بررسی تأثیر بافت سنگ در خصوصیات مهندسی سنگ‌های کربناته

مجتبی کمانی، رسول اجل لوئیان*؛ دانشگاه اصفهان، گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۲/۱۴ پذیرش ۹۶/۰۶/۱۶

چکیده

امروزه بافت سنگ به‌وسیلهٔ بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی و سیستم‌های اندازه‌گیری تصویر، کمی‌سازی می‌شود. یکی از اهداف اصلی کمی‌سازی بافت سنگ، بررسی ارتباط ویژگی‌های بافتی و فابریک سنگ با خصوصیات مهندسی آن است. روش ضریب بافت[1] یکی از روش‌های کمی‌سازی بافت سنگ است. در این روش با استفاده از توصیف پارامترهای شکل دانه‌ها، دایره‌ای بودن، کشیدگی، جهت‌گیری و چگالی فشردگی دانه‌ها، بافت سنگ کمی‌سازی می‌شود. در این تحقیق از این روش برای ارزیابی خصوصیات مهندسی سنگ‌های کربناته که قسمت‌های وسیعی از کشور را در برگرفته، استفاده شده است. بدین‌منظور تعداد ۲۸ نمونه سنگ کربناته از سازندهای مختلف ایران گردآوری و علاوه بر تعیین ضریب بافت بر روی مقاطع نازک از هر نمونه، آزمایش‌های تعیین چگالی، تخلخل، جذب آب، مقاومت تراکمی تک‌محوره، شاخص بار نقطه‌ای، دوام و سایش لس‌آنجلس انجام شده است. برای بررسی ارتباط بین ضریب بافت با نتایج هر یک از آزمایش‌ها، از تحلیل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی استفاده و بهترین رابطه دارای بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی (R^2) انتخاب شده است. طبق تحلیل‌های آماری انجام گرفته ضریب بافت با چگالی ($r=0.862$)، شاخص بار نقطه‌ای ($r=0.635$)، مقاومت تراکمی تک‌محوره ($r=0.942$) و شاخص دوام ($r=0.701$) رابطهٔ مستقیم و با درصد جذب آب ($r=0.845$)، تخلخل ($r=0.715$) و درصد سایش لس‌آنجلس ($r=0.697$) رابطهٔ معکوس دارد. به‌طورکلی، با افزایش ضریب بافت، خصوصیات مهندسی سنگ‌های کربناته بهبود می‌یابد. با بررسی نتایج پژوهش‌های قبلی و هم‌چنین بررسی ضرایب

*نویسنده مسئول ajalloeian@gmail.com

1. Texture coefficient

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

هم‌بستگی در نمونه‌های متعلق به یک سازند، درمی‌یابیم که اگرچه ارتباط کلی بین ضریب بافت و خصوصیات مهندسی سنگ‌ها وجود دارد، ولی این ارتباط در سنگ‌های متعلق به یک سازند و یا یک منطقه بیش‌تر و محکم‌تر است.

واژه‌های کلیدی: ضریب بافت، سنگ‌های کربناته، خصوصیات مهندسی سنگ، روابط هم‌بستگی.

مقدمه

امروزه با استفاده از تصاویر حاصل از مقطع میکروسکوپی و تجزیهٔ تصویر، بافت سنگ کمی‌سازی می‌شود [۳۲]، [۳٤]. یکی از روش‌های کمی‌سازی بافت سنگ، استفاده از روش ضریب بافت[1] است [۲۷]. محققان متعددی به بررسی تأثیر ضریب بافت در خصوصیات مهندسی سنگ‌ها پرداخته‌اند که نتایج مختلفی در انواع سنگ‌ها داشته است. از طرف دیگر، برخی محققان بیان داشتند که خصوصیات مهندسی سنگ‌های رسوبی بیش‌تر تحت تأثیر بافت سنگ قرار دارد [۱]، [۳۳]، [۲۳].

سنگ‌های کربناته از فراوان‌ترین سنگ‌های رسوبی کشورند و در بسیاری از پروژه‌های عمرانی نقش مهمی دارند. به هرحال، سنگ‌های کربناته دارای تفاوت چندانی در کانی‌شناسی نیستند ولی بافت در این سنگ‌ها بسیار متفاوت است [۱]. در این تحقیق با توجه به اهمیت نقش بافت در سنگ‌های رسوبی، به بررسی تأثیر ضریب بافت در خصوصیات مهندسی برخی از سنگ‌های کربناته ایران پرداخته شده است. در ادامه، ابتدا ضریب بافت تعریف شده و نحوهٔ محاسبه آن بیان شده و سپس پژوهش‌های پیشین در موضوع ضریب بافت مرور شده است.

ضریب بافت

یکی از پژوهش‌های اولیه در زمینه کمی‌سازی بافت سنگ به‌منظور اهداف مکانیک سنگ، پژوهش‌های هارت[2] و رولند[3] (۱۹۸٦) و (۱۹۷۸) است که پارامتر ضریب بافت را به‌منظور بررسی مقاومت و حفرپذیری در ده نمونه شامل سنگ‌های گرانیت، هورنفلس، مرمر، بازالت و ماسه سنگ ارائه داده‌اند [۱۹]، [۲۰]. در رابطهٔ ضریب بافت، از تعریف بافت سنگ که ویلیامز[4]

1. Texture coefficient
2. Howarth
3. Rowlands
4. Williams

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

و همکاران (۱۹۸۲) استفاده کرده است [۳۵]. آن‌ها بافت سنگ را به‌عنوان درجه‌ای از تبلور، اندازهٔ دانه‌ها و فابریک یا ارتباط هندسی بین عناصر تشکیل‌دهندهٔ سنگ تعریف کرده‌اند [۳۵]. به‌عبارت دیگر این تعریف شامل شکل دانه‌ها، جهت‌گیری، درجهٔ درهم قفل‌شدگی و نسبت دانه‌ها و زمینه می‌شود که در رابطهٔ ضریب بافت به آن توجه شده است [۲۰]. علیرغم این‌که برخی از سنگ‌ها حاوی فضای خالی بین دانه‌ها مانند ترک و حفرات هستند که باید به‌عنوان جزئی از بافت سنگ به‌حساب آورده شود، در اغلب تعاریف ارائه شده برای بافت سنگ، به فضاهای خالی و ترک‌های موجود در سنگ اشاره نشده است. البته در روش ضریب بافت، تخلخل و فضاهای خالی در سنگ به‌صورت غیرمستقیم تأثیر داده شده است. حفرات موجود در سنگ که با سیمان پر نشده‌اند سبب سستی و کاهش مقاومت سنگ می‌شوند [۱۲].

به هرحال برای کمی‌سازی بافت سنگ باید بتوان پارامترهای مرتبط با شکل و قرارگیری دانه‌ها و هم‌چنین تأثیر زمینه را فرمول‌نویسی کرد. شکل و اندازه دانه‌ها را می‌توان با استفاده از طول (L)، عرض (W)، محیط (P) و مساحت (A) دانه که برای محاسبه چندین ضریب مانند نسبت وجه (AR =Aspect Ratio)، رابطهٔ (۱) و فاکتور شکل (FF= Factor Form)، رابطهٔ (۲) استفاده شده است، بیان کرد.

$$AR = \frac{L}{W} \quad (۱)$$

$$FF = \frac{4\pi.A}{P^2} \quad (۲)$$

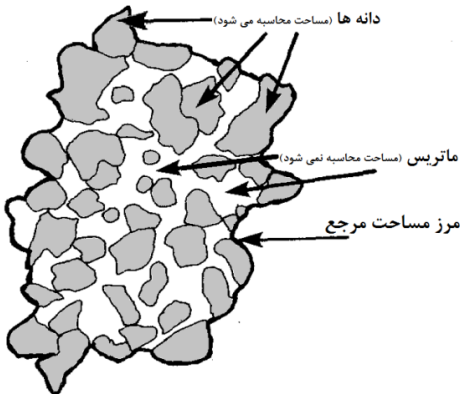
فاکتور شکل برای اشکال دایره‌ای برابر یک است و با دور شدن از شکل دایره‌ای (یا به‌عبارت دیگر با افزایش زبری و کشیدگی دانه) کاهش می‌یابد. شاخص درهم قفل‌شدگی[1] را می‌توان برای مدل‌سازی ساختار و ارتباط همسایگی دانه‌ها به‌کار برد. مقادیر بالای شاخص درهم قفل‌شدگی نشان از ارتباط پیچیده دانه‌ها است که خود باعث افزایش مقاومت سنگ می‌شود [۱۱]، [۱۸]. چگالی بسته‌بندی[2] بالا باعث افزایش مقاومت سنگ می‌شود [۷]. کمیت چگالی بسته‌بندی در رابطهٔ ضریب بافت، به‌وسیله وزن مساحت AW[3] طبق رابطهٔ (۳) کمی‌سازی می‌شود (شکل ۱). پارامتر وزن مساحت، نسبت مجموع مساحت دانه‌های موجود در داخل مرز

1. Interlocking index
2. Density packing
3. Area weighting

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

مرجع به کل مساحت داخل مرز مرجع است. AW برای سنگ‌های آذرین که فاقد زمینه هستند (مانند گرانیت) برابر یک است [۳۰].

$$AW = \frac{\Sigma\left(\text{مساحت دانه ها در درون مساحت مرزی}\right)}{\left(\text{مساحت مرزی به وسیله مرز مساحت مرجع}\right)} \quad (۳)$$



شکل ۱. نمایش پارامترهای مورد نیاز برای محاسبهٔ وزن مساحت دانه‌ها در مقطع نازک فرضی

هارت و رولند (۱۹۸۷) با استفاده از ارزیابی کمی بافت سنگ با پارامترهای دایره‌ای بودن دانه‌ها (FF_0)، کشیدگی (N_0, N_1, AR_1)، جهت‌گیری (AF_1) و چگالی بسته‌بندی دانه‌ها (AW) فرمول‌نویسی ضریب بافت را انجام داده‌اند (رابطهٔ ٤) [۲۰].

$$T.C. = AW\left[\left(\frac{N_0}{N_0+N_1}\times\frac{1}{FF_0}\right)+\left(\frac{N_1}{N_0+N_1}\times AR_1\times AF_1\right)\right] \quad (٤)$$

در این رابطه: T.C.= ضریب بافت، AW= وزن مساحت، N_0= تعداد دانه‌هایی که نسبت وجه آن‌ها (AR) کم‌تر از دو است، N_1= تعداد دانه‌هایی که نسبت وجه آن‌ها (AR) بیش‌تر از دو است، FF_0= میانگین حسابی فاکتور شکل، AR_1= میانگین حسابی نسبت وجه و AF_1= فاکتور زاویه[1] است.

