۰**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	برزیلی خشک	۰/۰۰۰	۰/۹۱۳**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	سرعت موج خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۵٤**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
بار نقطه‌ای خشک	برزیلی خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۵۳**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
سختی واجهشی اشمیت	تک‌محوری خشک	۰/۰٤۰	۰/۸۹٦*	۰/۰۵>۰/۰٤۰	قابل قبول
تخلخل	تک محوری خشک	۰/۰۰۰	-۰/۸۵٤**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	بارنقطه‌ای خشک	۰/۰۰۰	-۰/۸٤٦**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	برزیلی خشک	۰/۰۰۰	-۰/۸۹۳**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	سرعت موج خشک	۰/۰۰۰	-۰/۹٦٤**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
دانسیته خشک	تک محوری خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۵۲**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	بارنقطه‌ای خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۵۲**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	برزیلی خشک	۰/۰۰۰	۰/۸۸٦**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
	سرعت موج خشک	۰/۰۰۰	۰/۹٦۵**	۰/۰۱>۰/۰۰۰	قابل قبول
شاخص دوام بعد از سیکل۱۵	دانسیته خشک	۰/۰۲۰	۰/۹۳۵*	۰/۰۵ >۰/۰۲۰	قابل قبول
	تخلخل	۰/۰۱٤	-۰/۹٤۹*	۰/۰۵ >۰/۰۱٤	قابل قبول
ارزش ضربه	دانسیته خشک	۰/۰۱۲	-۰/۹۵۳**	۰/۰۵>۰/۰۱۲	قابل قبول
	تخلخل	۰/۰۰۳	۰/۹۸۱**	۰/۰۱>۰/۰۰۳	قابل قبول
سایش لوس آنجلس	دانسیته خشک	۰/۰٦۷	-۰/۸۵۱	۰/۰۵<۰/۰٦۷	غیر قابل قبول
	تخلخل	۰/۰٤۰	۰/۸۹٦*	۰/۰۵>۰/۰٤۰	قابل قبول

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]



شکل ٦. ارتباط سرعت عبور موج فشاری با مقاومت‌های فشاری، کششی و شاخص بار نقطه‌ای

جدول ۱۳. فرمول‌های تجربی به‌دست آمده برای تخمین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک ایلام- سروک

کاربرد	ضریب هم‌بستگی(R^2)	رابطهٔ تجربی به‌دست آمده
تخمین تخلخل با استفاده از مقاومت تک‌محوری خشک	$R^2 = 0.7301$	$n = -0.2026UCS_{dry} + 15.193$
تخمین تخلخل با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای خشک	$R^2 = 0.7158$	$n = -1.5711I_{S(50)dry} + 11.716$
تخمین تخلخل با استفاده از مقاومت برزیلی خشک	$R^2 = 0.7983$	$n = -0.6118BTS_{dry} + 10.1$
تخمین سرعت عبور موج فشاری خشک با استفاده از تخلخل	$R^2 = 0.9303$	$Vp_{dry} = -0.2431n + 5.7424$
تخمین سرعت عبور موج فشاری خشک با استفاده از دانسیته خشک	$R^2 = 0.933$	$Vp_{dry} = 8.4465\gamma_{dry} - 16.761$
تخمین دانسیتهٔ خشک با استفاده از مقاومت تک‌محوری خشک	$R^2 = 0.7234$	$\gamma_{dry} = 0.0058UCS_{dry} + 2.228$
تخمین دانسیتهٔ خشک با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای خشک	$R^2 = 0.7235$	$\gamma_{dry} = 0.0455I_{S(50)dry} + 2.3253$
تخمین دانسیتهٔ خشک با استفاده از مقاومت برزیلی خشک	$R^2 = 0.782$	$\gamma_{dry} = 0.0175BTS_{dry} + 2.3753$
تخمین شاخص دوام بعد از سیکل پانزده با استفاده از تخلخل	$R^2 = 0.9$	$Id_{15} = -0.260n + 99.716$
تخمین شاخص دوام بعد از سیکل پانزده با استفاده از دانسیته خشک	$R^2 = 0.8733$	$Id_{15} = 8.727\gamma_d + 76.436$
تخمین تخلخل با استفاده از ارزش ضربه	$R^2 = 0.9628$	$n = 0.3027IV - 1.7543$
تخمین دانسیته خشک با استفاده از ارزش ضربه	$R^2 = 0.9058$	$\gamma_{dry} = -0.0086IV + 2.7134$
تخمین تخلخل با استفاده از عدد سایش لوس‌آنجلس	$R^2 = 0.8025$	$n = 0.6042L.A. - 11.441$
تخمین دانسیته خشک با استفاده از عدد سایش لوس آنجلس	$R^2 = 0.7229$	$\gamma_{dry} = -0.0169L.A. + 2.9808$
تخمین مقاومت تراکمی تک محوری با سرعت موج فشاری(خشک)	$R^2 = 0.7295$	$UCS_{dry} = 14.28Vp_{dry} - 11.52$
تخمین سرعت موج فشاری با استفاده از مقاومت برزیلی(خشک)	$R^2 = 0.7306$	$Vp_{dry} = 0.147BTS_{dry} + 3.3$
تخمین سرعت موج فشاری با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای(خشک)	$R^2 = 0.758$	$Vp_{dry} = 0.407I_{S(50)dry} + 2.752$
تخمین مقاومت تک‌محوری با استفاده از مقاومت برزیلی (خشک)	$R^2 = 0.8331$	$UCS_{dry} = 2.6356BTS_{dry} + 29.559$
تخمین شاخص بار نقطه‌ای با استفاده از مقاومت برزیلی(خشک)	$R^2 = 0.7279$	$I_{S(50))dry} = 0.3146BTS_{dry} + 1.8907$
تخمین مقاومت تک‌محوری با استفاده از بار نقطه‌ای (خشک)	$R^2 = 0.8651$	$UCS_{dry} = 7.2903I_{S(50)dry} + 19.728$
تخمین تخلخل با استفاده از عدد سختی اشمیت	$R^2 = 0.839$	$n = -0.451Hs + 24.52$
تخمین دانسیته خشک با استفاده از عدد سختی اشمیت	$R^2 = 0.768$	$\gamma_{dry} = 0.012Hs + 1.972$
تخمین عدد سختی اشمیت با استفاده از مقاومت تک‌محوری خشک	$R^2 = 0.803$	$Hs = 0.514UCS_{dry} + 16.78$

