# ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های آهکی سازند آسماری در ساختگاه سدهای خرسان ۱ و ۲

*رسول اجل‌لوئیان، مجتبی محمدی: دانشگاه اصفهان

**تاریخ: دریافت** ۸۹/۳/۱ **پذیرش** ۹۱/۱/۱۶

## چکیده

تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر در پروژه‌های عمرانی از قبیل فضاهای زیرزمینی، سدها، پی‌ها و پایداری شیب‌ها که با سنگ سرو کار دارند از اهمیت چشم‌گیری برخوردار است. ارائهٔ دقیق پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مقاومت فشاری و مدول تغییر شکل سنگ، از نقطه نظر طراحی‌ها نقش به‌سزایی دارد. ارزیابی این پارامترها اغلب هزینه‌بر، وقت‌گیر و بعضاً به‌لحاظ اجرایی مشکل است و ارائهٔ معیاری برای تخمین مناسب آن‌ها می‌تواند در راستای تعداد، نوع آزمایش‌ها و صحت‌سنجی نتایج راه‌گشا باشد. از آن‌جاکه سازند آسماری به‌طور گسترده‌ای در بخش چشم‌گیری از غرب و جنوب غرب کشور رخ‌نمون دارد و پروژه‌های بزرگ مهندسی در ارتباط با این سازند است، بدین لحاظ به موضوع مذکور توجه شده است. مقالهٔ حاضر با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی دو پروژهٔ مهم مربوط به ساخت‌گاه سدهای خرسان ۱ و ۲ که عمدتاً در سازند آهکی آسماری بالایی است، خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی و دوام‌داری سنگ بکر و عوامل زمین‌شناسی کنترل کنندهٔ تغییرات آن‌ها را ارزیابی و تجزیه و تحلیل می‌کند و محدودهٔ تغییرات آن‌ها با روابط تجربی با تقریب مناسبی ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی**: آهک آسماری، خصوصیات ژئومکانیکی، سنگ بکر، فاکتورهای زمین‌شناسی

## مقدمه

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مصالح زمین در طراحی و روش اجرای پروژه‌های عمرانی اهمیت ویژه‌ای دارند. شناسایی خصوصیات مادهٔ سنگ نیز بخشی عمده از

*نویسنده مسئول

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

مکانیک سنگ است که برای شناسایی دقیق آن در پروژه‌ها هزینه‌های زیادی پرداخت می‌گردد. با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، برای تفسیر نتایج آزمایش‌های بعدی و پیدا کردن دیدگاه مناسب برای قضاوت مهندسی می‌توان محدودهٔ تغییرات این داده‌ها را مشخص کرد و پس از برقراری روابط بین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی و برشی سنگ‌ها، معادله‌هایی برای تخمین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌ها ارائه کرد. در این زمینه محققان مختلف، تحقیقات زیادی طی سال‌های اخیر انجام داده‌اند. تسیامباوس[۱] و سباتکاکیس[۲] (۲۰۰٤)، پس از تجزیه و تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی نظیر آزمایش بار نقطه‌ای و تک‌محوره، فاکتورهای تبدیلی مختلفی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از آزمایش بارنقطه‌ای برای سنگ‌های رسوبی نرم تا سخت پیشنهاد دادند. چانگ[۳]، زوباک[٤] و خاکسار (۲۰۰٦)، ۳۱ معادلهٔ تجربی برای تخمین مقاومت فشاری سنگ‌های شیل، ماسه سنگ، آهک و دولومیت با استفاده از خصوصیات ژئومکانیکی آن‌ها از قبیل سرعت موج تراکمی، مدول یانگ، وزن واحد حجم، زاویهٔ اصطکاک داخلی و ...، پیشنهاد کردند. این معادله‌ها برای تخمین مقاومت فشاری سنگ‌ها، با استفاده از لاگ گمانه‌های ژئوفیزیکی استفاده می‌شوند.

شلابی[۵]، کوردینگ[٦] و ال–حتامله[۷] (۲۰۰۷) روابطی را بین خصوصیات مهندسی سنگ بکر برای آهک، آهک دولومیتی و شیل (مقاومت، مدول الاستیسیته و ضریب پواسان) و انواع مختلف سختی (اشمیت، شور اسکلروسکوپ، سایش، سختی کل) برقرار کردند.

امین[۸] و همکاران (۲۰۰۹) بر روی پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی سنگ‌های کربناته با استفاده از لاگ‌های ژئوفیزیکی چاه‌های نفت صحرای قوار[۹] عربستان صعودی کار کردند. یسار[۱۰] و اردوگان[۱۱] (۲۰۰٤) بین سرعت موج فشاری با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های کربناته از قبیل دانسیته، مقاومت فشاری و مدول یانگ، تطابقی انجام دادند و معادله‌هایی برای تخمین این پارامترها ارائه کرده‌اند. مؤلفان مختلف همچون ماوکو[۱۲]، موکرجی[۱۳] و دورکین[۱٤] (۲۰۰۹) و بل[۱۵] (۲۰۰۰) در این زمینه تألیف‌هایی ارائه کرده‌اند.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ۱. Tsiambaos | ۲. Sabatakakis | ۳. Chang | ۴. Zoback | ۵. Shalabi |
| ۶. Cording | ۷. Al-Hattamleh | ۸. Ameen | ۹. Ghawar | ۱۰. Yasar |
| ۱۱. Erdogan | ۱۲. Mavko | ۱۳. Mukerji | ۱٤. Dovorki | ۱۵. Bell |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

در این راستا پژوهش‌هایی بر روی سنگ آهک‌های سازند آسماری انجام شده است. این سازند در غرب و جنوب غرب کشور دارای رخنمون گسترده‌ای است و یکی از مهم‌ترین سازندها در ارتفاعات زاگرس است. از آن‌جاکه تعداد زیادی از پروژه‌های عمرانی از جمله سدها، نیروگاه‌های برق‌آبی و تونل‌ها (از قبیل خرسان ۱، ۲ و ۳ ، کارون٤، سیمره و...) درون یا روی این سازند اجرا شده است، در طی چندین سال گذشته، اطلاعات زیادی با صرف هزینه‌های زیاد، از خصوصیات ژئومکانیکی این سازند به‌دست آمده است. عدم وجود اطلاعات مدون، موجب شده است که در راستای اجرای سازه‌های جدید در این سازندها، به اطلاعات موجود توجه نشود و هزینه‌های اضافی بر پروژه‌ها تحمیل گردد. تخمین مناسب خصوصیات ژئومکانیکی و مشخص شدن محدودهٔ تغییرات آن‌ها، برای قضاوت مهندسی در مراحل اولیهٔ پژوهش‌ها مؤثر است. اطلاعات موجود همراه با بررسی‌های زمین‌شناسی کمک زیادی به کاهش هزینه‌ها و آزمایش‌های مورد نیاز می‌کند.