منظور از دانه‌های کشیده، دانه‌های است که AR بزرگ‌تر از دو دارند و فاکتور فرم (FF_0) که از رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید، برای دانه‌هایی است که کشیده نیستند. نسبت وجه (AR_1) که از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید به‌منظور محاسبه میانگین حسابی نسبت وجه دانه‌های کشیده است. AW طبق رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود. فاکتور زاویه‌ای AF از رابطهٔ (۵) محاسبه می‌شود.

1. Angle factor

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

AF_1 که برای شمارش جهت دانه‌های کشیده است از تقسیم AF بر پنج ($AF_1=AF/5$) به‌دست می‌آید.

$$AF = \sum_{i=1}^{9}\left(\frac{x_i}{\frac{N(N-1)}{2}}\right)\times i \qquad (۵)$$

در این رابطه: N= تعداد کل دانه‌های کشیده، x_i= تعداد دانه‌ای که دارای تفاوت زاویه‌ای در آن رده است و i= فاکتور وزن یا همان شمارهٔ رده است. در این روش، ابتدا زاویه‌ای که قطر بزرگتر دانه‌های کشیده با خط افقی می‌سازد، تعیین شده و سپس اختلاف زاویهٔ ویژه دانه‌ها (β) با تفریق زاویهٔ بزرگ‌تر از زاویهٔ کوچک‌تر بین دو دانه کشیده، محاسبه می‌شود. این کار برای تمام دانه‌های کشیده به‌صورت مقایسه‌ای بین دو دانه انجام می‌شود. نسبت تعداد دانه‌های موجود در یک رده مشخص ($x_i/(N(N-1))/2$) ضرب‌در امتیاز آن رده شده (i) و با ردهٔ بعدی جمع می‌شود تا به ردهٔ آخر (نه) برسد. اگر زاویهٔ ویژه کم‌تر از ۹۰ درجه شده، همان را به‌کار برده و اگر بیش‌تر از ۹۰ درجه باشد، باید ۱۸۰ را از آن کم کرد (β- ۱۸۰). با توجه به زاویهٔ ویژه، نه رده وجود دارد که با افزایش این اختلاف زاویهٔ از صفر تا ۹۰، فاکتور وزن هم از یک تا ۹ افزایش می‌یابد (برای رده صفر تا ۱۰ درجه وزن یک، برای رده ۱۱ تا ۲۰ درجه وزن دو، ... و برای رده ۸۱ تا ۹۰ درجه وزن نه).

محاسبه ضریب بافت روی تصاویر به‌دست آمده از مقاطع نازک میکروسکوپی به‌صورت دستی و یا با استفاده از نرم‌افزار انجام می‌شود. جزئیات روش محاسبه را به‌صورت دستی هارت و رولند (۱۹۸۷) و جزئیات روش محاسبه با استفاده از تجزیهٔ تصویر را پریکرل[1] (۲۰۰۱) به‌خوبی شرح داده است [۲۰]، [۳۰]. در این تحقیق از نرم‌افزار *JMicroVision v.1.27* برای محاسبهٔ ضریب بافت استفاده شده است.

۱. بررسی رابطه ضریب بافت

برای درک بهتر رابطهٔ ضریب بافت، شکل ۲ ارائه شده است. ویژگی‌های هندسی شکل‌های آورده شده در شکل ۲ و جدول ۱ محاسبه شده است. با افزایش تعداد دانه‌ها، ارتباط مستقیم دانه‌ها با یک‌دیگر، درجه درهم قفل‌شدگی و فشردگی دانه‌ها، افزایش اشکال نامنظم و گوشه‌دار

1. Prikryl

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

(مانند ستاره و مستطیل کشیده) و اختلاف زاویهٔ دانه‌ها پارامتر ضریب بافت هم افزایش می‌یابد. محدودهٔ ضریب بافت محاسبه شده برای مقاطع فرضی از ۰/۴۳ برای شکل ۲ الف تا ۱/۵۷ برای شکل ۲ ت است. محدودهٔ گزارش شده برای ضریب بافت از ۰/۲۱ تا ۲/۲ را ازترک[1] و همکاران (۲۰۱۴) و از ۰/۵۲ تا ۲/۸ را هارت و رولند (۱۹۸۷) است [۲۰]، [۲۷].

جدول ۱. ویژگی‌های هندسی شکل‌های مختلف (واحدها منطبق بر شکل نیستند و برای مثال آورده شده‌اند)

شکل	مساحت (mm^2)	محیط (mm)	طول (mm)	عرض (mm)	فاکتور شکل	نسبت وجه
دایره	۵۱۹/۶	۸۰/۸	۲۵/۷	۲۵/۷	۱/۰۰	۱/۰۰
مربع	۵۱۹/۶	۹۱/۲	۳۲/۲	۲۲/۸	۰/۷۹	۱/۴۱
مستطیل (کوچک)	۵۱۹/۶	۹۶/۷	۳۶/۰	۱۶/۱	۰/۷۰	۲/۲۴
مستطیل	۵۱۹/۶	۱۱۴/۰	۴۷/۰	۱۱/۴	۰/۵۰	۴/۱۲
ستاره	۵۱۹/۶	۱۲۰/۰	۳۴/۶	۳۰/۰	۰/۴۵	۱/۱۵

پژوهش‌های مختلفی روی تأثیر ضریب بافت در انواع مختلف سنگ‌ها صورت گرفته است. هارت و رولند دریافتند که بین ضریب بافت سنگ و میزان نفوذ رابطهٔ معکوس با ضریب هم‌بستگی $R^2= 0.72$ برای مقادیر ضریب بافت کم‌تر از یک و $R^2= 0.99$ برای مقادیر ضریب بافت بیش‌تر از یک، وجود دارد [۱۹]، [۲۰]. هم‌چنین بین ضریب بافت با مقاومت تراکمی تک‌محوره رابطهٔ مستقیم با ضریب هم‌بستگی $R^2= 0.92$ و با مقاومت کششی برزیلین رابطهٔ مستقیم با ضریب هم‌بستگی $R^2= 0.81$ وجود دارد. ارسوی[2] و والر[3] (۱۹۹۵) بین پارامتر ضریب بافت و مقاومت تراکمی ($R^2= 0.62$)، مقاومت کششی ($R^2= 0.61$)، مدول یانگ ($R^2= 0.69$)، دانسیته خشک ($R^2= 0.73$) و سختی شور ($R^2= 0.69$) هم‌بستگی یافتند [۱۵]. آزونی[4] و همکاران (۱۹۹۶) برای نمونه‌هایی شامل گرانیت، مرمر و ماسه‌سنگ ضریب هم‌بستگی زیادی ($R^2= 0.92$) بین مقاومت تراکمی و ضریب بافت

1. Ozturk
2. Ersoy
3. Waller
4. Azzoni

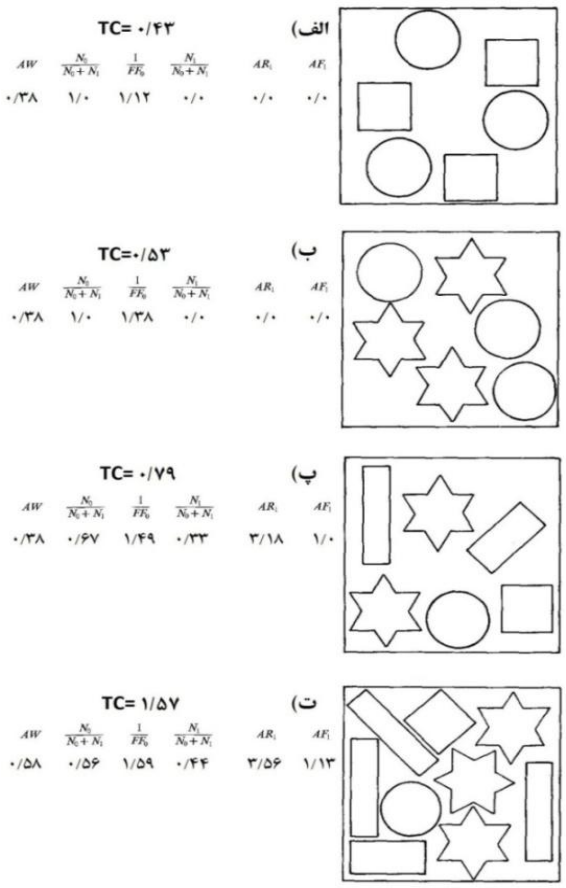
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

