تأثیر اسیدیته آب و خصوصیات کانی‌شناسی بر روی شاخص دوام وارفتگی توف‌های شمال قزوین

*محمدحسین قبادی: دانشکده علوم دانشگاه بوعلی سینا همدان
علیرضا طالب بیدختی، عباس آسیابان‌ها: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، گروه زمین‌شناسی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۰/۸/۴ **پذیرش** ۹۱/۸/۱۴

چکیده

شاخص دوام وارفتگی[1]، پارامتر مهندسی مهمی در ارزیابی زوال‌پذیری[2] سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی است و ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها دارد. قابلیت وارفتگی سنگ‌ها و تأثیرپذیری آن‌ها از فرایندهای هوازدگی، از مسائل مهم در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی و معدنی است. هدف از این پژوهش، بررسی و ارزیابی تأثیر تعداد چرخه‌های آزمایش دوام در شرایط مختلف pH محیط و تأثیر ترکیب کانی‌شناسی بر دوام وارفتگی سنگ است. برای این منظور ۵ نمونه از توف با ترکیب کانی‌شناسی مختلف از رخ‌نمون‌های شمال شهر قزوین انتخاب شد. آزمایش دوام وارفتگی بر روی نمونه‌ها در پانزده سیکل و با pHهای متغیر از محلول اسیدی انجام شد. هم‌چنین آزمایش دوام وارفتگی روی نمونه‌ها در شرایط اشباع، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی و بررسی‌های پتروگرافی نمونه‌ها انجام گرفت. به‌علاوه در پایان سیکل ۱۵ به‌منظور ارزیابی تأثیر ترکیب کانی‌شناسی بر روی شاخص دوام، ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش به‌همراه رسوبات باقی مانده در کف مخزن دستگاه دوام، با آنالیزهای XRD بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص دوام وارفتگی نمونه‌ها وابسته به مقدار pH محلول در شرایط اسیدی نیست. بر این اساس میزان دوام وارفتگی نمونه‌ها بیش‌تر متاثر از ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و میزان هوازدگی است. هم‌چنین هم‌بستگی خوبی بین شاخص بار نقطه‌ای و شاخص دوام وارفتگی در سنگ‌های بررسی شده نشان داده شد.

واژه‌های کلیدی: اسیدیته، توف، شاخص دوام وارفتگی، شمال قزوین، ویژگی‌های کانی‌شناسی

*نویسنده مسئول amirghobadi@yahoo.com

۱. Slake Durability Index ۲. Degradability

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

مقدمه

بر اساس تعریف انجمن زمین‌شناسی آمریکا "توف" سنگی است که از متراکم شدن قطعات ولکانیکی با اندازه ذرات کوچک‌تر از ٤ میلی‌متر تشکیل می‌شود [۱۸]. در گذشته توف‌هایی با سختی و مقاومت متوسط، در ساخت بناها استفاده می‌شد. امروزه با گسترش شهرها و فراوانی ساخت و سازها در ایران، استفاده از این نوع سنگ به‌عنوان مصالح ساختمانی افزایش یافته است. در حال حاضر در بسیاری از مناطق البرز به‌دلیل فراوانی، سهولت استخراج و ظاهر زیبا از توف‌ها به‌عنوان سنگ‌نما، مالون و لاشهٔ سنگ در پروژه‌های مختلف از قبیل ساخت دیواره‌های حائل، پل‌سازی، بلوک جداول معابر، و در تهیهٔ شن و ماسهٔ کوهی استفاده می‌شود. یکی از معایب رفتاری این توف‌ها در کاربردهای مهندسی، هوازدگی سریع و گسترده آن‌ها است. این هوازدگی به دو صورت فیزیکی و شیمیایی بر روی سنگ عمل می‌کند و در نهایت منجر به تخریب سنگ می‌شود [۱۹]. مقدار حساسیت سنگ در مقابل هوازدگی و تغییراتی که می‌تواند در برداشته باشد با توجه به شاخص دوام وارفتگی بررسی می‌شود.

بررسی حساسیت و میزان وارفتگی سنگ‌ها، از فاکتورهای اساسی در ارزیابی رفتار مهندسی مصالح سنگی در پروژهای ژئوتکنیکی است [٦]، [۷]، [۱۰]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۷]. شاخص دوام وارفتگی به‌ویژه برای سنگ‌های سست از قبیل گل سنگ، ماسه سنگ‌های حاوی رس و سنگ‌های آذرآواری هوازده، پارامتر مهندسی مهمی در زمینهٔ پایداری شیب‌های سنگی و پایداری فضاهای زیرزمینی است.

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌هایی که برای ارزیابی دوام‌پذیری سنگ‌های سست مورد توجه قرار می‌گیرد، آزمایش دوام وارفتگی است که فرانکلین و چاندرا (۱۹۷۲) پیشنهاد کرده‌اند. عمده پژوهش‌های گذشته در خصوص ارزیابی دوام سنگ‌ها، انجام آزمایش دوام وارفتگی بر اساس دوسیکل بود [۸]. با این وجود برخی محققان تأکید کرده‌اند که انجام آزمایش دوام وارفتگی در دو سیکل برای ارزیابی دوام سنگ‌های حاوی رس مناسب به‌نظر نمی‌رسد [۵]، [۲۱]. یولوسی و همکاران به‌منظور ارزیابی دوام وارفتگی ستون‌های مارنی یک معدن زغال‌سنگ از نتایج آزمون دوام وارفتگی براساس پنج سیکل استفاده کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

افزایش تعداد چرخه‌های دوام، کاهش چشم‌گیری در شاخص دوام وارفتگی مشاهده می‌شود. هم‌چنین با آنالیز دانه‌بندی ذرات عبوری، از استوانهٔ مشبک دستگاه دوام نتیجه‌گیری کردند که با افزایش اندازهٔ دانه‌های نمونه‌ها درصد ذرات عبوری از استوانه مشبک دستگاه بعد از انجام پنج سیکل آزمایش، افزایش می‌یابد [۲۰].

تحقیقات بعدی نشان داد که دوام‌پذیری سنگ‌های آرژیلیتی، آواری و آذرآواری به‌شدت وابسته به خصوصیات پتروگرافی آن‌ها است [٤]، [۸]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٦]. بنا بر این بررسی خصوصیات کانی‌شناسی و بافتی سنگ‌ها برای ارزیابی ویژگی دوام‌پذیری الزامی است.

عامل‌های زیادی علاوه بر ماهیت سنگ بر روی دوام وارفتگی سنگ تأثیرگذار است که می‌توان به شرایط محیطی، نوع محلول استفاده شده برای آزمایش دوام و نیز تأثیر میزان هوازدگی سنگ اشاره کرد.

داکال و همکاران (۲۰۰۲) با انجام آزمون دوام‌وارفتگی بر روی انواعی از سنگ‌های رسوبی و آذرآواری نتیجه‌گیری کردند که ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی بیش‌ترین تأثیر را روی دوام‌پذیری دارند. هم‌چنین میزان دوام وارفتگی نمونه‌ها را در محلول‌های آب مقطر، Nacl و $Cacl_2$ مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که داوم‌وارفتگی نمونه‌های بررسی شده با افزایش غلظت کلرید کلسیم و کلرید سدیم موجود در محلول، افزایش می‌یابد [٦].