## روش کار

در این پژوهش از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی سدهای خرسان ۱ و ۲ استفاده شده است. سدهای مذکور در استان چهارمحال و بختیاری و در جنوب باختری لردگان واقع شده‌اند. سنگ‌آهک‌های منطقه‌های بررسی شده عمدتاً متعلق به سازند آسماری بالایی و در برخی نقاط آسماری میانی‌اند. وزن واحد حجم، تخلخل، جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوره، ضریب پوآسان، مدول الاستیسته، سرعت موج تراکمی و برشی، مقاومت برشی و دوام سنگ‌آهک آسماری با انجام آزمایش‌های لازم بر اساس استانداردهای ASTM و ISRM روی مغزه‌های سنگی تهیه شده از گمانه‌های اکتشافی این دو سد، تعیین شده‌اند. خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی و دوام‌داری اندازه‌گیری شده سنگ‌آهک آسماری در این پژوهش، تجزیه و تحلیل آماری شده است و مقادیر میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر هر پارامتر مشخص شده است. هم‌چنین عوامل زمین‌شناسی کنترل کنندهٔ تغییرات این پارامترها به‌صورت کلی بررسی شده است. برای سهولت کار و کاهش آزمایش‌های لازم برای

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

شناسایی مادهٔ سنگ و تخمین برخی از خصوصیات مهندسی سنگ بکر آهک‌آسماری در ساخت‌گاه سد خرسان ۱ و ۲، هم‌بستگی خطی بین برخی از پارامترها برقرار شد و روابطی که میزان ضریب هم‌بستگی زیادی دارد ارائه شده است.

## عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر خصوصیات مهندسی سنگ‌آهک

عوامل مهم و مؤثر در رفتارهای مهندسی سنگ‌های‌آهکی، درجهٔ سخت‌شدگی، اندازهٔ دانه‌ها، تخلخل و دانسیته، نفوذپذیری، پایداری و دوام این سنگ‌ها در برابر انحلال و هوازدگی است. تخلخل تأثیر بسیار زیادی بر مقاومت تراکمی تک‌محورهٔ این سنگ‌ها دارد. برای مثال پدیدهٔ دولومیتی شدن باعث افزایش تخلخل شده است و با افزایش تخلخل، میزان مقاومت سنگ کاهش می‌یابد. متقابلاً کاهش اندازهٔ بلور نیز باعث افزایش مقاومت می‌شود. مثلاً الجسار[۱] و هاکین[۲] (۱۹۷۹)، بیان کردند که سنگ‌آهک میکریتی (ریزبلور) دارای مقاومت بیش‌تری نسبت به نوع اسپاریتی (درشت بلور) است. این سنگ‌ها ممکن است حاوی مقادیر متفاوت ناخالصی‌ها (مثلاً اکسید، هیدروکسید آهن، مواد آلی، کوارتز و کانی‌های رسی) باشند. ساختار آهک به‌دلیل انحلال $CaCo_3$ و در نتیجه دیاژنز آسان‌تر، پیچیده‌تر می‌شود. رفتار مکانیکی آهک غالباً با ۵ فاکتور شامل تخلخل، کلیواژ (رخ)، اندازهٔ کریستال، سنگ‌شدگی و ترک‌های ریز کنترل می‌شود. برای مثال مقاومت به‌عنوان تابعی از کمیت، اندازهٔ متوسط و شکل هندسی تخلخل‌ها است [۹]. در ارتباط با کلیواژ، کریستال کلسیت در مقایسه با فلدسپات و کوارتز از نظر آماری خیلی آسیب‌پذیرتر است. زیرا کلسیت سه رخ دارد، در حالی که فلدسپات دو رخ و کوارتز بدون رخ است. این باور وجود دارد که

کانی‌ها در طول سطوح کلیواژ خود دچار شکستگی می‌شوند. ترک‌ها با یک افزایش تنش محلی آغاز می‌شوند و می‌توانند از گوشهٔ ذرات دیگر شکل بگیرند. به‌دلیل جهت‌های کلیواژ اجزای کریستالی کلسیت، آهک می‌تواند نسبت به تنش‌های محلی آسیب‌پذیر شود و کاهش اندازهٔ آهک و خرد شدن آن نسبت به ماده‌ای سخت مثل کوارتز آسان‌تر است [۸]. اندازهٔ کریستال‌ها، اغلب از آهک‌های متراکم از سخت‌شدگی رسوبات سست منشأ می‌گیرند و اعتقاد

۱. Aljassar ۲. Hawkins

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

بر این است که اندازهٔ کریستال‌های کلسیت بر رفتار خردشدگی سنگ آهک تأثیری قوی دارد [٦]، [۱۳]. به‌طور کلی، کریستال‌های کوچک، منجر به مصرف انرژی زیاد می‌شود. در نتیجه در آهک‌های ریزبلور، ترک‌ها نیاز به عبور بیش‌تر از مرزهای کریستالی نسبت به آهک‌های درشت بلور دارند. اغلب مقاومت آهک به درجهٔ کریستالی شدن مجدد ارتباط دارد. پیوند قوی بین دو کریستال، احتمالاً پیوندی یونی قوی است که با در هم قفل‌شدگی مکانیکی برقرار می‌شود. شکستگی‌ها همیشه مسیری دارای حداقل مقاومت را دنبال می‌کنند. بنا بر این در طول فرآیند خردشدگی، تقابلی بین درجهٔ سیمان‌شدگی و ضعف‌های به‌وجود آمده با جهت‌های کلیواژ بلور وجود دارد [۱۱].