به‌دست آوردند [۵]. ازترک و همکاران (۲۰۰۴) بین ضریب بافت سنگ و تخلخل ضریب هم‌بستگی R^2= 0.96 و با شاخص بار نقطه‌ای R^2 =0.67 یافتند [۲۶]. آلبر[1] و کهرامن[2] (۲۰۰۹) بین ضریب بافت و مقاومت تراکمی تک‌محوره در سنگ‌های برشی ضریب هم‌بستگی R^2=0.83 برای محدودهٔ ضریب بافت ۰/۱۱۴ تا ۰/۸۱۶ و R^2=0.90 برای محدودهٔ ۰/۳۰۰ تا ۰/۶۰۰ یافتند [۲]. ازترک و نسوف[3] (۲۰۱۳) بین مقاومت تراکمی و ضریب بافت در بین ۳۴ نمونه شامل سنگ‌های آهکی، مرمر، گرانیت، سرپانتین، دیاباز و گلسنگ رابطه‌ای مستقیم با ضریب هم‌بستگی R^2=0.79 به‌دست آوردند [۲۵]. ازترک و همکاران (۲۰۱۴) در بین ۴۶ نمونه از انواع مختلف سنگ‌ها شامل آندزیت، توف، سنگ‌آهک، سیلتستون، شیل، گلسنگ، ماسه‌سنگ، سرپانتین، هماتیت، تراورتن، دیاباز، گرانیت و مارن بین ضریب بافت با مقاومت تراکمی تک محوره ضریب هم‌بستگی R^2=0.52 به‌دست آوردند و با محدود کردن داده‌ها به سنگ‌های‌آهکی ضریب هم‌بستگی افزایش چشم‌گیری (R^2=0.87) یافتند [۲۷]. اگرچه هم‌بستگی خوبی بین ضریب بافت با برخی از ویژگی‌های مهندسی در برخی از سنگ‌ها گزارش شده [۲]، [۵]، [۱۵]، [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]، ولی برخی محققان خبر از عدم هم‌بستگی و کارایی پارامتر ضریب بافت داده‌اند [۵]، [۳۰]. پریکرل در ۱۳ نمونه سنگ گرانیت رابطه‌ای معناداری بین ضریب بافت و مقاومت تراکمی تک‌محوره و مدول الاستیک نیافت (به‌ترتیب R= -0.10 و R= -0.34). آزونی و همکاران (۱۹۹۶) هم‌بستگی بالایی بین ضریب بافتی و مقاومت فشاری برای سنگ‌های گرانیت، ماسه‌سنگ و مرمر به‌دست آوردند امّا هم‌بستگی کم‌تری برای گنیس و ریولیت یافتند [۵].

در این تحقیق با توجه به گسترش سنگ‌های کربناته در کشور و هم‌چنین نبودن پژوهشی در این زمینه، تعداد ۲۸ نمونه سنگ کربناته از سازندهای مختلف ایران جمع‌آوری و بیش از ۲۸۰ آزمایش مکانیک سنگ به‌منظور بررسی تأثیر بافت سنگ بر رفتار مهندسی آن، انجام شده است. از هر نمونه مقطع نازک میکروسکوپی تهیه و با استفاده از رابطهٔ ضریب بافت به کمی‌سازی بافت سنگ پرداخته شده است.

1. Alber
2. Kahraman
3. Nasuf

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]



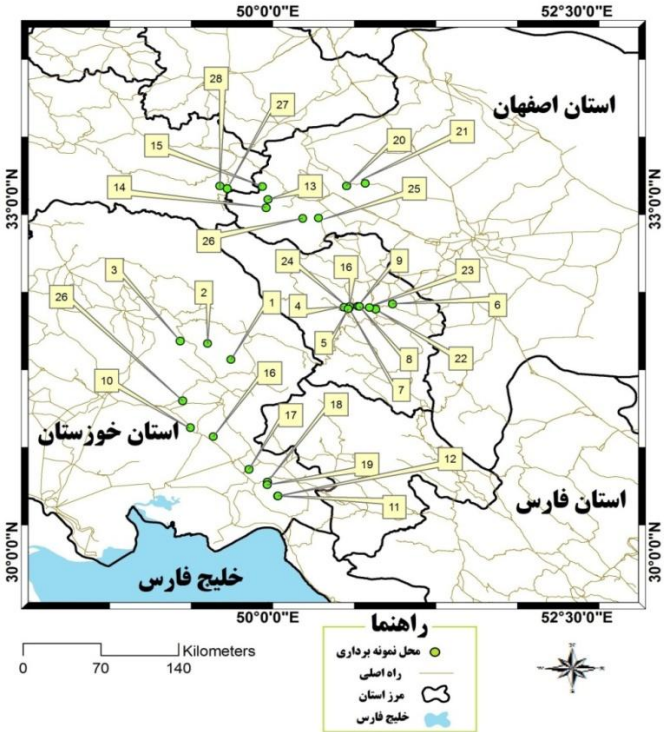
شکل ۲. نمایش ضریب بافت با اشکال هندسی منظم [۲۰]

مواد و روش

۲۸ نمونه بلوک سنگی از سازندهای مختلف ایران شامل هفت بلوک از سازند آسماری، پنج بلوک از آهک‌های کرتاسه ایران مرکزی (K1 و K2)، پنج بلوک از میشان، چهار بلوک از آغاجاری، دو بلوک از سروک، دو بلوک از ایلام، دو بلوک از گرو و یک بلوک از سازند فهلیان گردآوری و از هر بلوک نمونه‌هایی برای انجام آزمایش‌ها مکانیک سنگ تهیه کردیم. محل نمونه‌های اخذ شده در شکل ۳ نشان داده شده است. هر بلوک در ابعاد حداقل ۳۰×۳۰×۴۰ سانتی‌متر و بدون هرگونه آثار هوازدگی، درزه و رگه جمع‌آوری شده است. از هر بلوک، مقطع

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

نازک میکروسکوپی در راستای لایه‌بندی به‌منظور محاسبه ضریب بافت تهیه شد. برای درک بهتر رابطهٔ میان ضریب بافت به‌عنوان نماینده بافت سنگ با ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و دوام نمونه‌ها به‌عنوان ویژگی‌های مهندسی سنگ بکر از تجزیهٔ‌های آماری مانند روش رگرسیون خطی و غیرخطی و ضریب هم‌بستگی استفاده کردیم. بهترین رابطه دارای بالاترین ضریب هم‌بستگی (R^2) انتخاب شد. هم‌چنین برای بررسی قابلیت پیش‌بینی خصوصیات مهندسی نمونه‌ها با استفاده از ضریب بافت علاوه بر ضریب هم‌بستگی R^2، از ریشه میانگین مربع‌های خطا (RMSE[1]) و درصد مقادیر محاسبه شده (VAF[2]) استفاده شده است. استفاده از این روش‌ها برای بررسی کارایی روابط رگرسیونی را محققان مختلفی توصیه کرده‌اند [٤]، [١٧]، [٢٣]. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS 22 انجام شده است.



شکل ۳. نقشهٔ موقعیت جغرافیایی محل نمونه‌ها

1. Root mean square error
2. Value account for

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

روی هر نمونه آزمایش‌های مکانیک سنگ شامل آزمایش‌ها تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام سنگ طبق استانداردهای بین‌المللی انجام شده است (جدول ۲) [۳]، [۲۲]. آزمایش‌ها فیزیکی انجام شده در این تحقیق شامل آزمایش تعیین چگالی، جذب آب و تخلخل است (ASTM D2216-10). آزمایش‌ها مکانیکی انجام شده شامل آزمایش شاخص بار نقطه‌ای (ASTM D5731-ISRM) و مقاومت تراکمی تک‌محوره (ASTM D2938–ISRM) است. هم‌چنین به‌منظور بررسی تأثیر بافت سنگ روی آزمایش‌ها شیبه‌سازی شده، دو آزمایش رایج از این گروه شامل آزمایش شاخص دوام (ISRM 08– ASTM D4644) و سایش لس‌آنجلس (ISRM- ASTM C535, C131) انجام شده است.

در این تحقیق، برای محاسبهٔ ضریب بافت در هر مقطع میکروسکوپی چند بار محاسبات انجام و میانگین آن آورده شده است. برای این کار عکس‌هایی با فرمت tif از مقاطع نازک در زیر میکروسکوپ تهیه و وارد محیط نرم‌افزار JMicroVision-v1.27 می‌شود. بعد از کالیبره کردن عکس با رسم مرز دانه‌ها پارامترهای طول (L)، عرض (W)، محیط (P)، مساحت (A) و جهت‌یابی دانه‌ها به‌صورت خودکار در نرم‌افزار محاسبه می‌شود (شکل ٤). با انتقال این پارامترها به محیط نرم‌افزار Excel و فرمول‌نویسی می‌توان سایر ضرایب مانند AR و FF را محاسبه کرد (روابط ۱، ۲ و ۵). با اتمام رسم مرز تمامی دانه‌ها و هم‌چنین رسم مرز مرجع، AW را می‌توان محاسبه کرد (رابطهٔ ۳). در پایان با استفاده از رابطهٔ (٤) عدد ضریب بافت محاسبه می‌شود. این کار برای هر نمونه چند بار صورت گرفته و میانگین آن به‌عنوان عدد ضریب بافت ارائه شده است (شکل ۵). ضریب بافت محدوده‌ای بین ۰/۳٤ تا ۱/٤۳ دارد. بیش‌ترین مقدار ضریب بافت متعلق به A3 و کم‌ترین آن متعلق به Ag3 است.