در سال‌های اخیر محققان به اثر pH محلول بر روی دوام‌وارفتگی سنگ‌ها توجه کرده‌اند [۱]، [۱۱]، [۱۳]، [۱۵]. گوپتا و احمد (۲۰۰۷) تأثیر تغییرات pH محلول را هم در شرایط اسیدی و هم در شرایط قلیایی بر روی سنگ‌آهک، شیل و سیلتستون با استفاده از آزمون دوام ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که دوام سنگ‌های کربناته رابطهٔ مستقیمی با کاهش pH دارد و دوام سنگ‌های غنی از کوارتز، فلدسپار و مسکویت مستقل از pH محلول است [۱۳]. قبادی و مومنی (۲۰۱۱) حساسیت دوام سنگ‌های گرانیتی به محلول‌های اسیدی در محیط‌های شهری را با استفاده از نتایج آزمون دوام‌وارفتگی ارزیابی، و نتیجه‌گیری کردند که ترکیب کانی‌شناسی و بافت، نقش مؤثرتری نسبت به اسیدیتهٔ سیال دارند [۱۱].

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

در این تحقیق، تأثیر خصوصیات کانی‌شناسی و بافتی توف‌ها تحت شرایط متغیر pH اسیدی محلول بر روی دوام‌وارفتگی بررسی شد. هم‌چنین اثر تعداد سیکل‌های آزمایش نیز بر روی شاخص دوام مورد توجه قرار گرفت. در نهایت نتایج شاخص دوام به‌دست آمده نمونه‌ها با خصوصیات کانی‌شناسی و نتایج مقاومت بار نقطه‌ای مقایسه شد.

زمین‌شناسی منطقه

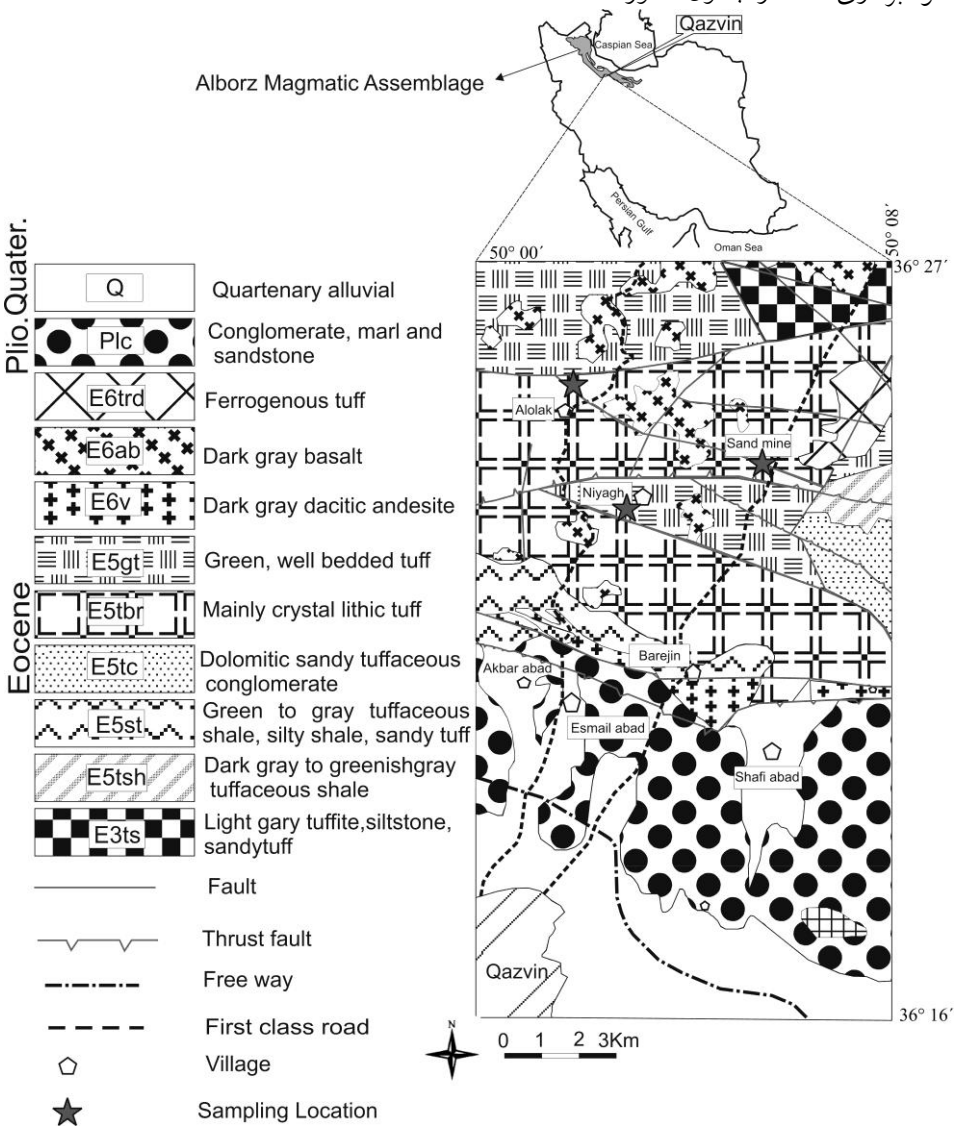
منطقهٔ پژوهش در کمربند ولکانیکی پالئوژن واقع در زون ساختاری البرزغربی دارای رخ‌نمون‌های سنگ‌های ولکانیکی و ساب ولکانیکی است. از نظر چینه‌شناسی این رخ‌نمون‌ها به سازند کرج با سن ائوسن میانی- بالایی نسبت داده می‌شود [۳]. سازند کرج به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین واحدهای چینه‌ای البرز شامل توالی نسبتاً ضخیمی از توف‌های سبز رنگ، شیل و گدازه‌های آتشفشانی است. به نظر واتان و یاسینی (۱۹٦۹) این سازند کاملاً استثنایی تقریباً در همهٔ حجم خود از مواد آذرآواری زیردریایی تشکیل شده که همراه آن از طرفی مواد آتشفشانی و نفوذی نظیر گدازه، دایک، سیل و از طرفی دیگر مواد رسوبی نظیر شیل و آهک دیده می‌شود [۲۲]. آن‌چه بیش از همه در سازند کرج دارای اهمیت است توف‌های سبز رنگی است که در نتیجه رسوب‌گذاری مواد آتشفشانی در نزدیکی سطح دریا به‌وجود آمده است. در محدودهٔ شمال شهر قزوین این سازند از سنگ‌های پیروکلاستیک با تنوع لیتولوژیکی تشکیل شده است که اغلب با میان لایه‌هایی از سنگ‌های رسوبی دیده می‌شوند (شکل ۱). نهشته‌های پیروکلاستیک توف که در انواع مختلف توف شیشه‌ای، لیتیک توف، کریستال توف در حجم‌های عظیم در منطقهٔ پژوهش یافت می‌شوند منبع بزرگی برای تأمین شن و ماسه کوهی و نیز مصالح ساختمانی هستند. از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، منطقهٔ پژوهش نسبتاً چین‌خورده و به‌شدت تکتونیزه است و کنتاکت اکثر واحدها گسلی است.

