# بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های مارنی سازند قرمز بالایی در محل ساختگاه سد صفا

ایمان آقاملایی*، غلامرضا لشکری پور، محمد غفوری؛
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

**تاریخ: دریافت** ۹۱/۳/۲۰ **پذیرش** ۹۲/۲/۲۲

## چکیده

سنگ‌های مارنی از جمله سنگ‌های ضعیف هستند که به‌دلیل قابلیت تورم، شکفتگی زیاد و مقاومت و دوام‌پذیری کم در اجرای سازه‌های مهندسی باعث مشکلاتی می‌شوند. نداشتن شناخت کافی از ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی، علت مشکلات این نوع سنگ‌هاست. در این پژوهش به‌منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مارنی ساختگاه سد صفا، بر روی نمونه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها، آزمایش‌های حدود اتربرگ، وزن مخصوص، تخلخل و درصد رطوبت، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، آزمایش برش مستقیم، آزمایش تورم، آزمایش مقاومت فشاری محصور (سه محوری) و همین‌طور آزمایش‌های پراش اشعه ایکس (XRD) و فلور سانس اشعهٔ ایکس(XRF) صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نوع و مقدار کانی‌های موجود در مارن به‌ویژه کانی‌های رسی و درصد کربنات کلیسیم موجود در آن از عوامل مؤثر و تأثیرگذار بر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی این نوع سنگ‌هاست.

**واژه‌های کلیدی:** سد صفا، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی، مارن، کانی‌های رسی.

* نویسنده مسئول imaneng189@gmail.com

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

## مقدمه

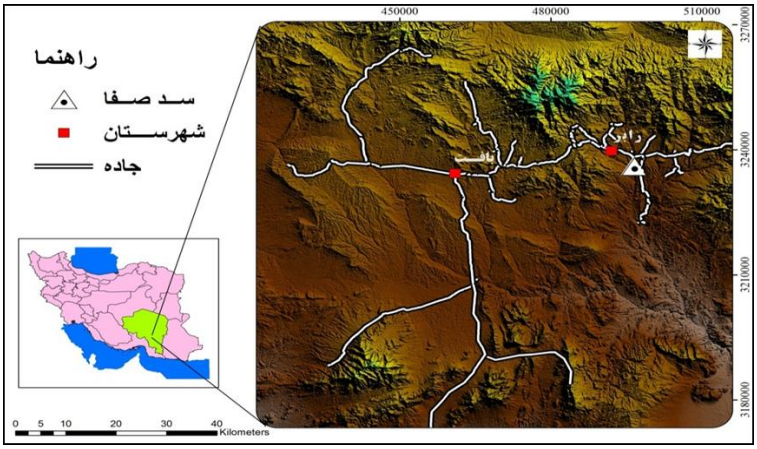
مارن‌ها (سنگ یا خاک) از نهشته‌های رسوبی هستند که به‌طورکلی از کانی‌های رسی و کربنات کلسیم با نسبت‌های مختلف (معمولاً بین ٪۶۵-۳۵) تشکیل شده‌اند [۱]. سنگ‌های مارنی به‌دلیل قابلیت تورم و شکفتگی، مقاومت و دوام‌پذیری کم در اجرای سازه‌های خطی مانند تونل‌بری و ترانشه‌زنی، سازه‌های متمرکز مانند احداث سد و نیز در حین حفاری برای اکتشاف منابع هیدروکربوری و آب مشکلاتی ایجاد می‌کنند [۲]. ایجاد این مشکلات به‌دلیل عدم شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آن‌هاست [۳]. از دیدگاه کانی‌شناسی، تفاوت در میزان کربنات، درصد کانی‌های رسی، نسبت کربنات به کانی‌های رسی و نیز نوع کانی‌های رسی می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، خواص خمیری، قابلیت تورم، مقاومت، دوام و شکفتگی را در این سنگ‌ها تحت تأثیر قرار دهد [٤]. وجود کانی‌های رسی با ساختمان شیمیایی متفاوت در ترکیب مارن‌ها استعداد آن‌ها را برای هوازدگی افزایش می‌دهد. در این ارتباط رس‌های سدیم‌دار اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا آسان‌تر از رس‌های پتاسیم، منیزیم و باریم‌دار در معرض شکفتگی قرار می‌گیرند [۵]. ویژگی‌های فیزیکی مارن‌ها مانند تخلخل و میزان رطوبت به‌طور مشخص با خصوصیات خمیری، تورم، دوام و مقاومت ارتباط دارد. در سازندهای مارنی افزایش رطوبت با تغییر مکان جانبی شدیدی همراه است که میزان آن به نوع و درصد کانی‌های رسی موجود در مارن‌ها وابسته است. با توجه به گسترش و پراکنش مارن‌ها در سطح ایران و جهان و پتانسیل آن‌ها در هوازدگی و تولید خاک (خاک‌های مارنی) و نیز گسترش روزافزون احداث ابنیهٔ فنی بر روی یا درون زمین‌هایی که از خاک‌های مارنی تشکیل شده‌اند، شناسایی بهتر و بیش‌تر خصوصیات و رفتار مهندسی این خاک‌ها و بررسی روش‌های تعیین متغیرهای مهندسی آن‌ها اهمیت زیادی دارند. تا کنون حجم گسترده‌ای از تحقیقات برای شناسایی خصوصیات مارن‌ها در نقاط مختلفی از دنیا صورت گرفته که محوریت اصلی این *پژوهش‌ها بررسی* برخی از ویژگی‌های شاخص از قبیل تثبیت خاک‌های مارنی با آهک (نقش کانی‌های رسی در تثبیت مارن)، اندازه‌گیری نسبت محتوای رس به کربنات در مارن‌ها (تأثیر تخلخل روی مقاومت برشی مارن‌ها) و غیره بوده است [٦]، [۷]، [۸].

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

## موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

محدودهٔ بررسی شده در استان کرمان و حدود ۳۰ کیلومتری شمال خاور شهر بافت قرار دارد. مختصات جغرافیایی ساخت‌گاه بررسی شده به طول خاوری ´۵۸ و°۵٦ و عرض شمالی ´۱۵ و °۲۹ است. دست‌یابی به ساخت‌گاه از طریق حدود ۱۸۷ کیلومتر جادهٔ آسفالته کرمان- رابر، طی مسافتی حدود ۷ کیلومتر در مسیر رابر- ساردوییه و پس از طی مسیری در حدود ۲ کیلومتر در طول جادهٔ روستای ابراهیم آباد، امکان‌پذیر است (شکل ۱).