چگالی نمونه‌ها بین ۱/۷۲ تا ۲/٦۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. کم‌ترین مقدار چگالی مربوط به نمونه I1 و بیش‌ترین آن مربوط به نمونه‌های A2 و A3 است که به‌ترتیب دارای عدد ضریب بافت ۰/٤۸، ۱/۲٦ و ۱/٤۳ هستند. باتوجه به رابطهٔ ضریب بافت، با کاهش فضاهای خالی و زمینه و افزایش فشردگی دانه‌ها، فاکتور فشردگی دانه‌ها (AW) افزایش یافته که باعث افزایش عدد ضریب بافت می‌شود. کم‌ترین درصد جذب آب مربوط به نمونه A2 با

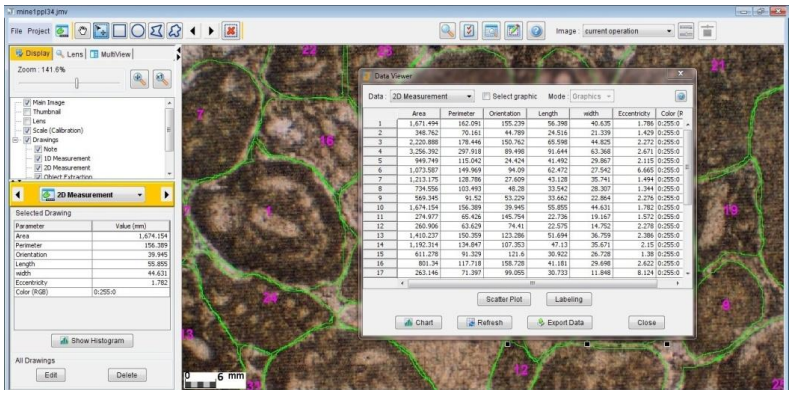
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های فیزیکی، مکانیکی و دوام

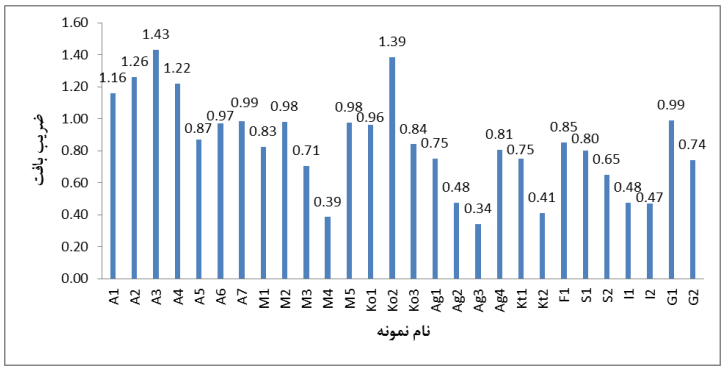
شمارهٔ نمونه	سازند	آزمایش‌های فیزیکی			آزمایش‌های مکانیکی		آزمایش‌های دوام	
	کد نمونه آزمایش	D (g/cm^3)	W_{ab} (%)	P (%)	I_{s50}(MPa)	UCS (MPa)	ID (%)	LA (%)
۱	آسماری	۲/۵۳	۱/۱۰	۲/۷۶	۳/۱۰	۸۲/۷۰	۹۸/۱۵	۱۹/۱۸
۲	آسماری	۲/۶۷	۰/۱۵	۰/۴۱	۳/۷۳	۹۸/۴۴	۹۵/۵۸	۲۶/۶۰
۳	آسماری	۲/۶۷	۰/۱۹	۰/۵۲	۳/۴۱	۱۱۶/۲۲	۹۴/۲۳	۲۶/۱۰
۴	آسماری	۲/۶۶	۰/۲۸	۰/۷۵	۳/۸۳	۱۲۲/۵۰	۹۵/۱۲	۲۲/۶۰
۵	آسماری	۲/۴۴	۲/۰۳	۵/۰۰	۳/۱۸	۶۰/۰۷	۹۱/۲۱	۲۲/۷۰
۶	آسماری	۲/۳۶	۰/۹۸	۲/۴۲	۴/۱۴	۶۷/۲۰	۹۸/۱۵	۱۷/۰۳
۷	آسماری	۲/۴۱	۱/۸۹	۴/۴۳	۴/۰۹	۸۲/۴۴	۹۷/۱۴	۲۱/۵۹
۸	میشان	۲/۲۶	۴/۶۰	۱/۸۰	۴/۸۰	۵۰/۰۱	۹۱/۵۲	۲۳/۰۱
۹	میشان	۲/۴۲	۳/۰۷	۷/۱۸	۳/۳۵	۶۱/۵۳	۹۰/۱۲	۲۶/۳۰
۱۰	میشان	۱/۹۲	۹/۸۰	۱۶/۱۰	۳/۴۸	۴۷/۰۰	۸۸/۳۰	۴۶/۲۰
۱۱	میشان	۱/۹۱	۱۱/۵۰	۱۹/۰۰	۲/۱۳	۱۴/۹۰	۸۳/۸۰	۳۲/۸۵
۱۲	میشان	۲/۴۶	۱/۲۳	۳/۰۲	۳/۳۵	۶۸/۱۹	۹۷/۱۴	۲۰/۲۱
۱۳	K1	۲/۴۰	۲/۰۰	۱/۹۰	۵/۱۵	۶۱/۰۰	۹۴/۰۰	۲۲/۱۴
۱۴	K1	۲/۶۴	۰/۴۵	۱/۲۰	۴/۴۹	۱۳۰/۶۲	۹۱/۸۵	۲۰/۸۰
۱۵	K1	۲/۳۴	۳/۵۰	۱/۵۰	۳/۳۰	۴۴/۸۰	۹۱/۲۹	۲۶/۰۱
۱۶	آغاجاری	۲/۴۰	۲/۱۸	۵/۲۲	۵/۱۲	۴۴/۶۳	۹۶/۱۵	۳۲/۲۶
۱۷	آغاجاری	۲/۰۴	۷/۶۱	۱۵/۴۷	۱/۰۷	۲۸/۵۶	۸۴/۳۸	۷۶/۸۹
۱۸	آغاجاری	۱/۸۲	۱۵/۴۰	۱۸/۶۰	۱/۲۰	۸/۷۴	۸۷/۱۰	۷۳/۱۰
۱۹	آغاجاری	۲/۴۱	۱/۱۷	۴/۲۱	۳/۵۶	۳۸/۱۷	۹۶/۲۶	۲۰/۰۲
۲۰	K2	۲/۱۵	۷/۴۰	۲/۴۰	۲/۰۴	۳۷/۳۰	۸۷/۸۰	۳۶/۹۸
۲۱	K2	۱/۷۲	۱۳/۵۰	۸/۷۸	۱/۳۶	۱۷/۸۸	۸۳/۱۰	۴۹/۲۱
۲۲	فهلیان	۲/۵۶	۲/۵۶	۶/۶۳	۱/۴۳	۵۹/۶۳	۸۳/۵۶	۳۷/۲۰
۲۳	سروک	۲/۵۵	۱/۸۰	۴/۶۵	۳/۱۰	۴۹/۴۴	۹۴/۳۲	۳۲/۸۰
۲۴	سروک	۲/۰۵	۸/۱۰	۲/۱۰	۳/۱۱	۲۹/۱۵	۸۸/۶۰	۳۸/۲۵
۲۵	ایلام	۱/۷۲	۷/۶۰	۱۱/۲۰	۱/۴۸	۱۷/۵۰	۸۲/۰۰	۴۷/۱۰
۲۶	ایلام	۱/۸۴	۱۳/۶۰	۸/۴۰	۱/۹۳	۱۶/۶۴	۷۸/۰۳	۵۲/۴۰
۲۷	گرو	۲/۰۵	۶/۰۰	۱۲/۵۰	۴/۸۰	۸۲/۰۱	۹۲/۱۰	۴۳/۶۰
۲۸	گرو	۱/۹۶	۵/۱۰	۹/۸۰	۳/۲۹	۴۹/۸۰	۹۳/۰۰	۳۴/۹۰
	پارامترهای آماری							
	میانگین	۲/۲۶	۴/۸۱	۶/۳۵	۳/۱۷	۵۶/۶۸	۹۰/۸۵	۳۳/۵۳
	حداقل	۱/۷۲	۰/۱۵	۰/۴۱	۱/۰۷	۸/۷۴	۷۸/۰۳	۱۷/۰۳
	حداکثر	۲/۶۷	۱۵/۴۰	۱۹/۰	۵/۱۵	۱۳۰/۶۲	۹۸/۱۵	۷۶/۸۹

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

D=دانسیته، W_{ab}= جذب آب، P= تخلخل، I_{s50}= شاخص بار نقطه‌ای، UCS= مقاومت تراکمی تک محوره، ID= شاخص دوام، LA = درصد سایش لس‌آنجلس.