نمونه‌های سنگی بررسی شده در این تحقیق از رخ‌نمون‌های سنگ‌های آذرآواری موجود در ترانشه‌های معادن روباز گردآوری شده‌اند. بدین‌منظور پنج نوع توف با ترکیب مینرالوژی مختلف انتخاب شد (جدول ۱). موقعیت محل نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. واحدهای سنگی انتخاب شده برای نمونه‌برداری ابتدا بر اساس مشاهدات صحرایی و سپس بر

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

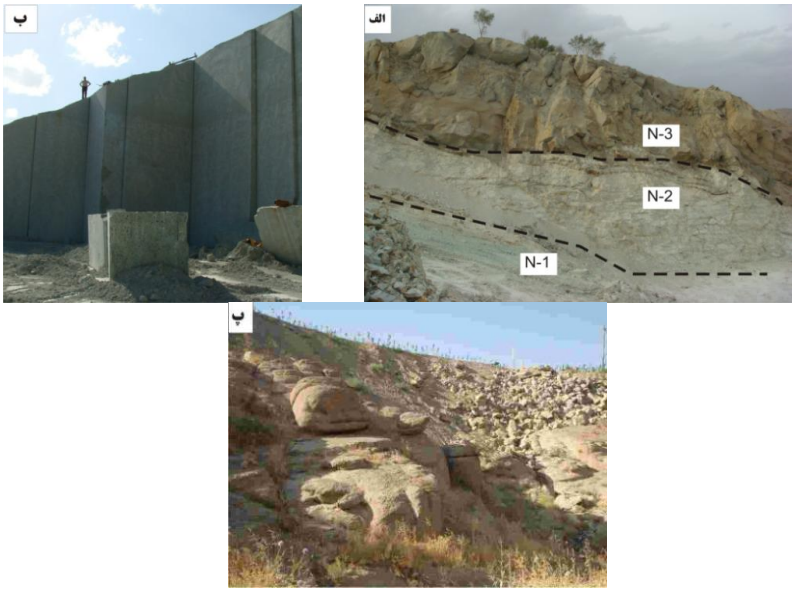
اساس پژوهش‌های پتروگرافی در آزمایشگاه بررسی شد. سه نوع از پنج نوع انتخابی (N-1، N-2 و N-3) از معدن بنتونیت نیاق و دو نمونهٔ دیگر (A-4 و M-5) به‌ترتیب از معدن سنگ ساختمانی الولک و معدن ماسهٔ کوهی زرشک انتخاب شد (شکل۲). مشخصات عمومی واحدهای نمونه‌برداری شده در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. موقعیت و نقشهٔ زمین‌شناسی منطقهٔ پژوهش [۲]

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]



شکل ۲. نمایی از الف) معدن بنتونیت نیاق، ب) معدن سنگ ساختمانی آلولک، پ) معدن ماسهٔ کوهی زرشک

جدول ۱. توصیف مختصر از واحدهای توفی بررسی شده در منطقهٔ شمال قزوین

توصیف	رنگ	شماره واحد توف
نسبتاً سخت، دارای ریز شکستگی‌های صفحه‌ای، میکرو کریستالین با لایه‌بندی نازک	سبز روشن	N-1
سخت، میکروکریستالین و دارای لایه‌بندی متوسط تا ضخیم	خاکستری متمایل به سفید	N-2
نرم، درشت بلور، هوازده، درزه‌دار و بسیار ضخیم لایه	سبز	N-3
سخت، کریستالین، ماسیو، بدون هوازدگی همراه با شکستگی‌های بسیار کم	سبز متمایل به سفید همراه با لکه‌های سبز	A-4
نسبتاً سخت، کریستالین، نسبتاً هوازده ، لایه‌بندی ضخیم و دارای شکستگی	قهوه‌ای	M-5

ویژگی‌های کانی‌شناسی

عوامل زمین‌شناسی کنترل‌کننده رفتار مکانیکی سنگ‌ها به دو گروه داخلی شامل خواص و ویژگی‌های سنگ و عوامل خارجی شامل فرایندهایی که در محیط اطراف سنگ در یک بازهٔ زمانی برروی سنگ تأثیر می‌گذارند، تقسیم می‌شوند. عوامل داخلی شامل ترکیب کانی‌شناسی،

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

بافت، صفحات ضعف، درجهٔ آلتراسیون کانی‌ها، اندازهٔ دانه‌ها، شکل دانه‌ها، دانسیتهٔ فشردگی سنگ، درجهٔ درهم قفل‌شدگی، نوع کنتاکت، میزان، نوع سیمان یا خمیره (در صورت موجود بودن) است [۹]. در این پژوهش ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات بافتی نمونه‌های سنگ با میکروسکوپ پلاریزان و دستگاه XRD بررسی شد. بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونهٔN-1 بسیار ریزدانه و دگرسان شده است. اندازهٔ دانه‌های آن کوچک‌تر از ٦۳ میکرون است. بررسی مقاطع نازک این سنگ نشان می‌دهد که تعدادی شکستگی با وضعیت تصادفی با پرشدگی سیلیس در متن سنگ وجود دارد (شکل ۳. الف). نمونهٔ N-2 مانند نمونهٔ N-1 بسیار ریزدانه و دارای خمیره‌ای شیشه‌ای(ویتریک توف) است. نمونهٔ N-3 درشت‌دانه و دانه‌های نیمه، زاویه‌دار و شکسته شده‌اند. میانگین اندازهٔ ذرات بین ۱ تا ٤ میلی‌متر متغیر است. بررسی مقاطع نازک این نمونه نشان می‌دهد که درصد کریستال‌ها بین ٦۰ تا ٦۵٪ و و درصد خمیرهٔ شیشه‌ای بین ۳۵ تا ٤۰٪ متغیر است. نمونهٔ N-3 توفی بلوری با ترکیب کانی‌شناسی کوارتز (۳۵٪-۳۰)، پلاژیوکلاز (۲۵٪-۲۰) و سانیدین (۵٪) و کانی‌های اوپک (۲٪-۱) است. فلدسپات‌های موجود و خمیره در این سنگ بسیار هوازده شده و به کانی‌های رسی آلتره شده است. چنان‌که در شکل ۳ پ نشان داده شده است هوازدگی شیمیایی در مرز بین کریستال‌های پلاژیوکلاز و خمیره وجود دارد و لایه‌ای از کانی‌های رسی را تولید کرده است. در نتیجه منجر به حساسیت زیاد این سنگ نسبت به جذب آب و کاهش شدید مقاومت آن شده است.