**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی**

## زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

محدودهٔ بررسی شده بر اساس تقسیمات زمین‌شناسی ساختمانی ایران در زون ساختاری ایران مرکزی و بر اساس تقسیمات ناحیه‌ای، در کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر قرار گرفته است. کارشناسان سازمان زمین‌شناسی کشور کمربند مذکور در منطقهٔ کرمان را به زیر کمربندهای دهج- ساردوییه، بلوک میانی جبال بارز و ناحیه اسفندقه- سبزواران (جیرفت) تقسیم کرده‌اند. با توجه به موقعیت قرارگیری ناحیهٔ بررسی شده در کمربند ارومیه دختر و آمیزه‌های رنگین, سنگ چینه‌شناسی منطقه بسیار متنوع و از کرتاسه تا عهد حاضر وجود دارد. البته در محدودهٔ سد سنگ‌های مربوط به دورهٔ میوسن به بعد قابل مشاهده است که غالباً شامل

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

سنگ‌های آذر آواری، آذرین و رسوبی هستند. سنگ‌های رسوبی مربوط به دورهٔ میوسن که قسمت وسیعی از محدودهٔ طرح را شامل شده به نام سازند قرمز بالایی شناخته می‌شوند. مجموعه لایه‌های سنگی این سازند در محدودهٔ ساخت‌گاه سد عمدتاً متشکل از تناوب مارن و گل سنگ به‌رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز و ماسه سنگ خاکستری رنگ ریزدانه به‌صورت ممتد است که بین لایه‌های مارن سیلتی و سیلت و به‌صورت بین انگشتی[۱] همراه است. رسوبات کواترنری در منطقه متعلق به محیط رسوبی خشکی هستند و از نوع رسوبات مخروط افکنده‌ای و دشت سیلابی است که تحت تأثیر دو فرایند رسوب‌گذاری با جریان‌های رودخانه‌ای و جریان‌های خرده‌دار رسوب کرده‌اند و ناحیهٔ نسبتاً وسیعی از گستره بررسی شده را می‌پوشانند (شکل ۲) [۹].

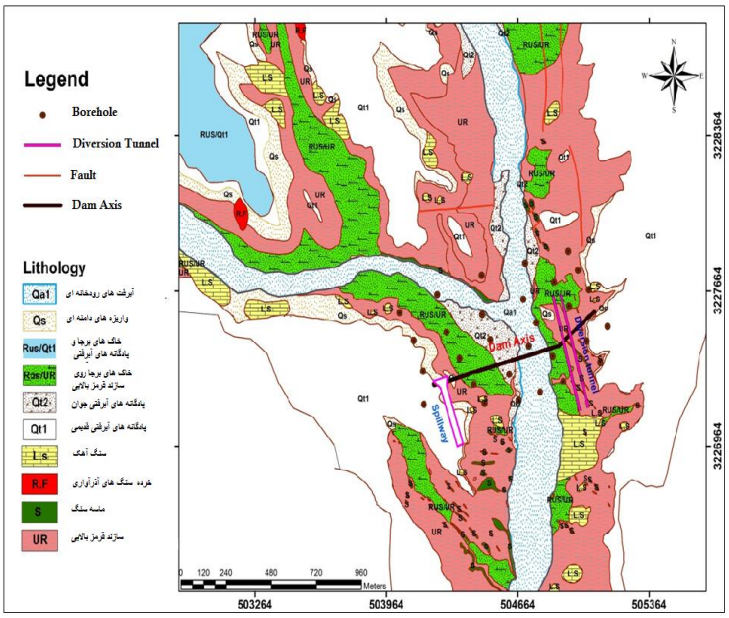
## مواد و روش

برای بررسی سنگ‌های مارنی، تعداد ۵۰ نمونه از محل حفر گمانه‌ها (تکیه‌گاه چپ، بستر و تکیه‌گاه راست) در متراژهای متفاوت انتخاب شد. ابتدا روی نمونه‌های اخذ شده پژوهش‌های سنگ‌شناسی انجام شد. در ادامه به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ‌های ساخت‌گاه سد، برروی نمونه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها، تعدادی آزمایش آزمایشگاهی مطابق با روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۱) و استاندارد آمریکایی (ASTM) [۱۰] انجام شد. که شامل آزمایش‌های حدود اتربرگ، وزن مخصوص، تخلخل و درصد رطوبت، آزمایش دوام‌پذیری، آزمایش تورم، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، آزمایش برش مستقیم و آزمایش مقاومت فشاری محصور (سه‌محوری) است. نرم بودن جنس سنگ و پایین بودن شاخص کیفی این نوع از سنگ‌ها، مشکلات زیادی در نمونه‌گیری و انتخاب نمونه از مغزه‌های به‌دست آمده از حفاری‌ها ایجاد کرد. در انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی نیز مشکل عمده، ناتوانی در اشباع نمونه‌های مارنی است، به‌طوری‌که اشباع این نمونه‌ها به‌روش استغراق به‌دلیل وارفتگی امکان‌پذیر نشد و گرفتن نمونه با قطر مناسب برای اشباع در سلول سه محوری نیز با مشکلات زیادی همراه بود.

۱. Interfinger

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]




**شکل۲. نقشهٔ زمین‌شناسی محل سد**

## پژوهش‌های آزمایشگاهی

### ترکیب شیمیایی

به‌منظور پی‌بردن به نقش ترکیب شیمیایی مارن‌ها، در رفتار مهندسی آن‌ها چهار نمونهٔ $A_{18}$,$A_{16}$,$A_{13}$,$A_{10}$ با دستگاه فلورسانس اشعه ایکس(XRF) مدل PW2558.00 آزمایش شدند که نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ آمده است. مقدار CaO در نمونه‌های مذکور از ۲۵/۷ تا ۲۹/۶ درصد تغییر نشان می‌دهد. هم‌چنین سه نمونهٔ $A_{18}$,$A_{16}$,$A_{10}$ با دستگاه پراش اشعهٔ ایکس (XRD) آزمایش شد. برای تعیین کانی‌های رسی موجود در سنگ‌های مارنی، از هر نمونهٔ سنگ پودر شده سه نمونه با شرایط خشک شده در دمای طبیعی، خشک شده در کوره و عمل‌آوری شده با اتیلن گلایکول تحت تابش اشعه قرار گرفت (شکل ۳). برای تشخیص بین کانی‌های گروه اسمکتایت و ورمیکولیت نمونه خاک رسی را دراتیلن گلایکول حل می‌کنند و سپس تحت تابش اشعه ایکس قرار می‌دهند. کانی‌های گروه اسمکتایت در اثر جذب

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

مولکول‌های گلایکول بین دو لایهٔ مجاور خود، فاصلهٔ بین لایه‌هایشان به مقدار ۱/۷۷ نانومتر افزایش پیدا می‌کند در حالی‌که فاصلهٔ بین لایه‌ای کانی‌های گروه ورمیکولیت در اثر حل شدن در اتیلن گلایکول تغییری پیدا نمی‌کند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ترکیب غالب نمونه‌های مارنی بررسی شده را کانی‌های کوارتز، کلسیت، ایلیت و کائولینیت تشکیل می‌دهند. با توجه به شکل ۳ فاصلهٔ بین صفحه‌ای مربوط به پیک‌های ۱۰/۵۵ و ٤/۹۹ و ۳/۷۳۳ آنگستروم مربوط به کانی رسی ایلیت و پیک‌های ۷/۱۲۵ و ۳/۵۷٦ مربوط به کانی رسی کائولینیت است. هم‌چنین فاصلهٔ بین صفحه‌ای مربوط به پیک‌های ٤/۲٦ و ۳/۰۳ آنگستروم، مربوط به کانی‌های غیررسی کوارتز و کربنات کلسیم است.