شکل ٤. نمایش محیط نرم‌افزار JMicroVision



شکل ٥. مقادیر ضریب بافت محاسبه شده برای نمونه‌های بررسی شده

مقدار ۰/۱۵ و بیش‌ترین آن مربوط به نمونه Ag3 با مقدار ۱۵/٤۰ درصد است. نمونه A2 یک سنگ آهک بلوری و نمونه Ag3 یک گلسنگ آهکی است. گرچه درصد جذب آب مرتبط با نوع کانی‌های موجود در سنگ است ولی با بافت سنگ هم بی ارتباط نیست به‌طوری‌که حدود ١٤ درصد از نمونه‌ها (چهار عدد از ۲۸ نمونه) دارای جذب آب بالای ۱۰ درصد هستند و همگی آن‌ها ضریب بافت کم‌تر از ۰/٤۸ دارند. بیش‌ترین تخلخل با مقدار ۱۹ درصد مربوط به نمونه M4 است. فضاهای خالی بین دانه‌های کربناته در این نمونه زیاد است و از طرف دیگر فاقد گل کربناته برای پر کردن این فضاهای خالی است. سه نمونه‌ای که دارای تخلخل زیر یک درصد هستند، همگی ضریب بافت بالای ۱/۲۲ دارند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

آزمایش‌ها مکانیکی انجام شده شامل شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت تراکمی تک‌محوره است. نتایج آزمایش‌ها شاخص بار نقطه‌ای برای قطر استاندارد ۵۰ میلی‌متر بین ۱/۰۷ تا ۵/۱۵ مگاپاسکال قرار دارد. طبق تقسیم‌بندی بروش[1] و فرانکلین[2] (۱۹۷۲)، ۷۱/۵ درصد نمونه‌ها در رده با مقاومت خیلی بالا (۳ تا ۱۰ مگاپاسکال) و ۲۸/۵ درصد در رده مقاومت بالا قرار می‌گیرند [۹]. نتایج آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوره محدوده‌ای از ۸/۷٤ تا ۱۳۰/٦۲ مگاپاسکال را در بر می‌گیرد. طبق تقسیم‌بندی ISRM (۱۹۷۸)، ۱۰/۷ درصد از نمونه‌ها در رده مقاومت بالا، ۳۹/۳ درصد در رده متوسط، ۳۲/۱۱ درصد در رده نسبتاً پایین و ۱۷/۹ در رده مقاومت پایین قرار می‌گیرند. پنج نمونه‌ای که در رده مقاومت پایین قرار می‌گیرند همگی دارای ضریب بافت زیر ۰/٤۸ هستند.

نتایج آزمایش شاخص دوام وارفتگی محدوده‌ای بین ۷۸/۰۳ تا ۹۸/۱۵ درصد را در برمی‌گیرد. کم‌ترین شاخص دوام مربوط به نمونه ۱۲ با مقدار ۷۸/۰۳ درصد است. نام این نمونه سنگ طبق تقسیم‌بندی دانهام یک وکستون (دارای گل فراوان و دانه‌ها بیش از ۱۰ درصد) و هم‌چنین دارای عدد ضریب بافت ۰/٤۷ است. طبق تقسیم‌بندی کمبل (۱۹۷۱) [۱٦]، ۲۸/٦ درصد نمونه‌ها در ردهٔ خیلی مقاوم و مقاوم قرار می‌گیرند که همگی آن‌ها دارای ضریب بافت بالای ۰/۷۵ هستند. بیش‌ترین افت وزنی در آزمایش سایش لس‌آنجلس مربوط به نمونهٔ Ag2 با مقدار ۷٦/۸۹ است. این نمونه یک گلسنگ آهکی با ضریب بافت ۰/٤۸ است. در حدود ٤۰ درصد نمونه‌ها دارای افت وزنی کم‌تر از ۲۵ درصد هستند که همگی آن‌ها دارای عدد ضریب بافت بزرگ‌تر از ۰/۸۱ هستند.

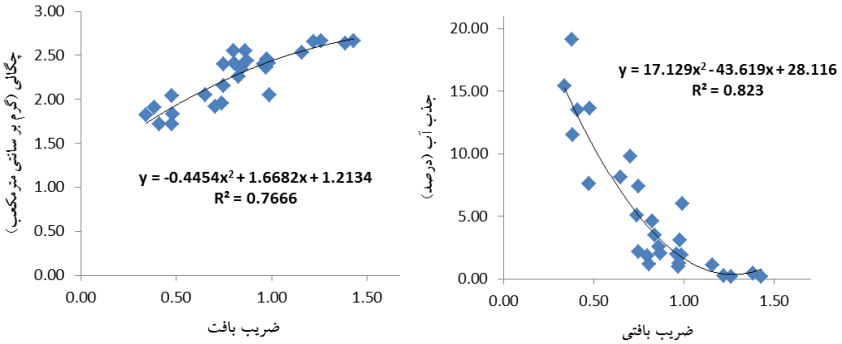
تحلیل‌های آماری و ارائه روابط

با توجه به پژوهش‌های سایر محققان بین ضریب بافت با ویژگی‌های مهندسی سنگ شامل: مقاومت تراکمی تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلین، مدول یانگ، چگالی، سختی شور، تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و قابلیت حفرپذیری رابطه با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر از ۰/٦

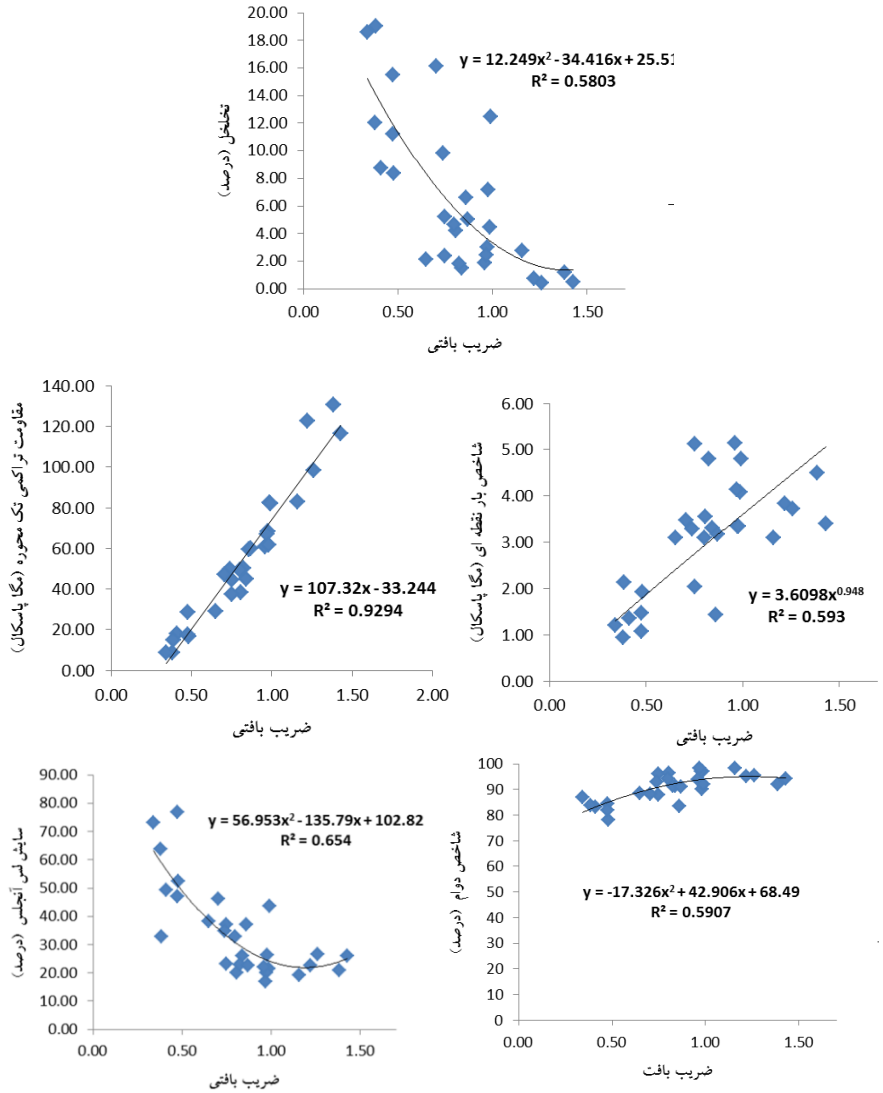
1. Broch
2. Franklin

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

وجود دارد [۲]، [۵]، [۱۵]، [۱۹]، [۲٤]، [۲۵]، روابط میان ضریب بافت با ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی، جذب آب و تخلخل، ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت تراکمی تک‌محوره و شاخص بار نقطه‌ای و ویژگی‌های دوام سنگ شامل شاخص دوام و سایش لس‌آنجلس در شکل ٦ آورده شده است. ضریب هم‌بستگی به‌دست آمده بین ضریب بافت با نتایج سایر آزمایش‌ها در این تحقیق، بزرگ‌تر از ۰/۵ است. بیش‌ترین هم‌بستگی بین ضریب بافت با مقاومت تراکمی $R^2= 0.92$ و کم‌ترین آن با تخلخل $R^2= 0.58$ است. کم‌ترین ضریب هم‌بستگی بین عدد ضریب بافت و تخلخل می‌تواند ناشی از آن باشد که علیرغم تأثیر غیرمستقیم فضاهای خالی سنگ در رابطهٔ ضریب بافت (رابطهٔ ٤)، سایر پارامترهای دیگر هم مانند جهت‌یابی و شکل دانه‌ها در عدد ضریب بافت نقش دارد. البته شایان ذکر است که تخلخلی که از روی مقاطع میکروسکوپی به‌دست می‌آید (که در مقادیر پارامتر AW و درنتیجه ضریب بافت نقش دارد) با تخلخلی که از نتایج آزمایش‌ها مکانیک سنگ به‌دست می‌آید لزوماً یک‌سان نیستند. آزونی و همکاران (۱۹۹٦) هم به این موضوع‌ها اشاره کرده‌اند [۵]. با افزایش عدد ضریب بافت، پارامترهای چگالی، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت تراکمی تک‌محوره و شاخص دوام افزایش و درصد جذب آب، سایش لس‌آنجلس و تخلخل به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابد (شکل ٦).