## نتیجه‌گیری و بحث

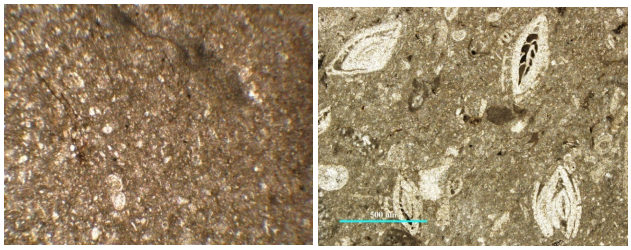
در این بخش خصوصیات لیتولوژی، خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی و برشی سنگ آهک آسماری بررسی می‌شود و ضمن ارائه نتایج به بحث و بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

### ۱. بررسی مقاطع میکروسکوپی

بر اساس بررسی ۲۲ مقطع نازک میکروسکوپی تهیه شده از سنگ‌های آهک آسماری بالایی حاصل از گمانه‌های حفر شده در گالری‌های اکتشافی سد خرسان ۲، مشخص شد که از لحاظ کانی‌شناسی این سنگ‌ها عمدتاً از کلسیت، آراگونیت و کانی‌های اپاک (اکسید، هیدروکسید آهن، مواد آلی) و از درصد خیلی ناچیز رس و کوارتز تشکیل شده‌اند. میزان کلسیت دانه‌ریز (۱ تا ٤ میکرون) از ۲۰ تا ۸۰ درصد در این سنگ‌ها متغیر است و بعضاً حاوی مقدار چشم‌گیری فسیل است. از آن‌جا که بیش از ۵۰ ٪ کانی‌های تشکیل‌دهنده شامل کانی‌های کربنات و از نوع کلسیت است این سنگ‌ها جزء سنگ‌های کربناته به‌حساب می‌آیند. بر اساس طبقه‌بندی دانهام نام این سنگ‌ها می‌تواند مدستون، وکستون، پکستون و گرین‌استون باشد و در طبقه‌بندی فولک نیز با عنوان بایومیکرایت و بایواسپارایت نام‌گذاری می‌شوند. دانه‌های اسکلتی نیز شامل دوکفه‌ای، مرجان، بایوکلاست، نومولیت و... است. سن این سنگ‌ها، الیگوسن–میوسن‌اند. در شکل ۱ دو نمونه از تصویر مقاطع نازک میکروسکوپی سنگ آهک آسماری نشان داده شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]



**شکل ۱. دو نمونه مقطع نازک میکروسکوپی از سنگ آهک آسماری**

## ۲. خصوصیات فیزیکی

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته روی نتایج ۳٦۵ نمونهٔ سنگ آهک آسماری، میانگین وزن واحد حجم آهک در حالت خشک و اشباع به‌ترتیب برابر با ۲/۵٤۱ و ۲/۵۹۵ گرم در سانتی‌متر مکعب است. نزدیک بودن این مقادیر، به‌دلیل کمبود میزان تخلخل در آهک‌ها، نشان‌دهندهٔ این است که وجود آب تأثیر چندانی روی وزن واحد حجم ندارد (میانگین ۵/٦٦۸ درصد). به‌طور کلی هر چه تخلخل زیادتر شود مقدار جذب آب بیش‌تر و مقاومت کاهش می‌یابد. آهک‌های جوان‌تر، تخلخل بیش‌تری نسبت به آهک‌های قدیمی‌تر دارند. میانگین درصد جذب آب در این سنگ‌ها حدود ۲/۱۹۹ و میانگین وزن مخصوص ذرات جامد (Gs) ۲/۷۱۷ بوده و دامنهٔ تغییرات آن‌ها کوچک‌اند. از عوامل مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی **سنگ آهک‌ها**، هوازدگی است. توگرول[۱] (۲۰۰٤) در بررسی که روی آهک‌های ترکیه انجام داده است، نشان می‌دهد که با افزایش درجهٔ هوازدگی سنگ، مقادیر وزن واحد حجم، تخلخل و جذب آب به‌ترتیب از ۲/٦٦ تا ۲/۵۹، ۰/۷۵ تا٤/۳۷ و۰/۲٦ تا ۱/٤۸ کاهش می‌یابند. محدودهٔ تغییرات ویژگی‌های فیزیکی آهک‌های آسماری در جدول ۱ ارائه شده است.

**جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگ آهک آسماری**

| | دانسیتهٔ خشک (gr/cm3) | دانسیتهٔ اشباع (gr/cm3) | جذب آب (٪) | تخلخل (٪) |
|---|---|---|---|---|
| میانگین | ۲/۵٤۱ | ۲/۵۹۵ | ۲/۱۹۹ | ۵/٦٦۸ |
| انحراف معیار | ۰/۱۰۷ | ۰/۰۷٦ | ۱/٦۰۲ | ۳/۷۲۷ |
| حداقل | ۲/۰۹۸ | ۲/۲۹۹ | ۰/۱۰۰ | ۰/۲۰۰ |
| حداکثر | ۲/۷۲۰ | ۲/۷٤۰ | ۱۱/۱٤۸ | ۲۰/۰۹٤ |

۱. Tugrul

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

### ۳. خصوصیات مکانیکی

برای تعیین محدودهٔ تغییرات خصوصیات مکانیکی سنگ‌آهک آسماری، ۲٤۵ نمونهٔ بررسی شد. میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت خشک ۹٤/٤٦ مگاپاسکال است و دامنهٔ تغییرات مقاومت نیز زیاد است. میانگین مقاومت این سنگ در حالت اشباع ۷۲/٤٦ مگاپاسکال است، که دلیل آن را می‌توان وجود ناخالصی‌های رسی و تخلخل موجود در آهک آسماری دانست که با جذب آب باعث کاهش مقاومت می‌شوند. با توجه به جوان بودن آهک آسماری مقاومت آن نسبت به سنگ‌های آهک با قدمت بالاتر، کم‌تر است که این به‌میزان تراکم و وزن واحد حجم نسبتاً کم‌تر آن مرتبط می‌شود. میانگین ضریب پوآسان اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در حالت اشباع کمی بیش‌تر از حالت خشک است و دامنهٔ تغییرات آن‌ها نیز در حالت خشک و اشباع به‌ترتیب ۰/۲۹-۰/۱۱ و ۰/۳۹-۰/۱۳ است. میانگین مدول تغییر شکل در حالت اشباع نیز کم‌تر از حالت خشک است که حاکی از تغییر شکل بیش‌تر سنگ در حالت اشباع است. به‌طور کلی فاکتورهای کنترل‌کنندهٔ مقاومت و تغییرشکل این سنگ‌ها ناهم‌سان‌گردی، آب محتوی و فشار محدود کننده هستند [۱٦]. بر اساس تجربیات گذشته و داده‌های متعدد از آزمون‌های مقاومتی سنگ‌های کربناته با تخلخل پایین، مقاومت نمونه سنگ بکر بیش‌تر به شکستگی‌ها، بافت رسوبات و فرایندهای دیاژنتیکی نسبت به فرایندهای هوازدگی، بستگی دارد [۱۱].