**جدول ۱. نتایج تجزیهٔ کمی نمونه‌های مارنی به‌روش XRF**

| | $A_{10}$ | $A_{13}$ | $A_{18}$ | $A_{16}$ |
|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ % | ۴۰/۶۰۵ | ۳۸/۱۵۹ | ۴۳/۰۸۰ | ۳۹/۴۶۴ |
| $AL_2O_3$ % | ۱۰/۳۷۹ | ۱۰/۷۴۹ | ۸/۰۶۷ | ۱۲/۲۶۷ |
| $Fe_2O_3$ % | ۸/۸۱۲ | ۶/۰۲۷ | ۹/۱۰۹ | ۸/۲۲۵ |
| CaO % | ۲۹/۶۰۷ | ۲۷/۵۲۰ | ۲۶/۹۵۰ | ۲۵/۷۴۸ |
| MgO % | ۲/۹۸۰ | ۲/۲۷۸ | ۲/۶۱۸ | ۲/۷۷۲ |
| $Na_2O$ % | ۲/۱۶۷ | ۱/۵۵۸ | ۲/۵۳۸ | ۲/۱۲۸ |
| $K_2O$ % | ۱/۸۹۰ | ۱/۳۵۳ | ۲/۲۱۸ | ۱/۸۵۶ |
| CL % | ۰/۰۲۸ | ۰/۰۲۶ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۲۸ |

برای تعیین درصد کربنات کلسیم از آزمون کلسی‌متری استفاده شد. در آزمون کلسی‌متری ابتدا مقدار مشخصی از نمونه سنگ کاملاً پودر شده و در درون ظرفی سر بسته قرار داده می‌شود و سپس با اضافه کردن اسید کلریدریک به آن، میزان گاز متصاعد شده اندازه‌گیری و بر اساس رابطهٔ (۱) میزان کربنات کلسیم نمونه محاسبه می‌شود.

$$CaCo3 = V / (2.24 \times A) \qquad (۱)$$

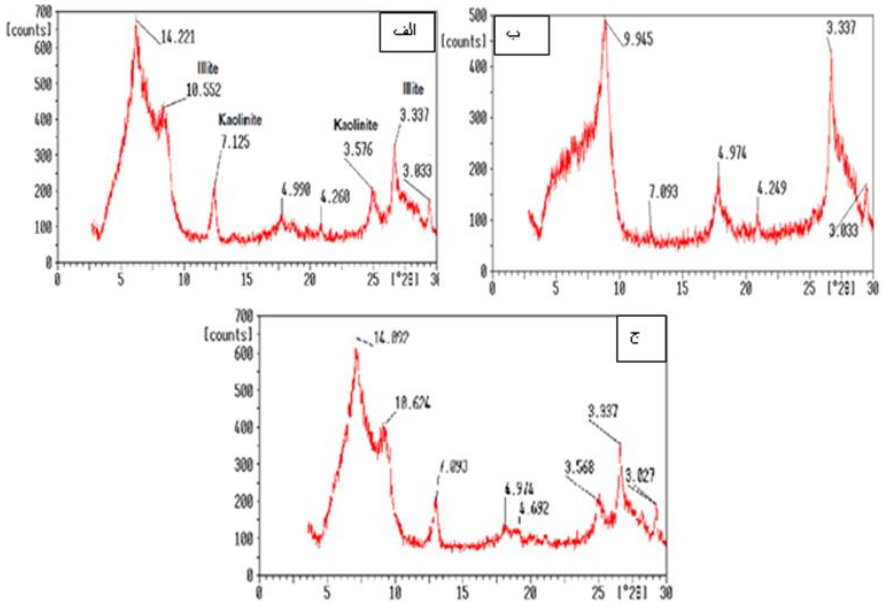
که در آن $V$ برابر با حجم گاز متصاعد شده برحسب مترمکعب و $A$ معادل وزن نمونه پودر خشک انتخابی است. این آزمایش بر روی ۲۰ نمونه (مارن، گل سنگ) انجام گردید که نتایج آزمایش مربوط به نمونه‌های مارنی در جدول ۲ آورده شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

**جدول۲. نتایج آزمایش تعیین درصد کربنات کلسیم**

| شماره نمونه | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_6$ | $A_7$ | $A_{10}$ | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_{13}$ | $A_{16}$ | $A_{18}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $CaCo_3$% | ٦٢/٨٦ | ٤٢/١٤ | ٥١/٥٥ | ٥٤/٠٥ | ٥٧/٨٦ | ٣٨/٩٨ | ٤٦/٨٦ | ٥٦/٥٥ | ٣٦/٥٢ | ٣٥/٥٦ | ٣٥/٢٣ |




**شکل ۳. طیف انکسار اشعهٔ X در نمونهٔ $A_{18}$ را در سه حالت الف) نمونهٔ خشک شده در دمای طبیعی، ب) نمونهٔ حرارت داده شده ج) نمونهٔ عمل‌آوری شده با اتیلن گلایکول نشان می‌دهد،**

چنان‌که ذکر شد کانی‌های رسی موجود در سنگ‌های مارنی ساخت‌گاه سد از نوع ایلیت و کائولینیت هستند.

کریستال کائولینیت از لایه‌های تکراری نوع ۱:۱ تشکیل شده است که هر لایه دارای صفحات سیلیکا و آلومینا است که با پیوند هیدروژنی به‌هم وصل شده‌اند. به‌علت این پیوند قوی، آب نمی‌تواند به فضای داخل آن‌ها وارد شود که این امر باعث کاهش نفوذپذیری و کاهش خواص خمیری خاک می‌شود. هم‌چنین ایلیت از تکرار صفحات آلومینا و دو صفحه سیلیکا به‌وجود آمده است که در بین آن‌ها یون پتاسیم قرار گرفته است. تبدیل مارن از حالت غیرهوازده به‌حالت هوازده باعث افزایش مقدار ایلیت و کاهش کائولینیت می‌شود. افزایش ایلیت و کاهش کائولینیت باعث می‌شود که خواص خمیری افزایش یابد. با در دست داشتن اطلاعات کافی از

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

کانی‌های تشکیل دهنده و هم‌چنین مشخصات شیمیایی سنگ‌های بررسی شده، می‌توان خصوصیات فیزیکی و مکانیکی را ارزیابی کرد.

## خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

### درصد رطوبت

تعدادی از نمونه‌ها برای تعیین وزن مخصوص خشک، رطوبت طبیعی و اشباع بر اساس استاندارد ISRM (۱۹۸۱) آزمایش شد. آزمایش تعیین درصد رطوبت بر روی ۲۶ نمونه مارن انجام شد که درصد رطوبت نمونه‌ها در حالت طبیعی به‌طور متوسط ۵/۷ برآورد شد (جدول ۳).

**جدول ۳. نتایج آزمایش درصد رطوبت**

| جنس نمونه | وضعیت نمونه | تعداد آزمایش | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات٪ | محدودهٔ میانگین با سطح اطمینان ۹۵ درصد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مارن | طبیعی | ۲۶ | ۳/۲ | ۸/۶ | ۵/۷ | ۱/۴۳ | ۲۵ | ۵/۷ ± ۰/۶ |
| مارن سیلتی | طبیعی | ۲۴ | ۲/۶ | ۶/۱ | ۴/۱ | ۰/۸۸ | ۲۱ | ۴/۱ ± ۰/۴ |
| | اشباع | ۱۴ | ۲/۷ | ۷/۰ | ۵/۰ | ۱/۳۰ | ۲۶ | |

### وزن مخصوص

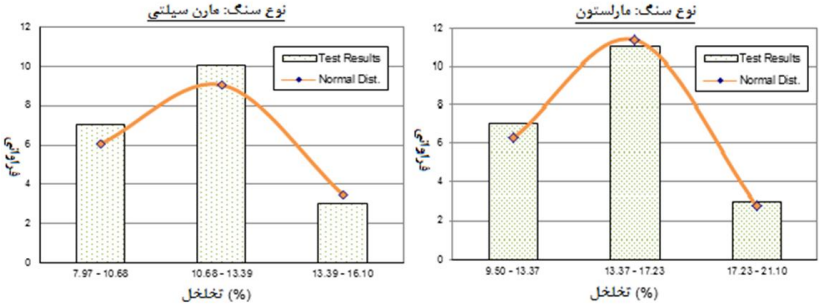
به‌منظور تعیین دانسیته روی ۲۱ نمونه در حالت طبیعی و ۲۲ نمونه در حالت خشک این آزمایش انجام شد. نتایج آزمایش‌های تعیین دانسیته برای مارن‌ها حاکی از تراکم نسبتاً زیاد سنگ در محل است. این پارامتر به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر سایر مشخصات فیزیکی سنگ تأثیرگذار است. نتایج آزمایش تعیین دانسیته خشک و اشباع به‌همراه نتایج بررسی آماری آن‌ها در جدول ٤ و نمودار آن‌ها در شکل ٤ آمده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

**جدول٤. نتایج آزمایش تعیین دانسیته ($gr/cm^3$)**

| جنس نمونه | وضعیت نمونه | تعداد آزمایش | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات٪ | محدودهٔ میانگین با سطح اطمینان ۹۵ درصد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مارن | طبیعی | ۲۱ | ۲/٤۳ | ۲/۵۱ | ۲/٤۷ | ۰/۰۲ | ۰/۸۳ | ۲/٤۷ ± ۰/۰۱ |
| | خشک | ۲۲ | ۲/۲۰ | ۲/٤۲ | ۲/۳٤ | ۰/۰۵ | ۲/۱۸ | ۲/۳٤ ± ۰/۰۲ |
| مارن سیلتی | طبیعی | ۲٤ | ۲/۲۸ | ۲/۵۵ | ۲/٤۳ | ۰/۰۹ | ۳/۵٦ | ۲/٤۳ ± ۰/۰٤ |
| | خشک | ۲٤ | ۲/۱٦ | ۲/٤۸ | ۲/۳۳ | ۰/۱۰ | ٤/۱۱ | ۲/۳۳ ± ۰/۰٤ |
| | اشباع | ۱٤ | ۲/٤۱ | ۲/۵۳ | ۲/٤۷ | ۰/۰۳ | ۱/۳۱ | ۲/٤۷ ± ۰/۰۲ |




**شکل٤. نمودارهای نتایج آزمایش دانسیتهٔ خشک و اشباع و انطباق آن با منحنی توزیع نرمال**

## تخلخل

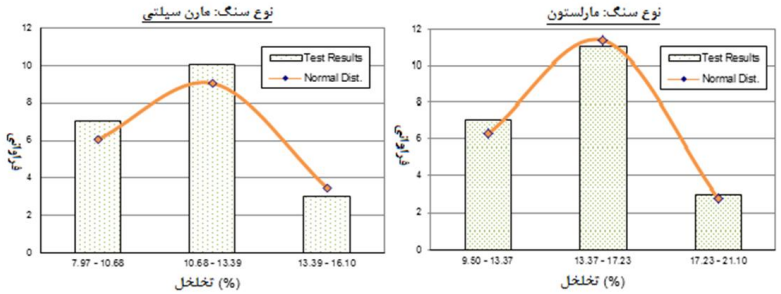
به‌منظور تعیین درصد تخلخل (n)، ۲۱ نمونه مارن و ۲۰ نمونه مارن سیلتی آزمایش شدند. جدول ۵ بررسی آماری نتایج آزمایش‌ها و شکل ۵ نمودار آن‌ها را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش تعیین تخلخل نمونه‌ها می‌تواند دانسیته‌های زیاد به‌دست آمده را نیز توجیه کند. میانگین تخلخل ۱٤/۵ درصد برای سنگ‌های مارنی در محدوده‌های پایین ارائه شده برای این سنگ قرار می‌گیرد.