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]



شکل ٦. نمودارهای هم‌بستگی بین ضریب بافت با سایر نتایج آزمایش‌ها

کارایی ضریب بافت در پیش‌بینی خصوصیات مهندسی سنگ

برای بررسی کارایی روابط به‌دست آمده (شکل ٦) در پیش‌بینی خصوصیات مهندسی سنگ‌های کربناته از ضریب هم‌بستگی r، RMSE و VAF استفاده شده است. ضریب هم‌بستگی r با استفاده از رابطهٔ (٦)، RMSE با استفاده از رابطهٔ (٧) و VAF با استفاده از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

رابطهٔ (۸) محاسبه می‌شود. در این روابط: X_i مقادیر پیش‌بینی شده، Y_i مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است. استفاده از این روش‌ها برای بررسی کارایی روابط رگرسیونی را محققان مختلفی توصیه کرده‌اند [٤]، [١٧]، [٢٣].

$$R = \frac{n\sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}\sqrt{n(\sum Y_i^2) - (\sum Y_i)^2}} \quad (٦)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2} \quad (٧)$$

$$VAF = \left(1 - \frac{var(Y_i - X_i)}{var(Y_i)}\right) \times 100 \quad (٨)$$

ضریب هم‌بستگی r یکی از معیارهای استفاده شده در تعیین هم‌بستگی دو متغیر است که شدت رابطه و هم‌چنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا ۱- است و در نبود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. مقادیر پی (P value) کم‌تر از ۰/۰۵ به‌معنای وجود ارتباط معنادار و نه تصادفی، بین متغییرهای مورد نظر است. مقادیر P محاسبه شده برای تمامی داده‌ها کم‌تر از ۰/۰۵ و در حد معنادار است (جدول ۳). توجه شود که برای بررسی دقیق‌تر و کارایی ضریب بافت در پیش‌بینی ویژگی‌های مهندسی، مقادیر RMSE و VAF ارائه شده است. VAF محدوده‌ای بین صفر تا ۱۰۰ دارد و مقادیر بالای VAF نشان از کیفیت بالای مدل برای پیش‌بینی است درحالی که مقادیر کم‌تر RMSE نشان از کیفیت زیاد مدل در پیش‌بینی ویژگی‌های مهندسی دارد. این دو پارامتر را محققان مختلف برای بررسی کارایی روابط رگرسیونی استفاده کرده‌اند [٤]، [١٠]، [١٧]، [٢١]. این شاخص‌ها برای داده‌ها محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. شاخص‌های آماری برای بررسی رابطه بین ضریب بافت با نتایج آزمایش‌ها

پارامترپیش‌بینی شده / شاخص آماری	D	W_{ab}	P	Is	UCS	ID	LA
R^*	۰/۸٦۲	-۰/۸٤٥	-۰/۷۱٥	۰/٦۳٥	۰/۹٤۲	۰/۷۰۱	-۰/٦۹۷
P value *	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
$R^{2\,**}$	۰/۷٦٦	۰/۸۲۳	۰/٥۸۰	۰/٥۹۳	۰/۹۲۹	۰/٥۹۰	۰/٦٥٤
RMSE*	۰/۰۱۱	۲/۳۸۲	۳/۸٥۱	۰/۹۱۲	۸/۷۹۸	۳/۸۳۰	۱۰/۹۱٥
٪VAF	۷٤/۲٥	۷۱/٤۳	٥۱/۱۹	٤۰/۲۸	۹۲/٤۹	٤۹/۱٤	٤۸/٥۳

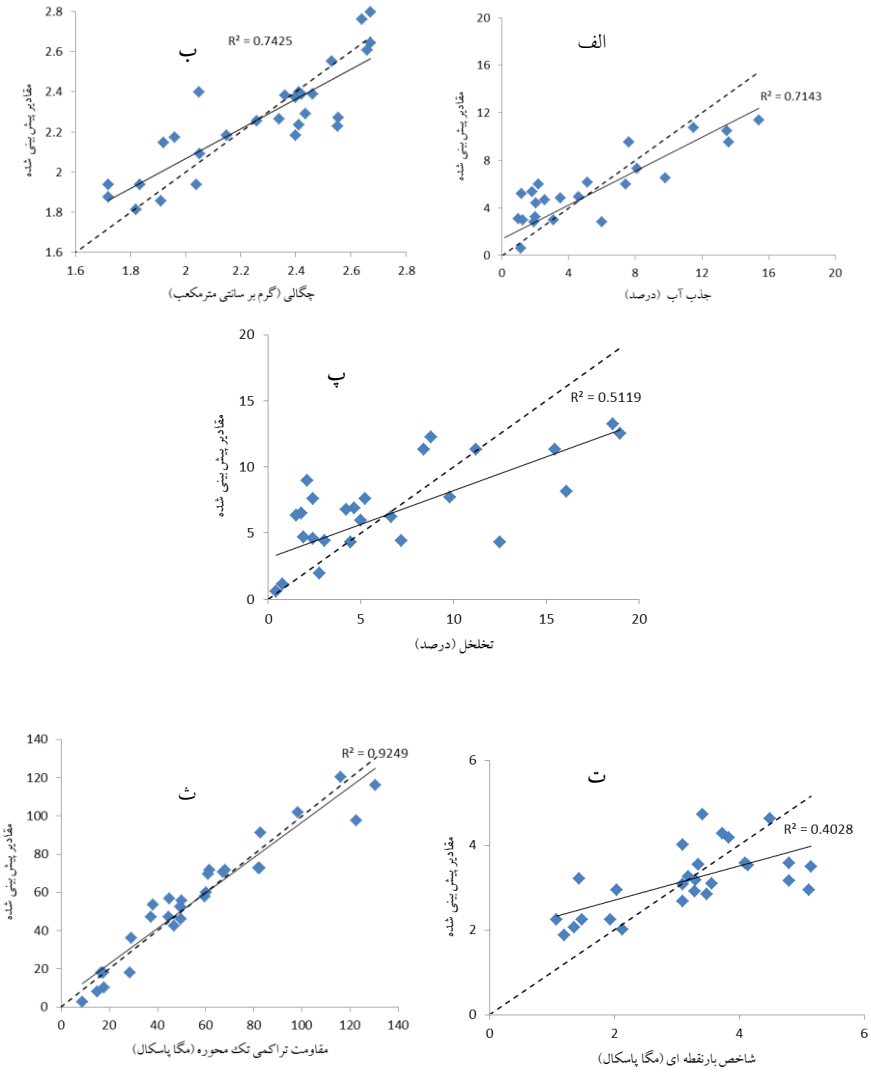
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

***حاصل از رگرسیون گام به گام پیش‌رونده که هم‌بستگی در سطح اطمینان ۰/۹۵ انجام گرفته است**

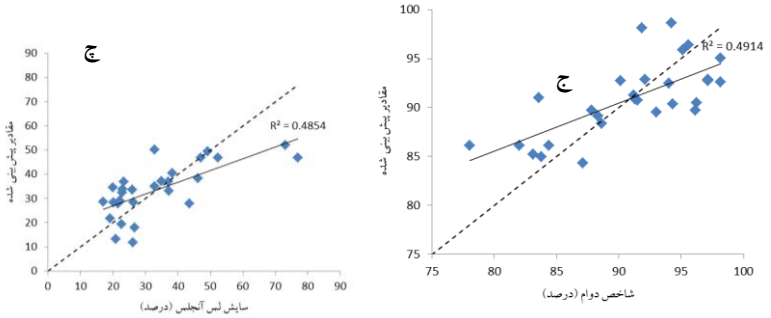
****حاصل از برازش بهترین خط**

در بهترین حالت که تمام مقادیر پیش‌بینی شده برابر مقادیر اولیه اندازه‌گیری شده باشد ضریب هم‌بستگی برابر یک، RMSE برابر صفر و VAF برابر صد می‌شود. طبق تحلیل‌های آماری انجام گرفته ضریب بافت با چگالی (r=0.862)، شاخص بار نقطه‌ای (r=0.635)، مقاومت تراکمی تک‌محوره (r=0.942) و شاخص دوام (r=0.701) رابطهٔ مستقیم و با درصد جذب آب (r=-0.845)، تخلخل (r=-0.715) و درصد سایش لس‌آنجلس (r=-0.697) رابطهٔ معکوس دارد. اگرچه مقادیر RMSE برای مقاومت به نسبت سایر پارامترها زیاد است ولی با استفاده از رابطهٔ ارائه شده بین ضریب بافت و مقاومت تک‌محوره می‌توان با دقت زیادی مقادیر مقاومت را پیش‌بینی کرد. مقادیر RMSE زیاد برای مقاومت به نسبت سایر پارامترها ناشی از آن است که محدودهٔ تغییرات مقاومت بزرگ‌تر از محدودهٔ تغییرات چگالی و یا شاخص بار نقطه‌ای است. محدودهٔ تغییرات مقاومت ۱۲۱/۸۸ و محدودهٔ تغییرات چگالی و بارنقطه‌ای به‌ترتیب ۰/۹۵ و ٤/۰۸ است (جدول ۲) درحالی که RMSE برای این محدودهٔ تغییرات مقاومت برابر ۸/۷۹۸ و برای چگالی و بارنقطه‌ای به‌ترتیب برابر ۰/۰۱۱ و ۰/۹۱۲ است. برای ارزیابی دقیق‌تر روابط، پارامتر VAF هم ارائه شده است. این پارامتر تحت تأثیر محدوده تغییرات اعداد نیست و با توجه به این‌که به درصد بیان می‌شود معیار مناسبی برای مقایسه کارایی روابط در پیش‌بینی خصوصیات مهندسی سنگ است. از ضریب بافت در پیش‌بینی ویژگی مکانیکی مقاومت تک‌محوره با VAF بالای ۹۰ درصد (جدول ۳ و شکل ۷ث) و هم‌چنین پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی شامل جذب آب و چگالی با VAF بالای ۷۰ درصد می‌توان استفاده کرد (شکل ۷ الف و ب). کم‌ترین دقت در پیش‌بینی شاخص بارنقطه‌ای و ویژگی‌های دوام شامل شاخص دوام و سایش لس‌آنجلس با VAF کم‌تر از ۵۰ درصد است (شکل ۷ ج و چ).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]



شکل ۷. نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده، خط نقطه چین: خط ۱:۱ است که تمامی مقادیر تخمین زده برابر مقادیر مشاهده‌ای است