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

نتیجه‌گیری

نتایج سنگ‌شناسی نشان داد با کاهش اندازه ذرات در سنگ‌های آهکی، میزان مقاومت تراکمی تک‌محوری به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و حضور دانه‌های درشت کلسیت در نمونه‌های آهکی منطقه دلیلی بر کاهش مقاومت تراکمی تک‌محوری این سنگ‌ها است. براساس بررسی‌های مقاطع نازک سنگ، تخلخل سنگ آهک‌های ایلام- سروک از کم‌تر از ۱ تا ٤ درصد متغیر است. بنا بر این سنگ‌های مذکور از نظر میزان تخلخل با توجه به رده‌بندی آنون در ردهٔ خیلی پایین تا پایین قرار دارند. شاخص جذب آب تمام نمونه‌های سنگ آهک کم‌تر از ۲ درصد است. با انجام آزمایش دوام‌پذیری و بر مبنای طبقه‌بندی گمبل و نیز رده‌بندی فرانکلین و چاندرا سنگ آهک‌های ایلام-سروک در ردهٔ خیلی‌مقاوم قرار دارند و احتمال وارفتن و کاهش شدید مقاومت آن‌ها در مقابل آب بسیارکم است. براساس نتایج آزمایش ارزش ضربه، حداکثر و حداقل مقاومت در برابر ضربه به‌ترتیب مربوط به سنگ آهک گورستان خضر (GK) و گرداب سنگی (GS) است.

بر اساس رده‌بندی مهندسی سنگ بکر، سنگ آهک‌های سازندهای ایلام-سروک در ردهٔ CM و CL قرار می‌گیرند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع به‌ترتیب متعلق به سنگ آهک گورستان خضر (GK) و سنگ آهک پل کرگانه (PK) است. مقادیر ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ (مدول یانگ و نسبت پواسون) به‌دست آمده از سرعت امواج صوتی در حالت خشک، مرطوب و اشباع در سنگ آهک گورستان خضر (GK) بیش‌ترین مقادیر و در سنگ آهک گرداب سنگی (GS) کم‌ترین مقادیر را دارد. هدایت هیدرولیکی تمامی سنگ آهک‌های بکر به‌هم نزدیک است و همگی در ردهٔ نفوذناپذیر قرار می‌گیرند. حداقل ثابت سرعت انحلال برای سنگ آهک پل کرگانه (PK) در اسیدیتهٔ ۵/۵ تا ٦ برابر $۱/۰۷ \times ۱۰^{-۷}$ میلی‌گرم در لیتر محاسبه شده است.

منابع

۱. آقانباتی ع.، *زمین‌شناسی ایران*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، تهران (۱۳۸۳).