**جدول ۵. آزمایش تعیین درصد تخلخل**

| جنس نمونه | تعداد آزمایش | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات٪ | محدوده میانگین با سطح اطمینان ۹۵ درصد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مارن | ۲۱ | ۹/۵ | ۱۹/۱ | ۱٤/۵ | ۲/۷۳ | ۱۸/۸ | ۱٤/۵ ± ۱/۲ |
| مارن سیلتی | ۲۰ | ۸/۰ | ۱٦/۱ | ۱۱/۵ | ۲/۳۲ | ۲۰/۲ | ۱۱/۵ ± ۱/۰ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]




**شکل ۵. نمودار نتایج آزمایش تخلخل و انطباق آن با منحنی توزیع نرمال**

## حدود اتربرگ

درصد رس و نوع کانی‌های رسی موجود در سنگ‌های مارنی نقش مهمی در رفتار زمین‌شناسی مهندسی آن‌ها ایفا می‌کند [۱۱]. برای مثال با افزایش درصد رس و یا با افزایش کانی مونت موریونیت شاخص خمیری خاک افزایش پیدا می‌کند. برای تعیین بافت و خصوصیات خمیری مصالح تشکیل دهندهٔ سنگ‌های ریزدانه، روی ۲۳ نمونه مارنی و ۱٤ نمونه مارن سیلتی، آزمایش حدود اتربرگ با استفاده از استاندارد ASTM D4318-84 انجام و ردهٔ آن در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید تعیین شد (جدول ٦). بر اساس طبقه‌بندی سیستم یونیفاید (USCS)، مارن‌ها و مارن‌های سیلتی عمدتاً در ردهٔ CL و CL/ML قرار می‌گیرند. شکل ٦ نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ را نشان می‌دهد.

**جدول٦. نتایج آزمایش حدود اتربرگ و درصد رس**

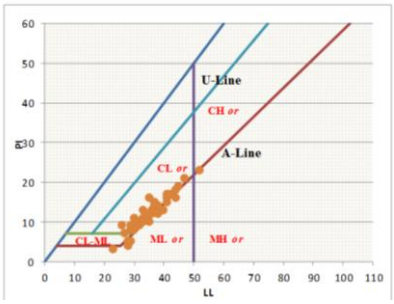
| جنس نمونه | تعداد | LL(%) | | | | PI(%) | | | | Clay percent<2μm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار |
| مارن | ۲۳ | ۲۹ | ٤٤ | ۳٦ | ٤/۲ | ۹ | ۱۷ | ۱۳ | ۲/٦ | ۱۰ | ۳۱ | ۲۰ | ٦/٦ |
| مارن سیلتی | ۱٤ | ۲٦ | ٤۱ | ۳۳ | ٤/٤ | ٥ | ۱۷ | ۱۰ | ۳/٥ | ٥ | ۲٥ | ۱٥ | ٦/٥ |

## دوام و شکفتگی

دوام به قدرت مقاومت مواد در برابر عوامل مخرب فیزیکی و شیمیایی اطلاق می‌شود. عوامل کنترل‌کنندهٔ دوام یک نمونه تابع کانی غالب، شکستگی‌های ریز، تجزیه و هوازدگی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

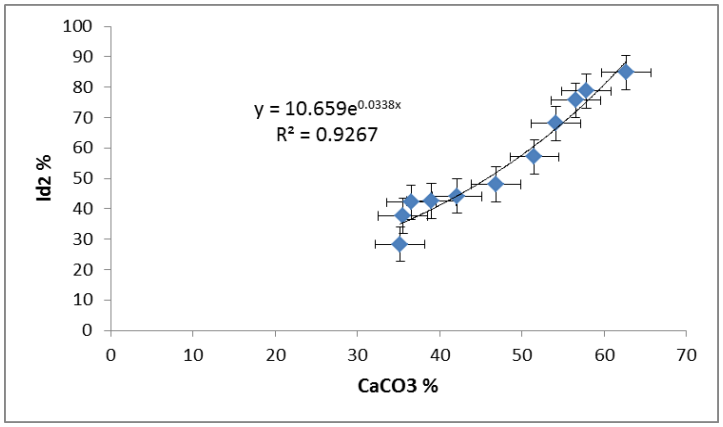
سنگ است که در این پژوهش دوام‌پذیری با افزایش درصد کربنات کلسیم افزایش پیدا می‌کند که در شکل ۷ نشان داده شده است. آزمایش دوام و شکفتگی، طبق روش پیشنهادی (۱۹۸۱) ISRM برای ارزیابی سنگ‌های ضعیف و حاوی رس بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است [۱۲]. طبق طبقه‌بندی دوام شکفتگی گمبل مارن‌های آزمایش شده در ردهٔ مارن‌های با دوام متوسط تا دوام خیلی کم قرار می‌گیرند (جدول ۷).




**شکل٦. نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های مارن و مارن سیلتی**

**جدول۷. نتایج آزمایش دوام‌پذیری**

| شماره نمونه | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_6$ | $A_7$ | $A_{10}$ | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_{13}$ | $A_{16}$ | $A_{18}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Id_2$ % | ۸٤/۸٤ | ٤٤/۱٤ | ٥۷/۱۰ | ٦۸/۰۳ | ۷۸/۷٥ | ٤۲/٥٦ | ٤۸/۰٦ | ۷٥/٦٦ | ٤۲/۱۲ | ۳۷/٦٥ | **۲۸/۳٦** |
| ردەبندی بر | دوام | دوام | دوام | دوام | دوام | دوام | دوام | دوام | دوام | دوام | **دوام** |
| اساس گمبل | متوسط | **اندک** | **اندک** | متوسط | متوسط | **اندک** | **اندک** | متوسط | **اندک** | **اندک** | **خیلی اندک** |




**شکل۷. رابطهٔ بین دوام و کربنات کلسیم نمونه مارنی**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

**تورم‌پذیری**

تورم فرایندی است که در آن، به‌دلیل تغییر در میزان رطوبت کانی‌های رسی، حجم آن‌ها نیز تغییر می‌یابد. بنا به تعریف، تورم عبارت است از واکنش فیزیکوشیمیایی خاک (سنگ) و محیط و مقدار آن بستگی به‌شدت نیروهای جاذبه و دافعهٔ فیزیکی و شیمیایی دارد. تورم پدیده‌ای است برگشت‌پذیر، یعنی خاک (سنگ) بعد از کم شدن رطوبت منقبض می‌شود [۱۳]. برای بررسی پتانسیل تورم نمونه‌های مارنی، روی نمونه‌های $A_{18},A_{16},A_{10},A_1$ آزمایش فشار تورم انجام شد. در آزمون فشار تورمی، نمونه در حلقهٔ تحکیم قرار داده شده و سپس با آب مقطر اشباع شده است. نمونه با دریافت آب متورم می‌شود و با بارگذاری روی آن جلوی تورم نمونه گرفته می‌شود. حداکثر بار لازم برای جلوگیری از نیروی تورم، به‌عنوان فشار تورم ($p_s$) در نظر گرفته می‌شود. نتایج آزمایش فشار تورمی انجام شده در جدول ۸ نشان داده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که توده سنگ‌های مارنی ساخت‌گاه سد دارای پتانسیل تورم کم هستند که از موارد مؤثر در این رابطه می‌توان به نوع کانی‌های رسی(کائولینیت، ایلیت) و میزان کربنات کلسیم اشاره کرد. فشار تورمی سنگ‌های مارنی برای مقاصد طراحی در محل ساخت‌گاه سد را می‌توان ۰/۱۵ مگاپاسکال پیشنهاد کرد.