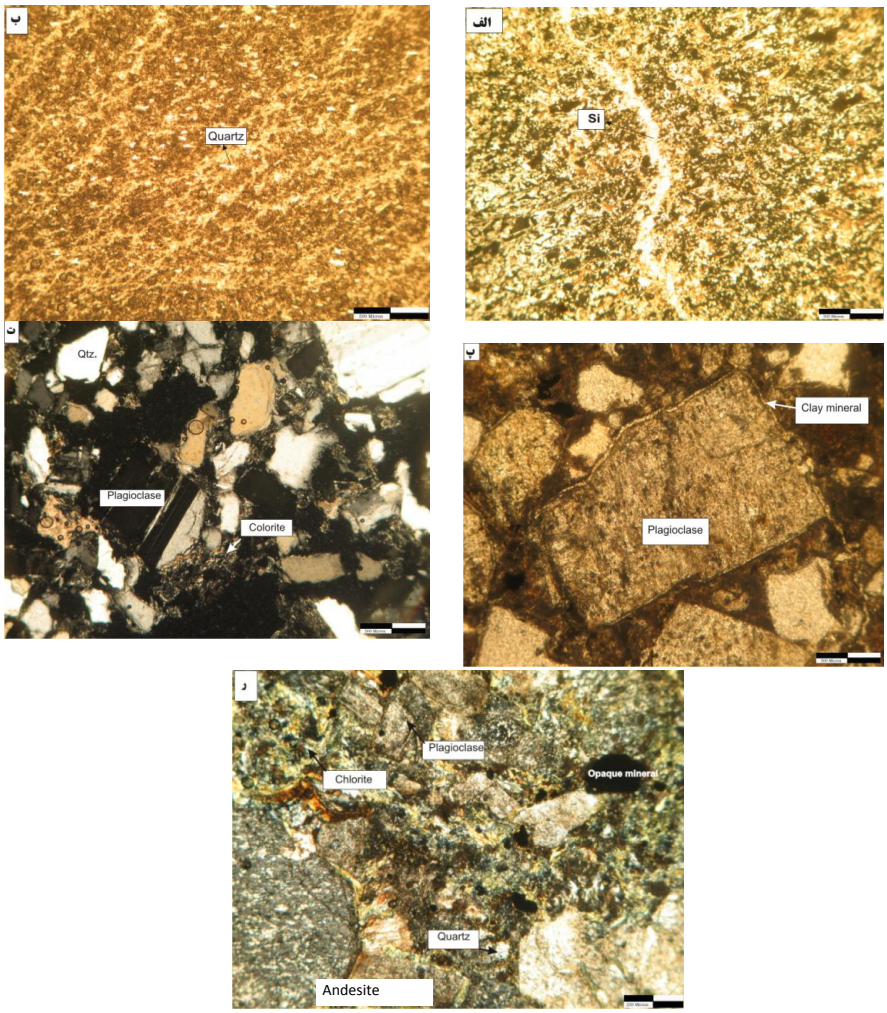
نمونهٔ A-4 توفی بلوری است که شامل ۳۵٪ کوارتز، ۳۵٪ فلدسپار و ۳ تا ٤٪ کانی‌های اوپک و ۲۵٪ شیشه ولکانیکی در خمیره است. به‌علاوه مقدار کمی کلریت، کلسیت و سیلیس ثانویه در خمیره آن مشاهده می‌شود. متوسط اندازهٔ بلورها بین ۱ تا ۳ میلی‌متر متغیر است. دانه‌ها زاویه‌دار و از درجهٔ درهم قفل‌شدگی مناسبی برخوردارند.

نمونهٔ M-5 کریستالی لیتیک توف است که خرد سنگ‌های آن آندزیتی است. بررسی مقاطع نازک این نمونه نشان می‌دهد که درصد خمیرهٔ شیشه‌ای بین۳۰ تا ۳۵٪ و درصد کریستال‌های آن بین ٦۵ تا ۷۰٪ متغیر است. فراوانی پلاژیوکلاز (۳۰٪ تا ۳۵٪) بیش‌تر از بیوتیت و کانی‌های اوپک است. در این مقطع اکثر فنوکریست‌های بیوتیت به کلریت آلتره

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

شده‌اند و نیز دگرسان شدن خمیرهٔ شیشه‌ای به کلریت و کانی‌های رسی نیز در مقاطع دیده می‌شود. متوسط اندازهٔ دانه‌ها بین ۱ تا ۵ میلی‌متر متغیر است و کریستال‌ها زاویه‌دار و نیمه شکل دارند. درصد کانی‌های اوپک موجود در مقاطع نازک این نمونه در حدود ۱۰٪ و متوسط اندازهٔ آن‌ها درحدود ۰/۲ میلی‌متر است.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک نمونه‌های توف الف) نمونهٔ N-1، بسیار ریزدانه (ویتریک توف). ب) نمونهٔ N-2، بسیار ریزدانه (ویتریک توف) پ) نمونهٔ N-3، درشت‌دانه (کریستالین توف) ت) نمونهٔ A-4، درشت‌دانه (کریستالین توف) ر) نمونهٔ M-5 درشت‌دانه (کریستال لیتیک توف)

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

روش انجام تحقیق

به‌منظور انجام تحقیق ده بلوک از سنگ‌های معادن روباز منطقهٔ پژوهش انتخاب و به آزمایشگاه منتقل گردید. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از قبیل وزن واحد حجم خشک، وزن واحد حجم اشباع، درصد جذب آب، تخلخل، وزن مخصوص ویژه و شاخص بار نقطه‌ای هر نمونه تعیین شد (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی توف‌های بررسی شده

شماره نمونه	وزن واحد حجم(g/cm^3) خشک (γ_d)	اشباع (γ_{sat})	درصد جذب آب (ω_a)%	تخلخل (n) %	وزن مخصوص ویژه	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای (Mpa)
N-1	۲/۱۱	۲/۲۸	۸/۱	۱۵	۲/٥٤	٤/۲۳
N-2	۲/۱۳	۲/۲۷	٦/۲	۱۳/٤	۲/٤٥	٦/٤۷
N-3	۲/۰۷	۲/۱۹	٥/٥	۱۱/۹	۲/۳٤	۱/۷۱
A-4	۲/۲٥	۲/۳٥	٤/۱	۹/٤۷	۲/٤۸	٤/٤۷
M-5	۲/۳٦	۲/٤۳	۳/۱	۷/۷٥	۲/٥٥	٦/۲۷

چنان‌که در بخش قبلی اشاره شد این سنگ‌ها از نظر خصوصیات کانی‌شناسی و بافتی دارای پنج نوع مختلفند (جدول ۱). آزمایش دوام‌وارفتگی بر اساس آزمون استاندارد پیشنهاد شده به‌وسیلهٔ انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۷۹) انجام گرفت [۱٤]. برای انجام آزمون دوام‌پذیری برای هر نوع سنگ در pHهای مختلف، ۱۰ قطعه ٤۰ تا ٦۰ گرمی آماده شد. در تهیهٔ نمونه‌ها سعی شد که نمونه‌ها کروی و فاقد گوشه‌های زاویه‌دار باشند. نمونه‌ها در استوانهٔ مشبک در داخل مخزن دستگاه‌دوام قرار می‌گیرد. ظرف استوانه‌ای با سرعت ۲۰ دور در دقیقه و به‌مدت۱۰ دقیقه دوران داده می‌شود. سپس بعد از انجام آزمایش و قرار دادن نمونه‌ها در گرم‌خانه افت‌وزنی نمونه‌ها در پایان هر سیکل محاسبه می‌گردد. به‌منظور ارزیابی اثر تعداد سیکل‌های آزمایش بر روی دوام‌وارفتگی، آزمایش دوام‌وارفتگی در ۱٥ سیکل انجام شد. هم‌چنین به‌منظور ارزیابی اثر pH آب بر روی میزان انزوال و تخریب توف‌ها، آزمایش دوام

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

وارفتگی با محلول‌های با pHهای ۲/۵، ٤ و ۵/۵ انجام پذیرفت. محلول‌های اسیدی با اضافه کردن مقدار مناسبی از اسید سولفوریک به آب مقطر تهیه شده است.