به‌طور کلی عواملی نظیر تخلخل، ناخالصی‌های موجود در سنگ، وزن واحد حجم و خشک یا اشباع بودن و اندازهٔ بلور، هوازدگی، وجود ریز ترک‌ها و موارد احتمالی دیگر روی پارامترهای مکانیکی سنگ‌آهک مؤثر است. البته وجود ریزترک‌ها و راستای آن‌ها با برای بارگذاری در مقدار مقاومت کششی، تأثیر به‌سزایی دارد [۵]، [۲]. محدودهٔ تغییرات خصوصیات مکانیکی آهک آسماری در جدول ۲ آورده شده است.

### ٤. خصوصیات دینامیکی

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته روی ۱۰۷ نمونهٔ سنگ آهک آسماری در حالت خشک و اشباع، ویژگی‌های دینامیکی آن‌ها در آزمایشگاه مشخص شد. میانگین سرعت موج تراکمی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

و برشی در حالت خشک به‌ترتیب برابر با ٤٧٤٥ و ٢٦٩١ متر بر ثانیه و در حالت اشباع نیز به‌ترتیب ٥٠١٢ و ٣٠٠٧ متر بر ثانیه است. مقادیر میانگین مدول تغییر شکل دینامیکی تخمین زده شده حاصل از سرعت موج در حالت اشباع و خشک نسبتاً یک‌سان است و نسبت به مدول استاتیکی حاصل از آزمایش تک‌محوره، مقادیر زیادتری را نشان می‌دهند، زیرا مقدار تغییر شکل و تنش وارده به سنگ کم‌تر است. مقادیر میانگین مدول برشی و حجمی نیز در حال اشباع و خشک نزدیک به‌هم است که نشان می‌دهد خشک و اشباع بودن نمونه روی این پارامتر تأثیر چندانی ندارد. از عوامل مؤثر بر سرعت انتشار امواج تراکمی و ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ می‌توان به نوع سنگ، بافت، ساخت، چگالی، تخلخل، ناهم‌سان‌گردی، سطح تنش، میزان رطوبت و درجهٔ حرارت و موارد دیگر اشاره کرد [٢].

مشخصات دینامیکی سنگ آهک آسماری در حالت خشک و اشباع در جداول ٣ و ٤ نشان داده شده است.

**جدول٢. خصوصیات مکانیکی سنگ آهک آسماری**

| | حالت خشک | | | حالت اشباع | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | مقاومت فشاری تک محوره (مگاپاسکال) | ضریب پوآسان | مدول تغییر شکل (گیگا پاسکال) | مقاومت فشاری تک محوره (مگاپاسکال) | ضریب پوآسان | مدول تغییر شکل(گیگا پاسکال) | مقاومت کششی (مگاپاسکال) |
| میانگین | ٩٤/٤٦٠ | ٠/٢٠٧ | ٣٠/٤٧٨ | ٧٢/٤٦٠ | ٠/٢٣٦ | ٢٥/١٠٩ | ٦/٨١٨ |
| انحراف معیار | ٣٢/٩١٣ | ٠/٠٣٦٦ | ١٣/٦٨١ | ٣٤/٠٦٧ | ٠/٠٣٩ | ١٢/٦٢٠ | ٢/٦٩٤ |
| حداقل | ٢٥/٠٩٠ | ٠/١١٠ | ٣/٣٩٠ | ١١/٩٨٠ | ٠/١٣٠ | ١/٢٥٠ | ١/١٧٠ |
| حداکثر | ١٨٤/٣٤٠ | ٠/٢٩٠ | ٥٧/٧٧٠ | ١٩٦/٣٠٠ | ٠/٣٩٠ | ٨٠/٣١٠ | ١٦/٧٠٠ |

**جدول ٣. خصوصیات دینامیکی آهک آسماری در حالت خشک**

| | سرعت موج تراکمی (m/s) | سرعت موج ثانویه (m/s) | مدول الاستیستهٔ دینامیکی (Gpa) | مدول برشی دینامیکی (Gpa) | ضریب پوآسان | مدول حجمی (Gpa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| میانگین | ٤٧٤٥/٨١٩ | ٢٦٤١/٠٩٥ | ٤٨/٦٩٠ | ١٩/٥٤٥ | ٠/٢٤٧ | ٣١/١٥٥ |
| انحراف معیار | ٧٧٥/١٨٢ | ٤٤٤/٨٦١ | ١٤/٧٦٨٨ | ٦/١٠٦٦ | ٠/٠٦٨ | ١١/٨٣٤٦ |
| حداقل | ٢٤٢١/٠ | ١٤٠٢/٠ | ١٣/٣٠٠ | ٥/٠٢٠ | ٠/١٣٠ | ٦/٤٣٠ |
| حداکثر | ٥٨٩٥/٠ | ٣٤٨١/٠ | ٨٠/٥٠٠ | ٣٢/٧ | ٠/٤٣٩ | ٥٣/٥١٠ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