**جدول۸ . نتایج آزمایش تورم**

| شمارهٔ نمونه | فشار تورم (MPa) |
|---|---|
| **$A_1$** | ۰/۰۵ |
| **$A_{10}$** | ۰/۱۱ |
| **$A_{16}$** | ۰/۱۵ |
| **$A_{18}$** | ۰/۲ |

**آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)**

آزمون تراکم تک‌محوری رایج‌ترین روش تعیین مقاومت فشاری سنگ بکر است که با وجود ظاهر ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. مقاومت فشاری سنگ در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ سنگ اهمیت زیادی دارد. اما با توجه به این‌که انجام آزمایش روی سنگ‌های مارنی در حالت اشباع با مشکلات فراوانی همراه است، برای برآورد این پارامتر می‌توان از این موارد کمک گرفت:

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

۱. بر اساس پژوهش‌های انجام شدهٔ چیو[۱]، جان استون[۲] در مورد مقاومت تک‌محوری گل سنگ‌ها برای درصد رطوبت طبیعی بین ۳ تا ۹ درصد، مقاومت تک‌محوری ۱ تا ۱۰ مگاپاسکال است [۱٤].

۲. کلین[۳] در تحقیقی که در مؤسسهٔ Jacobs برای طبقه‌بندی سنگ‌های ضعیف انجام داد، مقاومت فشاری سنگ‌های رسوبی ضعیف بر اساس تخلخل آن‌ها در موارد مختلف، را بررسی کرده است.

این آزمایش روی ۱۲ نمونه مارنی انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها در حالت رطوبت طبیعی در جدول ۹ ذکر شده است. حداکثر مقاومت حاصل برای نمونه‌های مارنی ۵/۵ مگا پاسکال بر آورد شد.

جدول۹. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری (MPa)

| جنس نمونه | وضعیت نمونه | تعداد آزمایش | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات٪ | محدودهٔ میانگین با سطح اطمینان ۹۵ درصد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مارن | طبیعی | ۱۲ | ۰/۸ | ۵/۵ | ۲/٤ | ۱/٦ | ٦۸ | ۲/٤ ± ۰/۹ |
| مارن | طبیعی | ۷ | ٦/۳ | ۹/۹ | ۸/۲ | ۱/٦ | ۱۹ | ۸/۲ ± ۱/۲ |
| سیلتی | اشباع | ۳ | ٤/۵ | ۵/۸ | ۵/۰ | ۰/۷ | ۱٤ | ۵/۰ ± ۰/۸ |

**آزمایش مقاومت فشاری محصور**

به‌منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی سنگ و ثابت‌های مورد نیاز برای معیار شکست هوک و براون، روی ۵ نمونه آزمایش سه‌محوری انجام شد. فشارهای جانبی با توجه به جنس نمونه و عمق و موقعیت آن‌ها تعیین شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱۰ و پوش گسیختگی مربوط به سنگ‌های مارنی و مارن سیلتی در شکل ۸ آمده است.

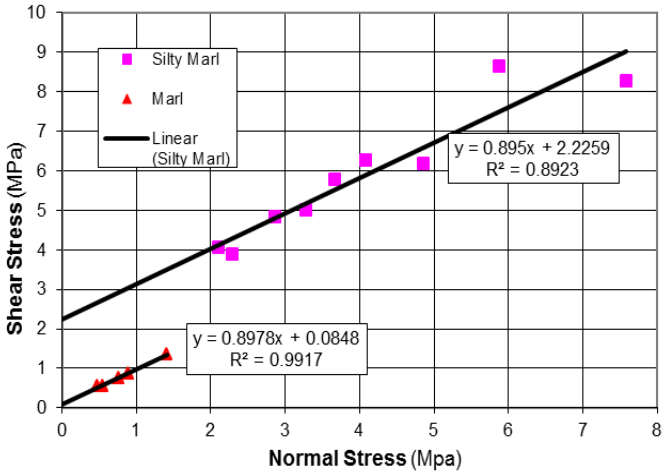
**جدول ۱۰. نتایج حاصل از آزمایش سه محوری [۱۵]**

| جنس نمونه | وضعیت نمونه | تعداد | C(MPa) | Φ |
|---|---|---|---|---|
| مارن | طبیعی | ۵ | ۰/۰۸ | ٤۲ |
| مارن سیلتی | اشباع | ۹ | ۲/٤ | ٤۱ |

۱. Chiu ۲. Johnston ۳. Klein

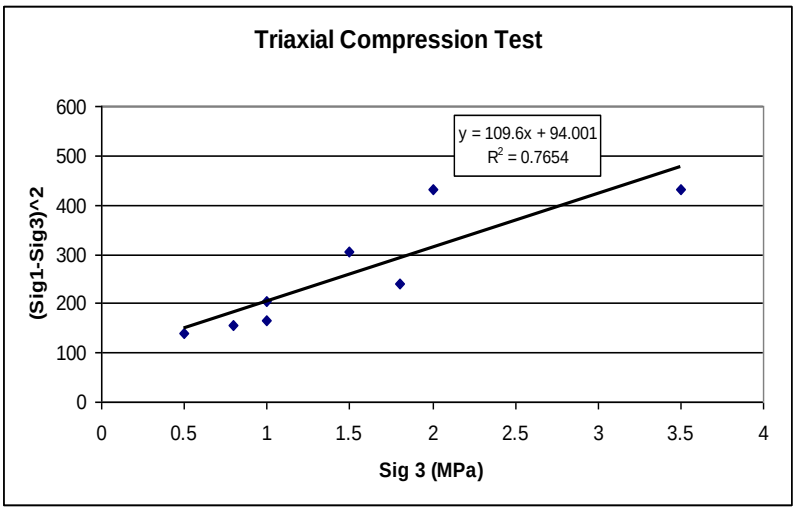
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]