به‌منظور بررسی اثر اشباع شدن نمونه‌ها بر روی زوال سنگ‌ها، آزمایش دوام‌وارفتگی بر روی نمونه‌های اشباع نیز انجام پذیرفت. در این حالت نمونه‌های دوام خشک شده در آون قبل از انجام آزمایش دوام‌وارفتگی در آب قرار می‌گیرد و اشباع می‌شوند. علاوه بر این برای ارزیابی تغییرات کانی‌شناسی نمونه‌ها و تعین نوع کانی‌ها (به‌ویژه کانی‌های کربناته و رسی) روش متفاوتی به‌کار برده شد. هدف از این روش ارزیابی نوع کانی‌هایی که از نمونه‌های دوام سنگ در حین آزمایش دوام‌وارفتگی جدا می‌شوند، است. بدین منظور موادی که از توری استوانه مشبک درحین آزمایش خارج شدند و وارد مخزن دستگاه‌دوام شدند به ظرف شیشه‌ای منتقل شدند و در آون قرار گرفتند و بعد از خشک شدن رسوبات، آنالیز XRD بر روی آن‌ها و هم‌چنین بر روی نمونه‌های سنگ بکر صورت پذیرفت. نتایج آنالیز XRD بر روی نمونه‌های سنگ بکر و نیز رسوبات عبور کرده از استوانه مشبک دستگاه دوام وارفتگی بعد از انجام ۱۵ سیکل آزمایش در شکل ٤ نشان داده شده است.

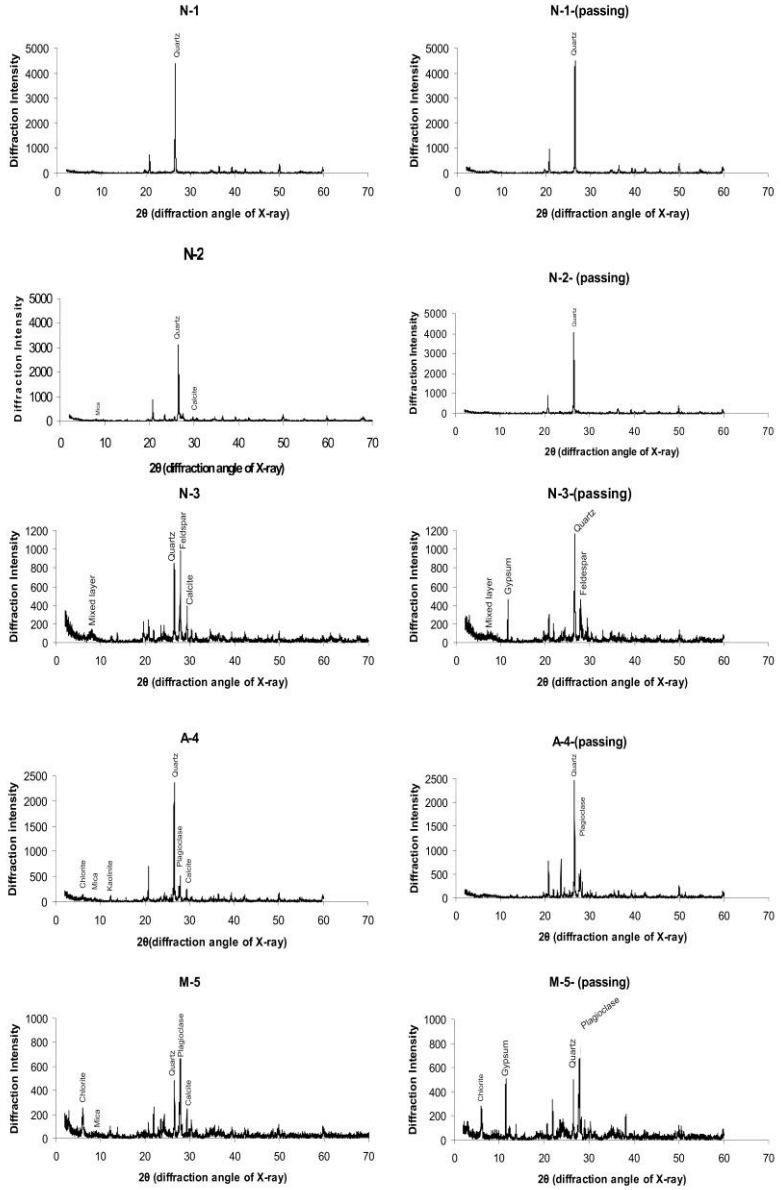
نتایج آنالیز XRD بر روی سنگ بکر قبل از انجام آزمون و رسوبات باقی مانده در کف مخزن دستگاه آزمایش پس از پانزده سیکل انجام آزمون دوام وارفتگی در نمونه‌های A-4, N-3و M-5 نشان‌دهندهٔ وجود ژیپس در رسوبات باقی‌مانده است. در نمونه N-2، کلسیت در رسوبات باقی‌مانده دیده نمی‌شود. رسوبات باقی‌مانده در کف مخزن از نمونه N-3 نشان می‌دهد که درصد کوارتز نسبت به نمونه سنگ بکر افزایش و نسبت فلدسپار کاهش یافته است (جدول ۳).

جدول ۳. کانی‌های موجود در سنگ بکر و رسوبات عبور کرده از استوانه مشبک دستگاه بعد از ۱۵ سیکل بر اساس آنالیز XRD

شمارهٔ نمونه	کانی‌های موجود در سنگ قبل از انجام آزمایش	کانی‌های موجود در رسوب بعد از انجام آزمایش
N-1	کوارتز	کوارتز
N-2	کوارتز – میکا – کلسیت	کوارتز– میکا
N-3	کوارتز – فلدسپار – کلسیت – کانی‌های رسی	کوارتز – فلدسپار – ژیپس – کانی‌های رسی
A-4	کوارتز – پلاژیوکلاز – کائولینیت. – کلریت – میکا – کلسیت	کوارتز – پلاژیوکلاز – کائولینیت. – کلریت – میکا – ژیپس
M-5	کوارتز – پلاژیوکلاز – کلریت – میکا – کلسیت	کوارتز – پلاژیوکلاز – کلریت – میکا – ژیپس

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]



شکل ٤. نتایج آنالیز XRD بر روی نمونه‌های سنگ بکر (نمودارهای سمت چپ) و رسوبات عبور کرده از استوانه مشبک (نمودارهای سمت راست) بعد ازانجام ۱۵ سیکل آزمایش دوام وارفتگی (کدهای مربوط در بالای شکل‌ها نشان‌دهندهٔ شمارهٔ واحد سنگ‌ها است).