**جدول ٤. خصوصیات دینامیکی آهک آسماری در حالت اشباع**

| | سرعت موج تراکمی (m/s) | سرعت موج برشی (m/s) | مدول الاستیسیتهٔ دینامیکی (Gpa) | مدول برشی دینامیکی (Gpa) | ضریب پوآسان | مدول حجمی (Gpa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| میانگین | ٥٠١٢/٤٥٨ | ٣٠٠٧/٢٦٦ | ٥٢/٧٤٠ | ٢٢/٣٣٢ | ٠/٢٥٢ | ٣٣/٢٤٥ |
| انحراف معیار | ٦٥٤/٤٥٤ | ٥١٩/٦٨١ | ١٤/٩١١ | ٨/٥٩٨ | ٠/٠٩٣ | ١٠/٥٦٦ |
| حداقل | ٢٨٠٠/٠ | ٨٣٧/٠ | ١٠/١٠ | ٥/٤٨٠ | ٠/٠٨٠ | ٨/٨٠٠ |
| حداکثر | ٦٥٢٩/٠ | ٤٠٧٦/٠ | ٧٩/٦٠٠ | ٧٨/٦٠٠ | ٠/٤٨٧ | ٥٥/٦١٠ |

## ۵. خصوصیات مقاومت برشی

آزمایش سه‌محوره از روش‌های منحصر به فرد برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی ماده سنگ است [۱۱]. بر اساس نتایج به‌دست آمده از ۵۲ آزمایش سه‌محوره انجام شده روی سنگ آهک آسماری، میانگین زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی به‌ترتیب برابر با ٤٤/٤ درجه و ۲۳/۸ مگاپاسکال است. با استفاده از نتایج آزمایش روی نمونه‌های اره‌بر، میانگین زاویهٔ اصطکاک باقیمانده ۳٦ درجه به‌دست آمده است. مقدار همگن بودن سنگ، وجود ناخالصی رسی، ریز ترک‌ها، میزان هوازدگی، درشت یا ریز بلور بودن، شرایط انجام آزمایش از جمله عوامل مؤثر بر پارامترهای مقاومت برشی سنگ است [۲]. محدودهٔ تغییرات زوایهٔ اصطکاک داخلی و میزان چسبندگی ۵۲ نمونهٔ آهک آسماری مورد آزمایش در جدول ۵ آورده شده است.

**جدول ۵. خصوصیات مقاومت برشی سنگ آهک آسماری**

| | اصطکاک داخلی | چسبندگی ( مگاپاسکال) |
|---|---|---|
| میانگین | ٤٤/٤١٨ | ٢٣/٨٩٩ |
| انحراف معیار | ١١/١٢٥ | ١٤/٣٩٨ |
| حداقل | ١٥/٠٣٠ | ٦/٨٣٠ |
| حداکثر | ٦١/٦٠٠ | ٧٧/٥٤٠ |

## ٦. خصوصیات دوام‌داری

شاخص دوام‌داری بسیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در مقابل تر وخشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی آب است. دامنهٔ تغییرات دورهٔ دوم شاخص دوام‌داری سنگ

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

آهک آسماری از ۸۶ تا ۹۹/۸ درصد است و میانگین آماری آن‌ها ۹۸ درصد است. بدین لحاظ این سنگ‌ها از نظر شاخص دوام‌داری در ردهٔ کمی مقاوم تا خیلی مقاوم قرار می‌گیرند. میزان و نوع سیمان، در شاخص دوام خیلی مؤثر است. هر چه سیمان بیش‌تر و قوی‌تر باشد شاخص دوام نیز بیش‌تر می‌شود.

## تخمین خصوصیات مهندسی سنگ آهک آسماری با استفاده از روابط تجربی

عده‌ای از محققان روابطی را برای تخمین خصوصیات مقاومتی و فیزیکی سنگ‌های رسوبی ارائه داده‌اند. از آنجاکه در غالب این روابط به ضرایب هم‌بستگی ($R^2$) اشاره‌ای نشده است، در نتیجه در بارهٔ قابلیت اعتماد این روابط نمی‌توان قضاوت کرد [۱۶].

در مقالهٔ حاضر، پس از تعیین محدودهٔ تغییرات خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی و برشی سنگ آهک آسماری در ساخت‌گاه سد خرسان ۱ و۲، برای برآورد و تخمین پارامترهای مهندسی این سنگ، هم‌بستگی خطی برقرار و مقدار ضریب هم‌بستگی و روابط مربوط به آن‌ها نیز مشخص شده است. هر چه میزان ضریب هم‌بستگی بین دو پارامتر بیش‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ یک‌سان بودن عوامل تأثیرگذار بر روی آن‌ها است. در بخش‌های بعدی فقط به روابطی که میزان هم‌بستگی خطی بالایی دارند اشاره می‌گردد.

### ۱.روابط تجربی بین خصوصیات فیزیکی سنگ آهک آسماری

بین مقادیر تخلخل، جذب آب ، وزن واحد حجم خشک و اشباع هم‌بستگی خطی برقرار گردید، که نتایج آن در اشکال ۱ تا ۵ و روابط حاصل از آن‌ها به‌همراه ضرایب هم‌بستگی‌شان در معادله‌های ۱ تا ۵ آورده شده است.

برای تخمین تخلخل با استفاده از وزن واحد حجم خشک، پس از تطابق بین این دو پارامتر رابطهٔ ۱ به‌دست آمد. بر اساس نمودار شکل ۱، هر چه وزن واحد حجم خشک بیش‌تر شود، مقادیر تخلخل کم‌تر می‌شود. در واقع شیب این نمودار منفی است.

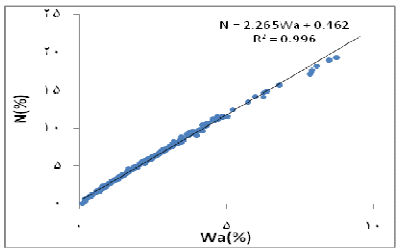
$$N = 81.91-30.06\ \gamma_d \text{ ،} (R^2 = 0.825)$$ (رابطهٔ ۱)

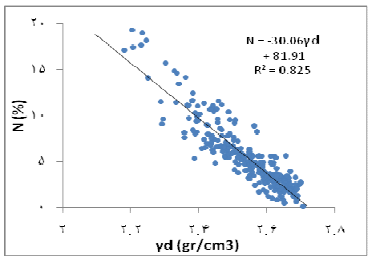
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