۲. خانلری غ.ر. و همکاران، *بررسی انحلال‌پذیری سنگ‌های آهکی جنوب و جنوب شرق استان همدان*، ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (۱۳۸۸).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

۳. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، *نقشه زمین‌شناسی خرم‌آباد*، مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، تهران (۱۳۷۱).

٤. شرکت آب منطقه‌ای لرستان، *بررسی و مطالعات هیدروژئولوژی و بیلان آبخوان آبرفتی در مرحله نیمه تفصیلی در دشت خرم‌آباد*، خرم‌آباد (۱۳۸۹).

۵. فهیمی‌فر ا.، سروش ح.، *آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها*، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۸۰).

٦. قبادی م. ح.، *زمین‌شناسی مهندسی کارست*، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان. چاپ دوم (۱۳۸۸).

۷. قربانی‌صابر ا.، قبادی م. ح.، *تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی(برزیلی) سنگ آهک با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای (مطالعه موردی)*، پنجمین همایش تخصصی زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور ابهر (۱۳۹۰).

۸. وتوکوری وی. اس.، کاتسویاما ک.، *درآمدی بر مکانیک سنگ*، (ترجمه فاروق حسینی، م.)، نشر کتاب دانشگاهی، تهران (۱۳۸٤).

9. Anon, "{The description of rock masses for engineering properties", Working Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 10 (1977) 88-355.

10. ASTM C131, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 & 04.03 & 14.02, ASTM, USA (1996).

11. ASTM D2845, "Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.02, ASTM, USA (1996).

12. ASTM D3967, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01 & 14.02, ASTM, USA (1996).

13. ASTM D4543, "Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 & 04.08, ASTM, USA (1986).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

14. ASTM D4644, "Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks" (1998).
15. ASTM D2938, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08 & 03.01 & 14.02, ASTM, USA (2002).
16. ASTM D5731, "Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock",Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08 & 04.09 & 03.01, ASTM, USA (2003).
17. Aydin A., Basu A., "The Schmidt hammer in rock material characterization", Eng. Geol., Vol. 81 (2005) 1-14.
18. Bell F.G., "A survy of the physical properties of some carbonate rocks", Bulletin of International", Association Engineering Geology, Vol. 24 (1998) 105-110.
19. British Standard Institution, "Code of practice for determination of Aggregate", Impact Value, "B.S. 812" (1989).
20. Broch E., Franklin J. A., "The point load strength test", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 9 (1972) 669-698.
21. Brown E. T. (ed), "Rock Characterization, Testing and Monitoring": ISRM suggested Methods, Pergamon Press., Oxford (1974).
22. D'Andrea D. V., Fisher R. L., Fogelson D. E., "Prediction of compression strength from other rock properties", Colo. Sch. Mines. Q., Vol.59 (4B) (1964) 623-40.
23. Folk R. L., "Petrology of Sedimentary Rocks: Austin, Texas", Hemphill Publishing Company (1974).
24. Franklin J. A., Chandra R., "The slake durability index", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9 (1972) 325-342.
25. Gamble J. C., "Durability plasticity classification of shales and other argillaceous rocks", Ph.D. Thesis. University of Illinots (1971).
26. http://www.aftab.ir

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]

27. http://www.ngdir.org
28. ISRM, "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 15 (1978) 89-98.
29. ISRM, "Suggested Methods, Rock characterization testing and monitoring", In: Brown, E.T. (Ed.), Oxford: Pergamon Press (1981).
30. Kahraman S., Gunaydin O., Fener M., "The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 42 (2005) 584-589.
31. Kahraman S., Yeken T., "Determination of physical properties of carbonate rocks from P- wave velocity", Bull. Eng. Geol. Environ., Vol. 67 (2008) 277-281.
32. Lama R. D., Vutukuri V. S., "Handbook on mechanical properties of rocks", Vol. Π, Ш and IV. Clausthal, Trans Tech publications (1978).
33. Palchik V., Hatzor Y. H., "The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalk", Rock Mech. Rock Eng.,Vol.37(4) (2004) 331-41.
34. Stagg K.g., ZienKiewicz, O. C., (edits), "Rock Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons (1979).
35. Tamrakar K. N., Yokota S., Shrestha S. D., "Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones", Central Nepal Sub-Himalayas, Eng. Geol., Vol. 90 (2007) 105-123.
36. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner G. H. F., "An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media", Geophysics, Vol. 23 (1958) 459-493.
37. Yasar E., Erdogan Y., "Correlating sound velocity with density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 41 (2004) 871-875.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.5.7]