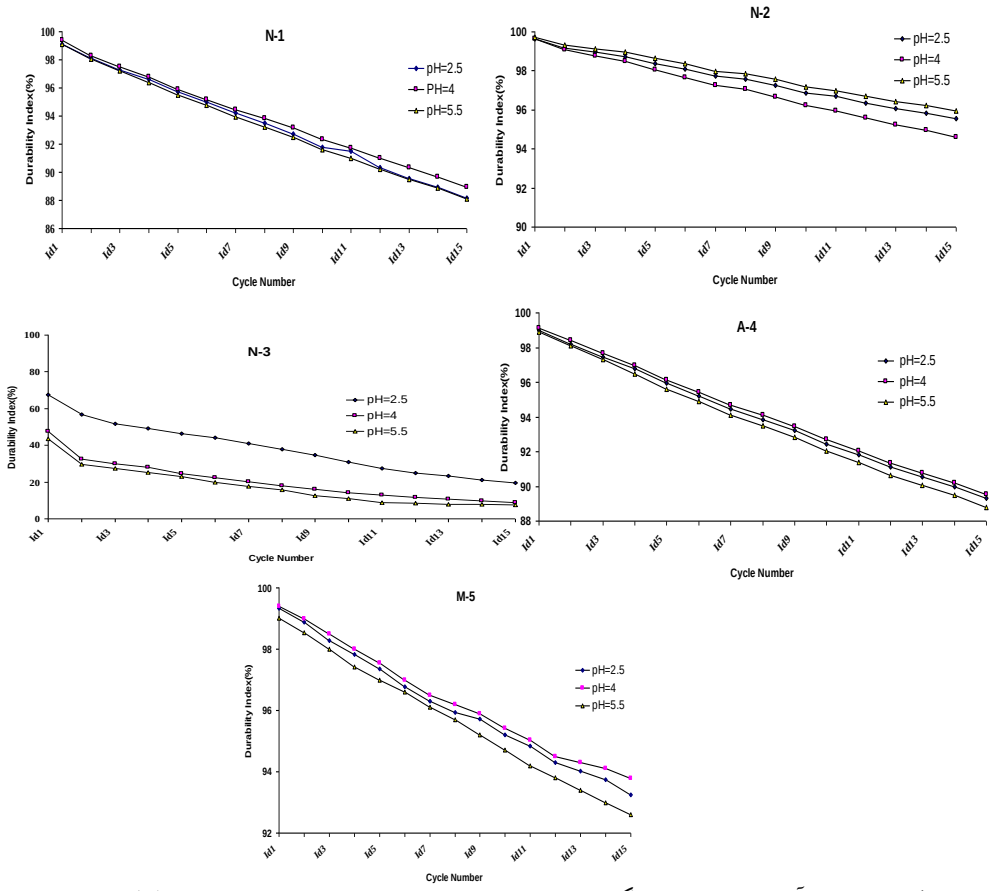
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

ارزیابی نتایج

نتایج آزمون دوام وارفتگی بر روی ۵ نمونه از توف‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود مقادیر افت وزنی بین سیکل اول و پانزدهم (Id_1-Id_{15}) برای چهار نمونه از توف‌ها (N-1, N-2, A-4, M-5) دارای محدودهٔ نسبتاً نزدیکی است در حالی‌که این مقدار (Id_1-Id_{15}) برای نمونه N-3 زیاد و در حدود ۳۰٪ افت وزنی است.

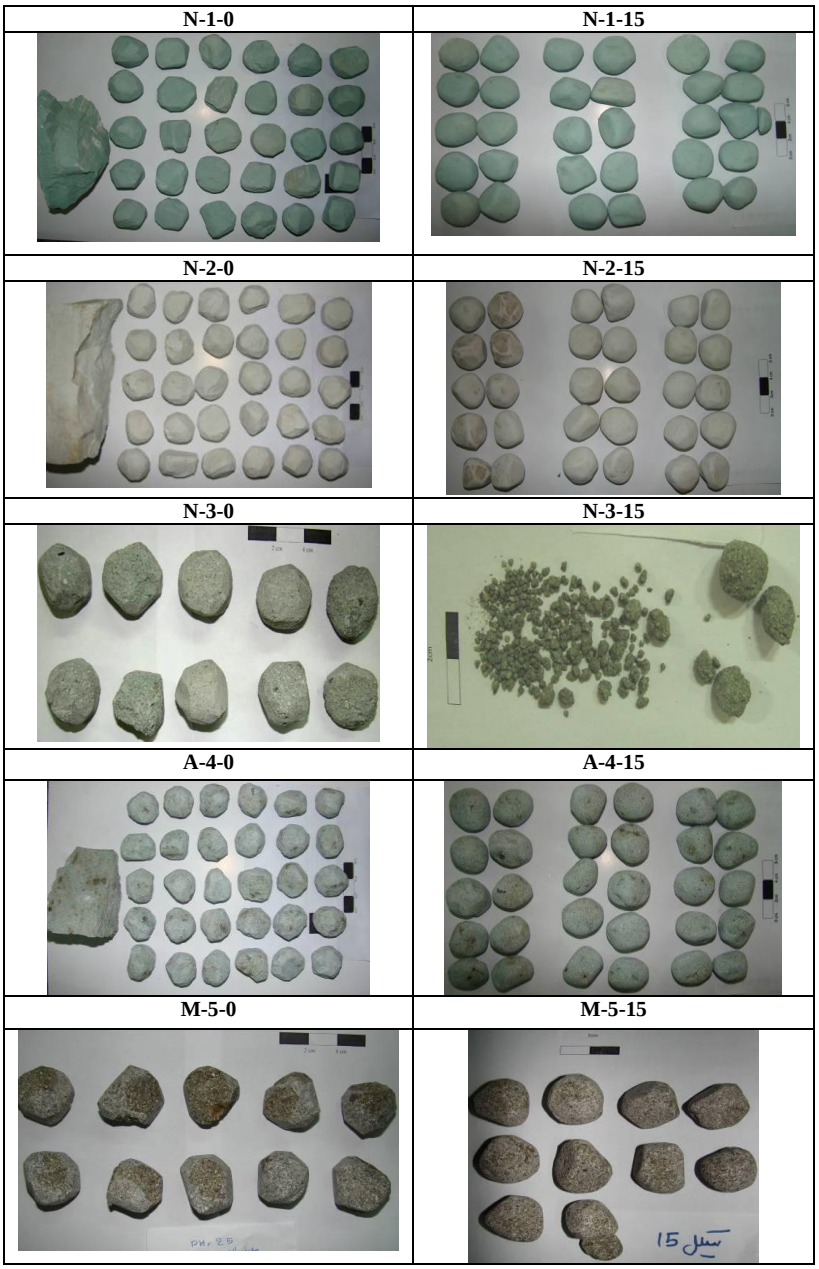
تغییر در شکل نمونه‌های دوام بعد از انجام ۱۵ سیکل آزمایش دوام در شکل ٦ نشان داده شده است. این تغییرات به‌طور مشخصی تفاوت در دوام وارفتگی توف‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نتایج آزمایش دوام وارفتگی بر روی نمونه‌های بررسی شده با استفاده از محلول‌های با اسیدیته مختلف (علائم موجود در شکل، در جدول ۱ توصیف شده‌اند).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]