همچنین با استفاده رابطهٔ ۲، می‌توان درصد تخلخل را از درصد جذب آب تخمین زد. بدیهی است هر چه درصد تخلخل بیش‌تر می‌شود، میزان جذب آب نیز بیش‌تر می‌شود (شکل ۲). ضریب هم‌بستگی این رابطه بالا است و می‌توان با دقت خیلی خوبی مقادیر تخلخل را با استفاده از آن تخمین زد.

$$N = 2.265\ W_a + 0.462\ ,\ (R^2 = 0.996)$$ ( رابطهٔ ۲)




**شکل ۱. رابطهٔ بین وزن واحد حجم خشک و تخلخل  شکل ۲. رابطهٔ بین جذب آب و تخلخل**

با داشتن وزن واحد حجم اشباع می‌توان مقدار جذب آب سنگ آهک آسماری را با استفاده از رابطهٔ ۳ به‌دست آورد (شکل ۳).

$$W_a = 45.38\text{-}16.63\gamma_{sat}\ ,\ (R^2 = 0.663)$$ (رابطهٔ ۳)

مقادیر جذب آب سنگ‌آهک آسماری را می‌توان با استفاده از وزن واحد حجم خشک نیز به‌دست آورد (رابطهٔ ٤). نمودار این رابطه در شکل ٤ آورده شده است. هر چه مقدار وزن واحد حجم خشک کم‌تر باشد، با توجه به این‌که تخلخل بیش‌تری دارد، مقدار جذب آب بیش‌تر می‌شود.به‌همین دلیل شیب نمودار منفی است. این رابطه نسبت به رابطهٔ ۳، به‌دلیل این‌که فضاهای خالی با آب پر نشده است، ضریب هم‌بستگی بیش‌تری دارد.

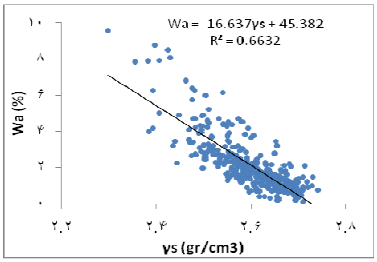
$$W_a = 36.07\text{-}13.33\ \gamma_d\ ,\ (R^2 = 0.834)$$ (رابطهٔ ٤)

مقادیر وزن واحد حجم اشباع را می‌توان با استفاده از وزن واحد حجم خشک، به‌کمک رابطهٔ ۵ تخمین زد. نمودار مربوط به این رابطه در شکل ۵ آورده شده است. این رابطه برای تخمین وزن واحد حجم اشباع دقت بالایی دارد.

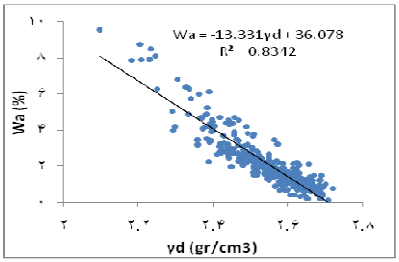
$$\gamma_{sat} = 0.705\gamma_{dry} + 0.802\ \ ,\ \ (R^2 = 0.950)$$ ( رابطهٔ ۵)

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

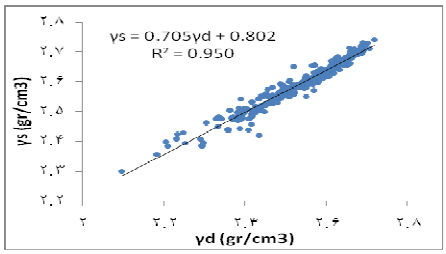
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]




**شکل ۳. رابطهٔ بین وزن واحد حجم اشباع و جذب آب**




**٤. شکل رابطهٔ بین واحد حجم خشک و جذب آب**




**شکل ۵. رابطه بین وزن واحد حجم خشک و اشباع**

## ۲. روابط تجربی بین خصوصیات مکانیکی سنگ‌آهک آسماری

با استفاده از مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت خشک و اشباع یک سری روابط خطی با ضریب هم‌بستگی نسبتاً مناسب در خصوص سنگ‌آهک آسماری به‌دست آورده شد، که نتایج آن در اشکال ٦ تا ۹ و روابط حاصل از آن‌ها به‌همراه ضرایب هم‌بستگی‌شان در معادله‌های ٦ تا ۹ آورده شده است.

برای تخمین مدول الاستیسیته در حالت خشک با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت خشک، رابطهٔ ٦ ارائه شده است و نمودار شکل ٦ نیز مربوط به این رابطه است. هر چه مقدار مقاومت فشاری تک محوره خشک بیش‌تر می‌شود، مدول الاستیسیته خشک نیز زیادتر می‌گردد.

$$E_{dry} = 0.319Ucs_{dry}+0.022 \quad , \quad (R^2 = 0.582)$$ (رابطهٔ ٦)

برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ آهک آسماری در حالت اشباع با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت خشک، رابطهٔ ۷ پیشنهاد می‌گردد. نمودار مربوط به این رابطه در شکل ۷ آورده شده است. بدیهی است هر چه مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت خشک افزایش می‌یابد در حالت اشباع نیز مقدار آن افزایش می‌یابد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

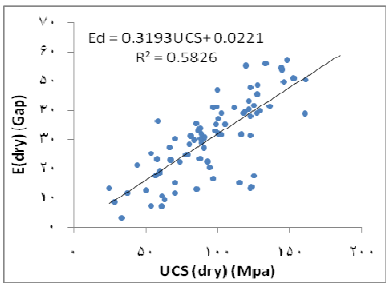
$$UCSs = 0.7833UCSd - 4.9305 \quad (R^2 = 0.6285)$$ (رابطهٔ ۷)

برای تخمین مدول الاستیسیتهٔ در حالت اشباع با استفاده مدول الاستیسیتهٔ در حالت خشک، رابطهٔ ۸ به‌دست آمده است. چنان‌چه نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد، مدول الاستیستهٔ در حالت اشباع همراه با حالت خشک روند صعودی دارد.