**شکل۸. نمایش پوش گسیختگی برای نمونه‌های مارنی و مارن سیلتی**

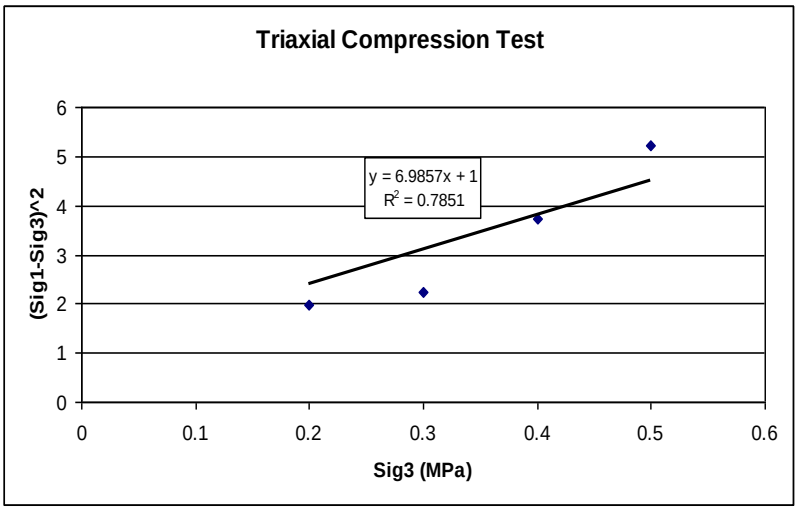
نتایج به‌دست آمده در آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده روی نمونه‌های گرفته شده از هر آزمایش در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. در این شکل‌ها برای برآورد ثابت‌های معیار شکست هوک- براون نمودار $(\sigma_1-\sigma_3)^2$ بر حسب $(\sigma_3)$ ترسیم شده است.




**شکل ۹. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری برای مارن**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]




**شکل ۱۰. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری برای مارن سیلتی**

با توجه به شیب و عرض از مبدأ خطوط به رازش شده در نمودارهای مذکور این نتایج به‌دست آمده است:

مارن:

مقاومت تک‌محـوری ۱ مگاپاسکال

ثابـــت mi ۷

مارن‌های سیلتی:

مقاومت تک‌محـوری ۹/۷ مگاپاسکال

ثابـــت mi ۹

این در حالی است که مقادیر ارائه شده به‌وسیلهٔ هوک برای توده سنگ‌های مذکور بدین شرح است [۱۶]:

مـــارن ۷± ۲

مارن سیلتی ۷± ۲

در نتیجه به‌نظر می‌رسد که در مورد مارن‌ها مقادیر به‌دست آمده با مقادیر پیشنهادی هوک (۲۰۰۲) مشابه است. تنها در مورد مارن‌های سیلتی و مقدار به‌دست آمده با مقادیر پیشنهادی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

متفاوت است. این در حالی است که مقاومت تک‌محوری محاسبه شده برای این سنگ از مقادیر به‌دست آمده در آزمایش‌های تک محوری نیز بیش‌تر است.

لازم به توضیح است که آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده برای مارن‌ها در سلول خاک و آزمایش‌های سه‌محوری سایر مارن‌های سیلتی در سلول سنگ انجام شده است. با توجه به طول زیاد لازم برای آزمایش‌های سه‌محوری نمونه‌هایی که برای این آزمایش انتخاب شده‌اند از نظر مقاومتی دارای شرایط بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. لذا مطابق پیشنهاد ارائه شده برای سیلتستون ثابت mi برای مارن‌های سیلتی معادل ۷ در نظر گرفته شده است. بدیهی است اختلاف مقاومتی این دو سنگ در تفاوت موجود بین مقاومت‌های تک محوری به‌دست آمده لحاظ می‌شود. مقادیر نهایی اتخاذ شده برای ثابت mi برای مارن‌ها و مارن‌های سیلتی عدد ۷ است.

## آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلین)

به‌منظور تعیین مقاومت کششی سنگ‌ها، بر روی ۱۲ نمونه مارنی و ۱۰ نمونه مارن سیلتی، آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلین) انجام شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۱۱ آمده است.

**جدول ۱۱. نتایج کشش غیرمستقیم، برزیلین(MPa)**

| جنس نمونه | وضعیت رطوبت | تعداد آزمایش | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات٪ | محدودهٔ میانگین با سطح اطمینان ۹۵ درصد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مارن | طبیعی | ۱۱ | ۰/۱۲ | ۰/٦٦ | ۰/٤۰ | ۰/۲۰ | ٤۹ | ۰/٤۰ ± ۰/۱۲ |
| | اشباع | ۱ | ۰/۱۱ | ۰/۱۱ | ۰/۱۱ | -- | -- | -- |
| مارن سیلتی | طبیعی | ۳ | ۰/۷۱ | ۰/۹۷ | ۰/۸۸ | ۰/۱۵ | ۱۷ | ۰/۸۸ ± ۰/۱۷ |
| | اشباع | ۷ | ۰/۷۳ | ۰/۹۳ | ۰/۸۲ | ۰/۰۷ | ۹ | ۰/۸۲ ± ۰/۰۵ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

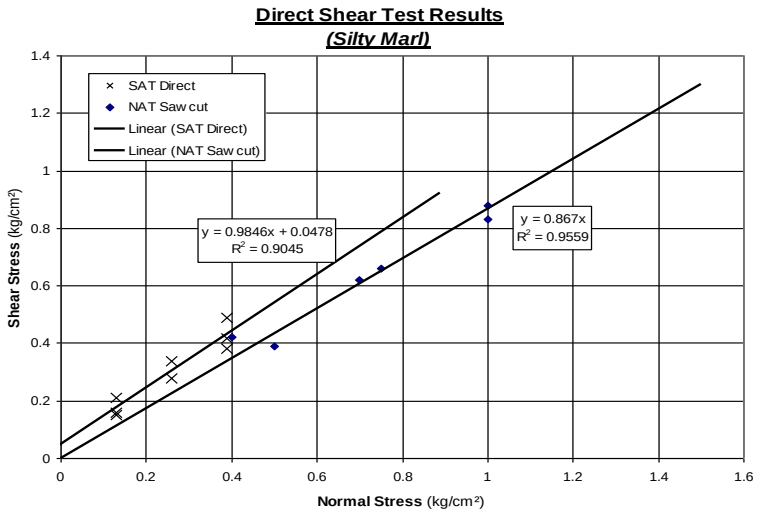
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

### آزمایش برش

برای تعیین مقاومت برشی نمونه‌ها، بر روی ۲ نمونه از مارن‌ها آزمایش برش به‌صورت مستقیم روی نمونه سالم[۱] صورت گرفت که نتایج آزمایش‌ها در جدول ۱۲ و شکل ۱۱ ارائه شده است.