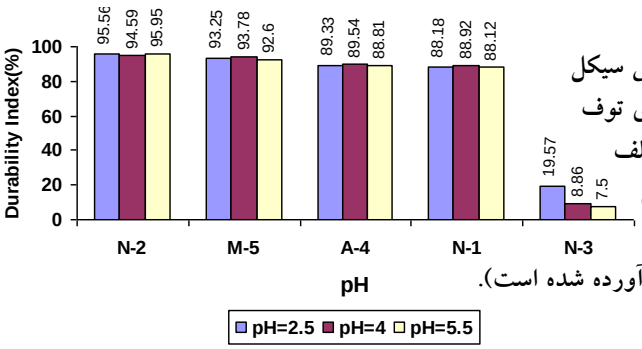
شکل ٦. تغییرات در شکل نمونه و اندازه نمونه‌های دوام بعد از ۱۵ سیکل از انجام آزمون دوام وارفتگی در pH=2.5، کدهای بالای هر عکس نشان‌دهندهٔ نوع سنگ (جدول ۱) و تعداد سیکل آزمون دوام است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

چنان‌که در شکل ۵ و۷ مشاهده می‌شود هیچ الگوی مشخصی بین شاخص دوام وارفتگی و pH محلول استفاده شده در آزمون دوام وارفتگی وجود ندارد. با این وجود در نمونهٔ N-3 با افزایش pH شاخص دوام وارفتگی کاهش می‌یابد. نتایج ۱۵ سیکل آزمون دوام وارفتگی نمونه‌های توف در شرایط pH متغیر اسیدی نشان می‌دهد که تأثیر بافت سنگ بر روی شاخص دوام بیش‌تر از قدرت یونی محلول استفاده شده برای آزمون دوام وارفتگی در شرایط اسیدی است. نمونهٔ N-3 با میانگین شاخص دوام وارفتگی پانزده سیکل به میزان ٪۱۱/۹۷ در محلول با pH مختلف که کم‌ترین مقدار شاخص دوام در بین نمونه‌هاست، هوازده، دارای بافت کریستالین، درشت دانه و تخلخل زیاد نسبت به سایر نمونه‌ها است. در حالی که نمونه N-2 با بیش‌ترین میانگین شاخص دوام وارفتگی سیکل پانزدهم در شرایط متغیر pH اسیدی به میزان ٪۹۵/۲٤ داری بافت میکرو کریستالین است. میانگین شاخص دوام وارفتگی برای سیکل ۱۵ بر روی نمونه‌های M-5، A-4 و N-1 در شرایط مختلف اسیدیته محلول مورد آزمایش به‌ترتیب٪ ۹۳/۲۱، ٪۸۹/۲۲ و ٪۸۸/٤۰ است که نشان‌دهندهٔ دوام‌پذیری خیلی زیاد است.

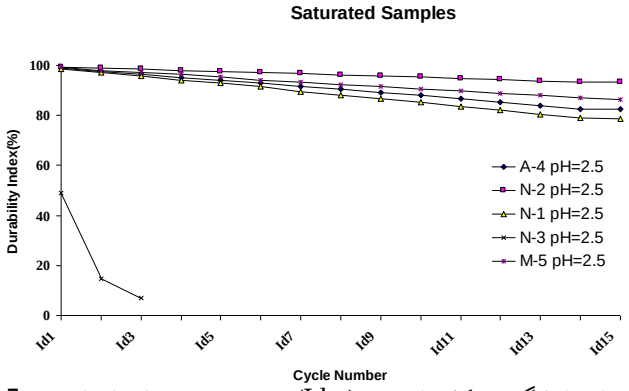
نتایج آزمون دوام وارفتگی بر روی نمونه‌های اشباع در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، زمانی که نمونه‌ها در شرایط اشباع تحت آزمایش دوام وارفتگی قرار می‌گیرند شاخص دوام سیکل پانزدهم آن‌ها کم‌تر از حالتی است که به‌طور خشک مورد آزمایش دوام وارفتگی قرار می‌گیرند.



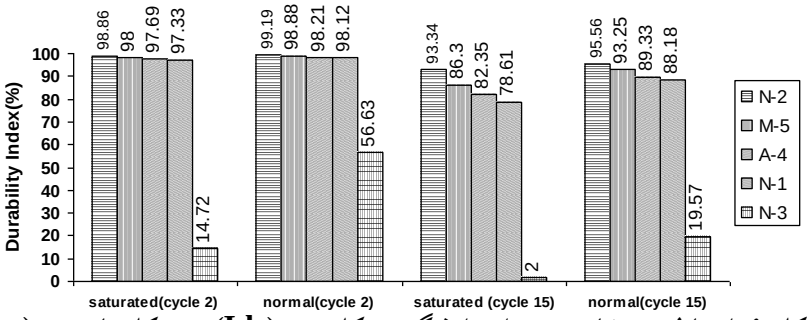
شکل ۷. شاخص دوام وارفتگی سیکل پانزدهم (Id_{15}) برای نمونه‌های توف بررسی شده تحت شرایط مختلف اسیدیته محلول در آزمون دوام وارفتگی(مشخصات نشانه‌های نمونه‌های سنگی در جدول ۱ آورده شده است).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

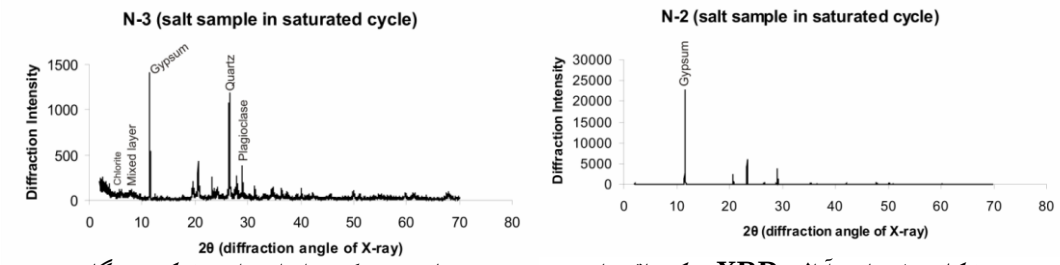


شکل ۸. شاخص دوام وارفتگی سیکل پانزدهم (Id_{15}) بر روی نمونه‌های اشباع در pH=2.5



شکل ۹. ارتباط بین شاخص دوام وارفتگی سیکل دوم (Id_2) و سیکل پانزدهم (Id_{15}) برای نمونه‌های مختلف توف که تحت شرایط اشباع و خشک در pH=2.5 آزمایش شده‌اند.

پس از انجام آزمون دوام وارفتگی بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع و انتقال رسوبات کف مخزن دستگاه به ظرف شیشه‌ای و خشک کردن رسوبات، نوعی نمک در رسوب نمونه‌های N-2 و N-3 مشاهده گردید. آنالیز XRD این نمک وجود کانی ژیپس را مشخص کرد (شکل ۱۰).