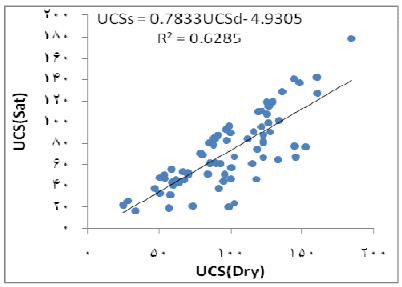
$$E_{sat} = 0.615\ E_{dry} + 2.568 \quad (R^2 = 0.745)$$ (رابطهٔ ۸)

برای تخمین مدول الاستیسیتهٔ در حالت اشباع با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت اشباع، رابطهٔ ۹ ارائه شده است. نمودار شکل ۹، مربوط به این رابطه است. این رابطه در مقایسه با رابطهٔ ٦ برای حالت خشک، از ضریب هم‌بستگی بیش‌تری برخودار است.

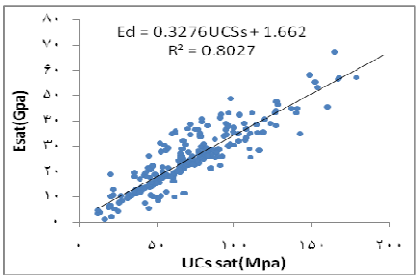
$$E_{sat} = 0.327\ Ucs_{sat} + 1.662\ (R^2 = 0.802)$$ (رابطهٔ ۹)



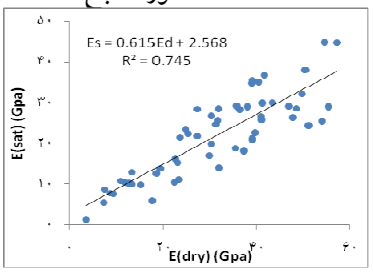

**شکل ٦. رابطهٔ بین مقاومت فشاری تک‌محوره خشک با مدول الاستیسیته خشک**




**شکل ۷. رابطهٔ بین مقاومت فشاری تک‌محوره خشک با مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع**




**شکل ۸. رابطهٔ بین مدول الاستیسیتهٔ خشک و مدول الاستسیتهٔ اشباع**




**شکل ۹. رابطهٔ بین مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع با مدول الاستیسیتهٔ اشباع**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

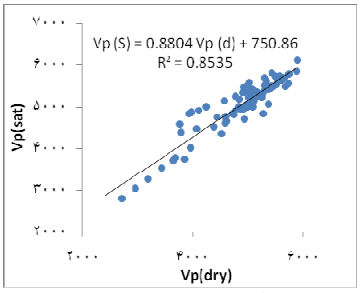
### ۳. روابط تجربی بین خصوصیات دینامیکی سنگ آهک آسماری

با استفاده از مقادیر سرعت موج فشاری در حالت اشباع و در حالت خشک می‌توان با دانستن یکی، دیگری را به‌دست آورد. رابطهٔ ۱۰ رابطه‌ای خطی بین این دو پارامتر است و نمودار **مربوط** به آن در شکل۱۰ آورده شده است. به‌طور کلی با افزایش سرعت موج در حالت خشک، سرعت موج در حالت اشباع نیز افزایش می‌یابد.

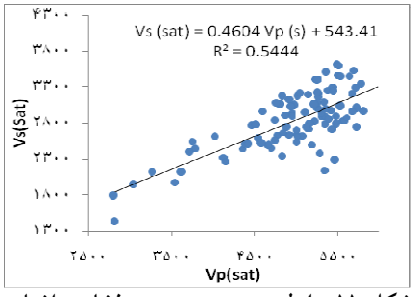
$$Vp_{sat} = 0.88\ Vp_{dry} + 750.8\ (R^2 = 0.853) \qquad (\text{رابطهٔ } ۱۰)$$

برای تخمین سرعت موج برشی در حالت اشباع، با استفاده از سرعت موج فشاری در حالت اشباع، رابطهٔ ۱۱ ارائه شده است . نمودار مربوط به این رابطه در شکل ۱۱ آورده شده است. این رابطه نسبت به رابطهٔ ۱۰، از ضریب هم‌بستگی کم‌تری بر خوردار است.

$$Vs(sat) = 0.4604\,Vp(sat) + 543.41 \quad (R^2 = 0.5444) \qquad (\text{رابطهٔ } ۱۱)$$




**شکل ۱۰. رابطهٔ بین سرعت موج فشاری خشک با موج فشاری اشباع**




**شکل ۱۱. رابطه بین سرعت موج فشاری اشباع با موج برشی اشباع**

برای تخمین سرعت موج برشی در حالت خشک، با استفاده از سرعت موج فشاری در حالت خشک ، رابطهٔ ۱۲ ارائه شده است. نمودار مربوط به این رابطه در شکل ۱۲ آورده شده است.

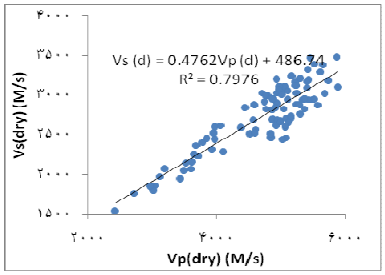
$$Vs(d) = 0.4762\,Vp(d) + 486.74\ (R^2 = 0.7976) \qquad (\text{رابطهٔ } ۱۲)$$

برای تخمین سرعت موج برشی در حالت اشباع، با استفاده از سرعت موج برشی در حالت خشک، رابطهٔ ۱۳ به‌دست آمده است. نمودار مربوط به این رابطه در شکل ۱۳ آورده شده است.