**جدول۱۲. نتایج آزمایش برش**

| جنس نمونه | وضعیت رطوبت | برش مستقیم | | | برش (Saw-Cut) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | تعداد | φ | C (Mpa) | تعداد | φ | C (Mpa) |
| مارن | طبیعی | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| | اشباع* | ۲ | ٤٤/٦ | ۰/۰۵ | -- | -- | -- |
| مارن سیلتی | طبیعی | -- | -- | -- | ۲ | ٤۰/۹ | ۰ |
| | اشباع* | ۳ | ٥٤ | ۰/۰۹ | -- | -- | ۰ |



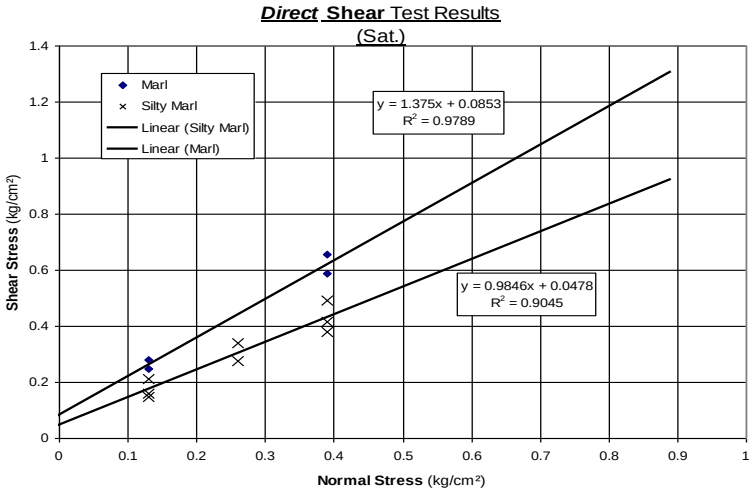

## نتیجه‌گیری

سنگ‌های مارنی ساخت‌گاه سد صفا از نظر سنی مربوط به دورهٔ میوسن است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های XRD ترکیب غالب این مارن‌ها شامل کانی‌های کوارتز، کلسیت، ایلیت وکائولینیت است.

۱. Direct Shear

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]




**شکل ۱۱. نتایج آزمایش برش**

نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی نشان می‌دهد که میانگین دانسیتهٔ نمونه‌ها در حالت طبیعی $۲/٤۷ gr/cm^3$ و در حالت خشک $۲/۳٤ gr/cm^3$ است. میانگین درصد رطوبت و در صد تخلخل نمونه‌ها در حالت عادی به‌ترتیب۵/۷ و ۱٤/۵ درصد اندازه‌گیری گردید.

بر اساس طبقه‌بندی سیستم یونیفاید (USCS)، مارن‌ها و مارن‌های سیلتی عمدتاً در رده CL و CL/ML قرار می‌گیرند با توجه به طبقه‌بندی گمبل ملاحظه می‌گردد که سنگ‌های مارنی بررسی شده از نوع سنگ‌های با دوام متوسط محسوب می‌شوند.

تودهٔ سنگ‌های مارنی بررسی شده دارای پتانسیل تورم کم هستند و فشار تورمی آن‌ها را می‌توان ۰/۱۵ مگاپاسکال در نظر گرفت.

بر مبنای آزمایش تراکم تک‌محوری مقاومت متوسط نمونه‌های مارنی ساخت‌گاه سد در حالت طبیعی ۲/٤ مگاپاسکال است. پارامترهای مقاومت برشی سنگ‌های مارنی (φ, C) بر مبنای آزمایش مقاومت فشاری محصور به‌ترتیب ۰/۰۸ مگاپاسکال و٤۲ درجه بر آورد شد.

مقاومت کششی متوسط سنگ‌های مارنی با استفاده از آزمایش برزیلین در حالت طبیعی ۰/٤۰ مگاپاسکال و در حالت اشباع ۰/۱۱ برآورد شد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

سه‌محوری ثابت mi برای سنگ‌های مارنی ساخت‌گاه سد ۷ به‌دست آمد که با مقدار پیشنهادی هوک مطابقت دارد.

## تقدیر و تشکر

از شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان و شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس برای در اختیار گذاشتن اطلاعات و امکانات مورد نیاز برای انجام این تحقیق، تشکر وقدردانی می‌گردد.

## منابع

1. Pettijohn F. J., "Sedimentary rocks", 3rd edn. Harper and Row, New York, (1975).
2. Shaw H. F., "Mineralogy and petrology of argillaceous sedimentary of U.K.", Quarterly Journal of Engineering Geology, 14 (1981) 277-290.
3. El Amrani Paaza N., "Engineering geological characterization of Neogene marls in the Southeatern Grarada Basin", Spain, Engineering Geology, 50 (1988) 165-175.

۴. قبادی م.ح.، رسولی فرحی، م.ر.، خانلری، غ.، *اهمیت شناخت ویژگی‌های ژئومکانیکی مارن در عملیات آب بندی محل سدها*، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، اسفند ماه، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۵).

۵. قبادی م.ح.، *رابطهٔ لیتولوژی و دوام در ارزیابی ناپایداری شیب‌های سنگی (مطالعهٔ موردی)*، مجلهٔ علوم دانشگاه شهید چمران، شماره ۸ (۱۳۸۱) ۲۶-۴۰.

6. Yong R. N., Ouhadi V. R., Mohamed A. M. O., "Physicochemical evaluation of failure of stabilized marl soil", In: Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference Frontiers in Geotechnology (1996).
7. Lamas F., Oteo, C., Chacón, J., "Influence of carbonate content on the stress–strength behavior of Neogene marls from the betic cordillera

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]

(Spain) in cu triaxial tests using a quasilinear elastic (hyperbolic) model", Engineering Geology (2005).

8. Athmania D., Benaissa A., Hammadi A., Bouassida M., "Clay and marl formation susceptibility in Mila province", Algeria, Geotech. Geol. Eng. 28,6 ( 2010) 805-813.

۹. رحیم زاده، ف.، *زمین‌شناسی ایران*، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۳).

10. ASTM, "Annual book of ASTM standards", Vol. o4, 08ASTM. USA (1999).

11. Mohamed A. M. O., "The role of clay minerals in marly soils on its stability", Eng. Geol. 57 (2000) 193-203.

12. Brown E. T., "Rock characterization testing & monitoring ISRM suggested methods", Pergamon Press (1981).

۱۳. عسکری، ف.، فاخر، ع.، *تورم و واگرایی از دید مهندس ژئوتکنیک*، انتشارات جهاد دانشگاهی،(۱۳۷۲) ۲٤٥.

14. Chiu H. K., Johnston I. W., "The Uniaxial Properties of Melbourne Mudstone", 5th ISRM Congress, April 10-15, Melbourne, Australia (1983).

۱۵. *گزارش مطالعات مکانیک سنگ*، طرح سد صفا کرمان، شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس، (۱۳۸٤).

16. Graziani A., Boldini D., Ribacchi R., "Practical Estimate of Deformations and Stress Relief Factors for Deep Tunnels Supported by Shotcrete", Rock Mech, Rock Engng, 38, 5 (2005) 345-372.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.2.3 ]