بحث و بررسی

با افزایش ضریب بافت یعنی افزایش در تعداد دانه‌ها، ارتباط مستقیم دانه‌ها با یک‌دیگر، درجه درهم قفل‌شدگی و فشردگی دانه‌ها، افزایش اشکال نامنظم، کشیده و گوشه‌دار و اختلاف زاویهٔ دانه‌ها با یک‌دیگر؛ خصوصیات مهندسی سنگ‌های کربناته شامل مقاومت، چگالی، شاخص دوام و بار نقطه‌ای افزایش و جذب آب، تخلخل و سایش لس‌آنجلس کاهش می‌یابد. بیش‌ترین تأثیر را پارامتر ضریب بافت بر ویژگی مکانیکی مقاومت تک‌محوره و خصوصیات فیزیکی شامل چگالی و جذب آب و کم‌ترین تأثیر را بر ویژگی مکانیکی شاخص بار نقطه‌ای، خصوصیات دوام شامل شاخص دوام و سایش لس‌آنجلس و ویژگی فیزیکی تخلخل دارد. با توجه به ابهام‌های موجود در پارامتر ضریب بافت مانند در نظر نگرفتن دگرسانی و هوازدگی کانی‌ها، وجود ریز ترک‌ها، ویژگی‌های ماتریس و سیمان و ویژگی‌های مرزی دانه‌ها، احتمال می‌رود که تأثیر کم‌تر پارامتر ضریب بافت بر خصوصیاتی است که این موارد تأثیر زیادی روی آن‌ها دارد. شاید به‌دلیل اهمیت بیش‌تر پارامترهای کانی‌شناسی، دگرسانی و هوازدگی کانی‌ها، وجود ریز ترک‌ها، اندازه دانه‌ها و ویژگی‌های نوع کانی‌ها در سنگ‌های گرانیت و ریولیتی، ضریب هم‌بستگی محاسبه شدهٔ آزونی و همکاران (۱۹۹۶) و پریکرل (۲۰۰۶) کم به‌دست آمده است [۵]، [۳۰]. تأثیر مهم‌تر ویژگی‌های کانی‌شناسی نسبت به بافت در سنگ‌های آذرین را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

برخی از محققان بیان کرده‌اند. برای مثال، پاپالاردو[1] و همکاران (۲۰۱۶) بیان کرده‌اند که ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های ماگمایی عمدتاً با ترکیب کانی‌شناسی کنترل می‌شود [۲۸]. هم‌چنین اوندول[2] (۲۰۱۶) دریافت که محتوای کانی‌شناسی، میزان زمینه و تخلخل، پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر مقاومت تراکمی تک‌محوره و گسترش ترک در سنگ‌های ولکانیک هستند [۳٤].

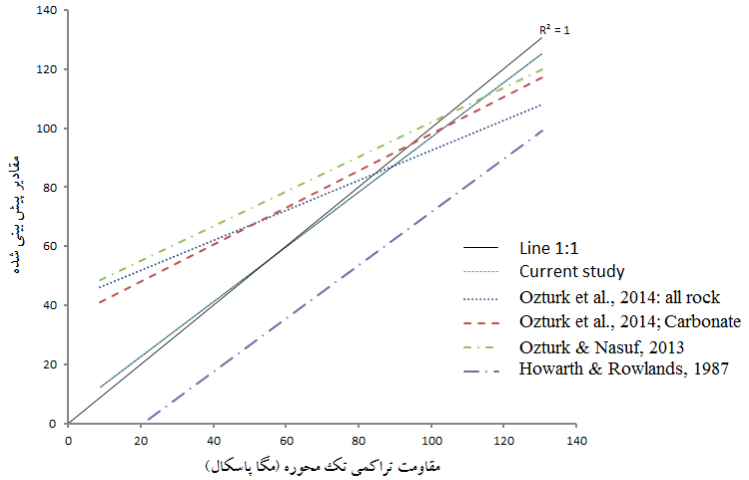
نتایج این تحقیق که بیش‌ترین هم‌بستگی بین ضریب بافت و مقاومت تراکمی تک‌محوره به‌دست آمده، مانند یافته‌های هارت و رولند (۱۹۸۷) و ازترک و همکاران (۲۰۱٤) است [۲۰]، [۲۷]. برای بررسی دقیق‌تر، رابطهٔ به‌دست آمده در این تحقیق برای مقاومت تراکمی تک‌محوره با پژوهش‌های قبلی مقایسه شده است. در جدول ٤، نوع سنگ، رابطه و ضریب هم‌بستگی بررسی‌های قبلی آورده شده است. اگرچه روند کلی روابط یک‌سان هستند و همهٔ روابط سیر صعودی را نشان می‌دهند، ولی دارای تفاوت هستند (شکل ۸). علت تفاوت می‌تواند علاوه بر تعداد و نوع سنگ ناشی از روش و دقت محاسبه ضریب بافت هم باشد. روش محاسبهٔ ضریب بافت به‌صورت دستی بسیار زمان‌بر است و هم‌چنین باعث افزایش احتمال خطای انسانی می‌شود. استفاده از روش‌های نرم‌افزاری باعث کاهش زمان و افزایش دقت می‌شود. در نتیجه استفاده از روش‌های نرم‌افزاری مانند آن‌چه در این مقاله استفاده شده است، توصیه می‌شود.

جدول ٤. روابط ارائه شده بین مقاومت و ضریب بافت در تحقیقات پیشین و تحقیق حاضر

رابطه	R^2	نوع سنگ	منبع
UCS=107.32TC-32.244	0.92	سنگ‌های کربناته	تحقیق حاضر
UCS=58.86TC+21.16	0.52	انواع مختلف سنگ	[۲۷]
UCS=72.37TC+10.38	0.87	سنگ‌های کربناته	[۲۷]
$UCS=88.32TC^{0.73}$	0.79	آهکی، مرمر، گرانیت، سرپانتین، دیاباز و گلسنگ	[۲۵]
UCS=104.80TC-55.14	0.92	گرانیت، هورنفلس، مرمر، بازالت و ماسه سنگ	[۲۰]

1. Pappalardo
2. Ündül

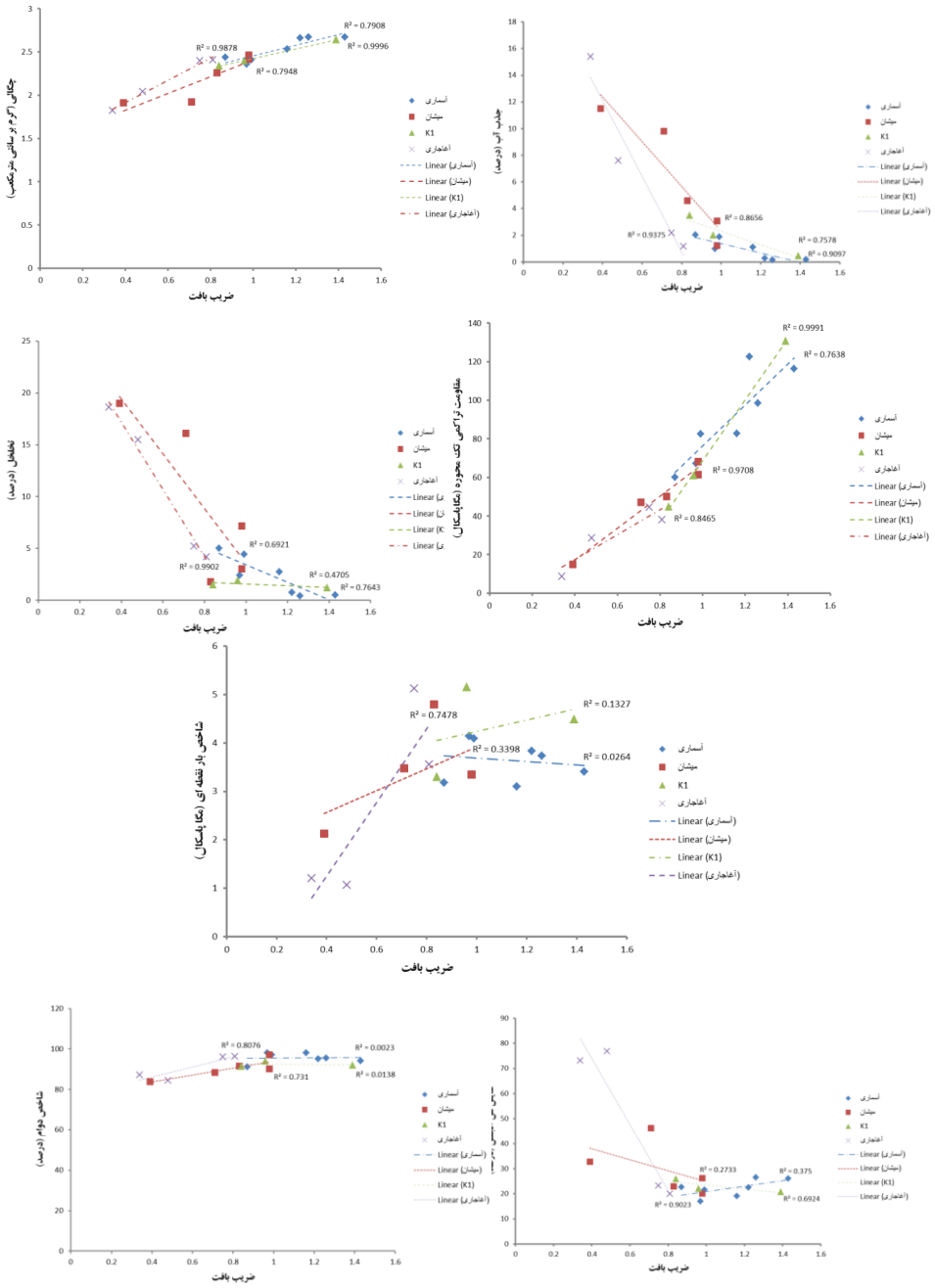
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]