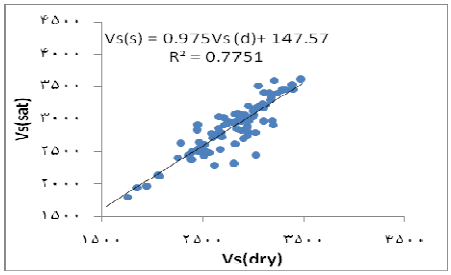
$$Vs(s) = 0.975\,Vs\,(d) + 147.57\ (R^2 = 0.7751) \qquad (\text{رابطهٔ } ۱۳)$$

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]




**شکل ۱۲. رابطهٔ بین سرعت موج فشاری خشک با موج برشی خشک**




**شکل ۱۳. رابطهٔ بین سرعت موج برشی خشک با موج برشی اشباع**

## نتیجه‌گیری

پس از بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به سنگ‌آهک آسماری در ساخت‌گاه سد خرسان ۱ و ۲، محدوده تغییرات خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی، دوام‌داری و برشی آن‌ها تعیین گردید و بین برخی از پارامترها روابط خطی برقرار گردید. این روابط می‌توانند تخمین مناسبی از خصوصیات مهندسی سنگ، پیش از انجام آزمایش‌های مورد نیاز ارائه دهد. با این تخمین می‌توان ضمن قضاوت مهندسی مناسب، هزینه‌ها و تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای شناسایی سنگ بکر را کاهش داد. در این پژوهش به‌طورکلی به عوامل تأثیرگذار زمین‌شناسی توجه شده است. در نهایت پارامترهای مکانیکی سنگ‌آهک آسماری به‌صورت معادلاتی بررسی شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد:

۱. میانگین وزن واحد حجم آهک آسماری در حالت خشک و اشباع به‌ترتیب برابر با ۲/۵٤۱ و ۲/۵۹۵ گرم در سانتی‌متر مکعب، میانگین تخلخل ۵/٦٦۸ درصد و میانگین جذب آب در این سنگ‌ها حدود ۱۹۹/ ۲ درصد است.

۲. میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره در حالت خشک ۹٤/٤٦ مگاپاسکال و در حالت اشباع میانگین مقاومت ۷۲/٤٦ مگاپاسکال است. میانگین مدول تغییر شکل الاستیسیته در حالت خشک ۳۰ گیگاپاسکال و در حالت اشباع ۲۵ گیگاپاسکال و مقدار میانگین ضریب پوآسان در حالت خشک و اشباع به‌ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

۳. میانگین سرعت موج تراکمی و برشی در حالت خشک به‌ترتیب برابر با ٤۷٤٥ و ۲٦۹۱ متر بر ثانیه و در حالت اشباع نیز به‌ترتیب ٥۰۱۲ و ۳۰۰۷ متر بر ثانیه است.

٤. میانگین زاویهٔ اصطکاک داخلی، زاویهٔ اصطکاک باقی‌مانده و چسبندگی به‌ترتیب برابر با ٤٤/٤ درجهٔ ، ۳٦ درجهٔ و ۲۳/۸ مگاپاسکال است.

٥. دامنهٔ تغییرات دورهٔ دوم شاخص دوام‌داری سنگ‌آهک آسماری از ۸٦ تا ۹۹/۸ درصد است.

٦. برخی از روابط کاربردی با ضریب هم‌بستگی زیادبرای تخمین خصوصیات فیزیکی آهک آسماری شامل این موارد است:

$$n = 2.265\ Wa + 0.462$$

$$\gamma_{sat} = 0.705\gamma d + 0.802$$

$$Vp_{sat} = 0.88Vp_{dry} + 750.8$$

۷. بررسی میکروسکوپی و ماکروسکوپی سنگ برای ارزیابی عوامل زمین‌شناسی تخمینی قابل قبولی از وضعیت فیزیکی، مکانیکی سنگ‌آهک بررسی شده ارائه می‌دهد و از صرف هزینه‌های زیاد برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز جلوگیری می‌کند.

## تشکر و قدردانی

از شرکت آب و نیرو، کارفرمای محترم پروژه سد خرسان ۲ و ۱، شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس، مشاور محترم این طرح‌ها، به‌دلیل همکاری‌های مفیدشان، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌گردد.

## منابع

۱. رضایی، فرزانه، *مدلسازی رفتار ژئوتکنیکی سازند آسماری در محدوده تعدادی از سازه‌های هیدرولیکی واقع در جنوب غرب کشور*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه تهران (۱۳۸۸) ۱۳۹.

۲. فهیمی‌فر، احمد، سروش، حامد، *آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، آزمون‌های آزمایشگاهی*، جلد اول، شرکت سهامی و فنی مکانیک خاک وزارت راه و ترابری (۱۳۸۰) ۷۱۹.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

3. Ameen, M. S. and et al, "Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir", Ghawar field, Saudi Arabia), Elsevier,Marine and Petroleum Geology, 26 (2009) 430-444.
4. Al-Jassar, S. H., Hawkins, A. B., "Geotechnical properties of the Carboniferous Limestone of the Bristol area", Proceeding 4th international Congress international Society Rock Mechanics, Montreux, A. A. Balkema, Rotterdam, 1(1979) 3-14.
5. Bell, F. G., "Engineering Properties of Soil and Rock", fourth Edition, Blackwell Science Ltd (2000) 482.
6. Brattli, B., "The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates", Engineering Geology, 33(1992) 31-44.
7. Chang, C., Zoback, M. D., Khaksar, A., "Empirical relations between rock strengthand physical properties in sedimentary rocks", Elsevier, Journal of Petroleum Science and Engineering, 51(2006) 223-237.
8. Deer, W. A., Howie, R. A., Zusmann, J., "An introduction to the rock-forming minerals2nd Ed.", Prentice Hall (1996).
9. Howarth, D. F., Rowlands, J. C., "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties", Rock Mechanics and Rock Engineering, 20 (1987) 57-85.
10. Kahraman, S., "The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks, Elsevier", Ultrasonics, 46 (2007) 341-348.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]

11. Lucas, R. D., and et al, "Analysis of limestone micromechanical properties by optical microscopy, Science Direct, Engineering Geology", 110 (2010) 43-50.

12. Mavko, G., Mukerji, T., Dovorkin, J., "The Rock Physics Handbook", Second Edition:Tools for Seismic Analysis of Porous Media, Second Edition, Cambridge Yasar, University Press, New York, (2009) 525 page.

13. Prikryl, R., "Some microstructural aspects of strength variation in rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 38 (2001) 671-682.

14. Shalabi, F. I., Cording, E. J, Al-Hattamleh, O. H., "Estimation of rock engineering properties using hardness tests, Elsevier", Engineering Geology, 90 (2007) 261-273.

15. Tugrul, A., "The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey", Elsevier, Engineering Geology, 75 (2004) 215-227.

16. Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., "Considerations on strength of intact sedimentary rocks", Elsevier, Engineering Geology, 72 (2004) 261-273.

17. Yasar, E., Erdogan, Y., "Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41(2004) 871-875.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.7.2 ]