شکل ۸. مقایسهٔ روابط مختلف بین ضریب بافت و مقاومت

برای آن‌که دریابیم که آیا ارتباط‌های به‌دست آمده برای سنگ‌های هر سازند به یک‌دیگر نزدیک‌تر و دقیق‌تر است یا نه، تحلیل رگرسیون خطی در نمونه‌های متعلق به هر سازند به‌صورت جداگانه انجام شده است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های رگرسیونی، فقط برای سازندهای آسماری، میشان، آغاجاری و K1 این تحلیل‌ها انجام شده است (شکل ۹). مقادیر R^2 و در نتیجه ارتباط بین ضریب بافت و ویژگی‌های فیزیکی با توجه به نوع سازند، افزایش می‌یابد. برای مثال، مقادیر محاسبه شده برای ارتباط بین ضریب بافت و چگالی با استفاده از تمامی نمونه‌ها (۲۸ نمونه)، ۰/۷۶۶ است درحالی که برای سازند آسماری ۰/۷۹۱، میشان ۰/۷۸۵، K1 ۰/۹۹۹ و آغاجاری ۰/۹۸۷ به‌دست آمده است. به‌نظر می‌رسد که ضریب بافت پارامتر خوبی برای بیان ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های کربناته است ولی محیط‌ها و شرایط رسوب‌گذاری (سازند) در آن بسیار مؤثر است. ضریب هم‌بستگی مقاومت تراکمی تک‌محوره با ضریب بافت در سازند میشان (۰/۹۷۱) و K1 (۰/۹۹) افزایش ولی در سازند آغاجاری و آسماری کاهش می‌یابد. ضریب هم‌بستگی در سایر آزمایش‌ها با توجه به نوع سازند، رفتاری پیچیده نشان می‌دهند به‌طوری‌که در برخی از سازندها دارای افزایش ضریب هم‌بستگی و در برخی هم دارای کاهش است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]



شکل ۹. نمودارهای هم‌بستگی بین ضریب بافت با سایر نتایج آزمایش‌ها به تفکیک سازند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر ضریب بافت به‌عنوان نمایندهٔ بافت سنگ روی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام در برخی از سنگ‌های کربناته پرداخته شده است. رابطهٔ ضریب بافت در اصل برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی مقاومت و قابلیت حفرپذیری در سنگ‌های مختلف ارائه شده ولی در ادامه محققان دیگر هم‌بستگی زیادی بین ضریب بافت با سایر ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها به‌دست آوردند. اگرچه رابطهٔ ضریب بافت تمام پیچیدگی‌های بافت سنگ را دربر نمی‌گیرد ولی هم‌بستگی خوبی با برخی از ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های کربناته دارد. با توجه به تحلیل‌های آماری و بررسی‌های انجام شده عدد ضریب بافت با مقاومت تراکمی تک‌محوره، چگالی، شاخص دوام و شاخص بار نقطه‌ای رابطهٔ مستقیم و با درصد جذب آب، درصد سایش لس‌آنجلس و تخلخل رابطهٔ معکوس دارد. بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی بین ضریب بافت با مقاومت تراکمی تک‌محوره $R^2= 0.92$ و کم‌ترین آن با تخلخل $R^2= 0.58$ است. با استفاده از عدد ضریب بافت و تحلیل‌های رگرسیون می‌توان مقادیر مقاومت تک‌محوره، چگالی و جذب آب را با دقت بیش از VAF=۷۰ درصد پیش‌بینی کرد. البته با مقایسهٔ روابط ارائه شده بین پژوهش‌های قبلی و این پژوهش برای مقاومت تک‌محوره درمی‌یابیم که گرچه روند آن‌ها یک‌سان است ولی تفاوت چشم‌گیری دارند. به هرحال، بررسی‌های بیش‌تری نیاز است که با تعداد نمونه بیش‌تر، روش‌های آماری دیگر و در سنگ‌های مختلف بررسی‌ها انجام شود.

منابع

1. Ajalloeian R., Mansouri H., Baradaran E., "Some carbonate rock texture effects on mechanical behavior, based on Koohrang tunnel data, Iran" Bull Eng Geol Environ, 76 (2017) 295-307.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

2. Alber M., Kahraman S., "Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient", Rock Mech. Rock Eng., 42 (2009) 117-127.
3. ASTM, "Annual Book of Standards", American Society of Testing and Materials, West Conshohocken (2013).
4. Azimian A., Ajalloeian R., Fatehi L., "An Empirical Correlation of Uniaxial Compressive Strength with P-wave Velocity and Point Load Strength Index on Marly Rocks Using Statistical Method", Geotech Geol Eng., 32 (2014) 205-214.
5. Azzoni A., Bailo F., Rondena E., Zaninetti A., "Assessment of texture coefficient for different rock types and correlation with uniaxial compressive strength and rock weathering", Rock Mech. Rock Eng., 29 (1996) 39-46.
6. Bell F. G., "Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation", Environmental Geology, 21 (1993) 187-200.
7. Bell F. G., "Petrographical factors relating to porosity and permeability in the Fell Sandstone", Eng. Geol., 11(1978)113-126.
8. Brace W. F., "Dependence of fracture strength of rocks on grain size", In: Proc. 4th Symp. Rock Mech. Univ. Park, Penn. PA., (1961) 99-103.
9. Broch E., Franklin J. A., "The point load strength test", Int J. Rock mechanic Min. Sci. & Geomech. Abstr., 9, (1972) 669-698.
10. Cobanglu I., Celik S., "Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity", Bull Eng Geol Environ, 67 (2008) 491-498.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

11. Dreyer W., "The Science of Rock Mechanics, Part I. The Strength Properties of Rocks", Series on Rock and Soil Mechanics 2, Trans Tech Publications, Clausal (1973).
12. Dube A. K., Singh B., "Effect of humidity on tensile strength of sandstone". J. Min. Met. Fuel, 20 (1972) 8-10.
13. Dunham R. J., "Classification of carbonate rocks according to depositional textures", In: Ham WE (ed) Classification of carbonate rocks, A symposium, Am Assoc. Petroleum Geologist Mem., (1962) 108-121.
14. Eberhardt E., Stimpson B., Stead D., "Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures" Rock Mech. Rock Eng., 32 (1999) 81-99.
15. Ersoy A., Waller M.D., "Textural characterization of rocks", Eng. Geol., 39 (1995) 123-136.
16. Gamble J. C., "Durability plasticity classification of shales and other argillaceous rocks" PhD thesis, University of Illinots (1971).
17. Gholamnejad J., Bahaaddini H. R., Rastegar M., "Prediction of the deformation modulus of rock masses using Artificial Neural Networks and Regression methods", Journal of Mining & Environment, Vol.4 (2013) 35-43.
18. Hoek E., "Rock Fracture Under Static Stress Conditions", CSIR Report, MEG 383, South Africa (1965).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

19. Howarth D., Rowlands J., Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties", Geotech. Test. J., 9 (1986) 169-179.

20. Howarth D., Rowlands J., "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties", Rock mechanics and rock engineering 20 (1987) 57-85.

21. ISRM, "The complete ISRM suggested methods for rock characterization", testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, Hudson (eds) Suggested methods prepared by the commission on testing methods. International Society for Rock Mechanics (2007).

22. ISRM, International Society for Rock Mechanics, "Commission on standardization of laboratory and field tests", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15 (1978).

23. Khanlari G. R., Heidari M., Noori M., Momeni A., "The Effect of Petrographic Characteristics on Engineering Properties of Conglomerates from Famenin Region, Northeast of Hamedan, Iran", Rock Mech Rock Eng., 49 (2016) 2609-2621.

24. Livingstone R. A., "The application of petrology to the prediction of stone durability", Proc. 6th. Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone, Torun (1988) 432-445.

25. Öztürk C. A., Nasuf E., "Strength classification of rock material based on textural properties", Tunnelling and Underground Space Technology 37 (2013) 45-54.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

26. Öztürk C. A., Nasuf E., Bilgin N., "The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient", J. South. Afr. Inst. Min. Metall., 104 (2004) 397-402.

27. Ozturk C. A., Nasuf E., Kahraman E., "Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture", The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy (2014) 471-480.

28. Pappalardo G., Punturo R., Mineo S., Ortolano G., Castelli F., "Engineering geological and petrographic characterization of migmatites belonging to the Calabria-Peloritani Orogen (Southern Italy)", Rock Mech. and Rock Eng., 49 (2016) 1143-1160.

29. Přikryl R., "Some microstructural aspects of strength variation in rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 38 (2001) 671-682.

30. Přikryl R., "Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: limitations and possible source of misinterpretations", Eng. Geol., 87 (2006) 149-162.

31. Singh TN, Kainthola A, Venkatesh A, "A Correlation Between Point Load Index and Uniaxial Compressive Strength for Different Rock Types", Rock Mech Rock Eng., 45 (2012) 259-264.

32. Tandon R. S., Gupta V., "The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya", Eng. Geol. 153 (2013) 125-143.

33. Ulusay R., Tureli K., Ider M. H., "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]

correlation and multivariate statistical techniques", Eng. Geol., 38 (1994) 135-157.

34. Ündül O., "Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks", Engineering Geology, 210 (2016) 10-22.

35. Williams H., Turner F. J., Gilbert C. M., Turner F. J., "Petrography: an introduction to the study of rocks in thin sections", San Francisco: WH Freeman, (1982) 626.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.5.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.487]