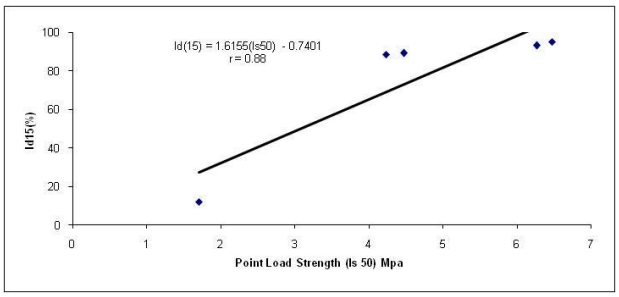


شکل ۱۰. نتایج آنالیز XRD نمک باقی‌مانده بر روی رسوبات عبورکرده از استوانه مشبک دستگاه دوام در انتهای سیکل پانزدهم در حالت اشباع برای نمونه‌های N-2 و N-3

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که دوام وارفتگی توف‌های بررسی شده به‌طور مستقیم وابسته به‌میزان مقاومت آن‌ها است. در شکل ۱۱ ارتباط بین شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و شاخص دوام وارفتگی برای انواع توف‌های بررسی شده نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۱۱ نشان داده شده است هم‌بستگی مثبت مناسبی (r=0.88) بین این دو پارامتر وجود دارد. بنا بر این شاخص دوام با افزایش مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱. رابطهٔ بین مقاومت بار نقطه‌ای و شاخص دوام وارفتگی برای سیکل پانزدهم نمونه‌های بررسی شده

چنان‌که در جدول ٤ نشان داده شده است هم‌بستگی خوبی بین شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و مقادیر دوام وارفتگی منتج شده از سیکل‌های مختلف وجود دارد.

جدول ٤. معادلات رگرسیون و ضریب هم‌بستگی(r) برای ارتباط بین مقادیر شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و شاخص دوام وارفتگی در سیکل‌های مختلف

Cycle number	Equation	R
2	Id(2) = 1.1588(Is50) + 31.983	0.85
5	Id(5) = 1.2966(Is50) + 22.435	0.86
10	Id(10) = 1.5097(Is50) + 7.6335	0.87
15	Id(15) = 1.6155(Is50) - 0.7401	0.88

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش ارزیابی دوام وارفتگی در محلول‌های اسیدی با pHهای متفاوت بر روی نمونه توف‌های سازند کرج در شمال قزوین است. نتایج به‌دست آمده گویای این است که دوام وارفتگی نمونه‌ها عمدتاً تحت تأثیر ترکیب کانی‌شناسی، بافت و شدت هوازدگی سنگ است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

مقادیر به‌دست آمده ار آزمون‌های دوام نشان می‌دهد که الگوی مشخصی بین شاخص دوام وارفتگی نمونه‌های مختلف و pHهای متفاوت محلول استفاده شده در آزمایش در شرایط اسیدی وجود ندارد.

به‌نظر می‌رسد. که با کاهش اندازهٔ بافت، شاخص دوام وارفتگی افزایش می‌یابد. بر این اساس توف‌های شیشه‌ای شاخص دوام بالاتری نسبت به توف‌های بلوری دارند. از این رو، نمونه N-2 دارای بالاترین دوام وارفتگی است. کم بودن مقدار دوام نمونه N-1 در مقایسه با دیگر نمونه‌های درشت‌دانه به‌دلیل حضور ریز شکستگی‌های موجود در زمینه سنگ است.

در نمونه‌های درشت‌دانه مقادیر شاخص دوام وارفتگی به‌مقدار فلدسپار و میزان هوازدگی آن‌ها بستگی دارد. کاهش شدید در مقادیر دوام نمونه N-3 به‌دلیل شدت دگرسانی پلاژیوکلاز و وجود کانی‌های رسی و کلریت است. به‌ویژه دگرسان شدن سطح تماس بین پلاژیوکلاز و خمیره عامل مهمی در کاهش شاخص دوام‌پذیری است. مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌های دوام‌پذیری نشان می‌دهد که شاخص دوام وارفتگی نمونه‌های اشباع شده کم‌تر از نمونه‌های اشباع نشده است. با توجه به کافی نبودن زمان لازم برای اشباع نمونه‌ها در طی انجام آزمایش دوام وارفتگی استاندارد (۱۰ دقیقه) توصیه می‌شود برای ارزیابی صحیح شاخص دوام وارفتگی سنگ در طی چرخه‌های خشک و تر شدن متوالی از انجام این آزمون بر روی نمونه‌های اشباع استفاده شود.

نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد در صورت وجود کانی کلسیت به میزان کافی درسنگ‌های بررسی شده، واکنش این کانی با اسید سولفوریک موجود در محلول، مطابق فرمول زیر ژیپس ثانویه تولید می‌کند (جدول ۳). برای نمونه N-2 احتمالاً میزان کلسیت در نمونهٔ سنگ بکر برای انجام واکنش ناچیز بوده است. بنا بر این در مناطق دارای هوای آلوده و با احتمال بارش باران‌های اسیدی استفاده از این نوع سنگ‌ها در نمای ساختمان‌ها توصیه نمی‌شود.

$$Caco_3+H_2so_4 \rightarrow Caso_4+Co_2+H_2o$$

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های آزمون دوام وارفتگی، پیوند بین دانه‌های موجود در سنگ در اثر تر وخشک شدن متوالی ضعیف‌تر شده و با ادامه

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

این روند پیوندهای ضعیف گسسته شده و دانه‌ها به آسانی از سنگ اولیه خارج می‌شوند. انجام آزمایش دوام در چند سیکل، نتایج قابل استنادتری را برای ارزیابی دوام وارفتگی سنگ‌ها نسبت به انجام دو سیکل فراهم می‌آورد.

نتایج به‌دست آمده بر اساس مقادیر رگرسیون محاسبه شده ($r= 0.88$)، بیان‌گر وجود هم‌بستگی قوی بین شاخص بار نقطه‌ای و شاخص دوام وارفتگی است. با وجود رابطهٔ مستقیم بین هم‌بستگی و تعداد سیکل‌های آزمون دوام وارفتگی، با افزایش تعداد سیکل‌ها ضریب هم‌بستگی نیز افزایش می‌یابد.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از زحمات جناب آقای دکتر بهروز رفیعی دانشیار محترم گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا در انجام آنالیزهای XRD و همکاری جناب آقای دکتر حسن محسنی استادیار محترم گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا برای بررسی مقاطع نازک سنگ، سپاس‌گزاری و قدردانی می‌گردد.

منابع

۱. جمشیدی، ا.، نیکودل، م. ر.، حافظی‌مقدس، ن.، *مقایسه اثر محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک بر دوام وارفتگی نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی*، مجموعه مقالات دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، جلد دوم (۱۳۸۷) ۱۲٦–۱۲۰.

۲. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، *نقشهٔ زمین‌شناسی چهارگوش قزوین*، شمارهٔ ٦۰٦۲، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، تهران.

3. Asiabanha A., Ghasemi H., Meshkin M., "Paleogene continental-arc type volcanism in North Qazvin", North Iran: facies analysis and geochemistry, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Vol.186 (2) (2009) 201-214.
4. Beavis F. C., "Engineering Geology", Blackwell, Melbourne, (1985) 231.
5. Bell F. G., Entwisle D. C., Culshaw M. G., "A geotechnical survey of some British Coal Measures mudstones", with particular emphasis on durability, Journal of Engineering Geology, Vol.46 (1997) 115-129.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

6. Dhakal G., Yoneda T., Kato M., Kaneko K., "Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks", Engineering Geology, Vol. 65 (2002) 31-45.
7. Dick J. A., Shakoor A., "Characterizing durability of mud rocks for slope stability purposes", Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, Vol. 10 (1995) 121-130.
8. Dick J. C., Shakoor A., "Lithological controls of mud rock durability", Quarterly Journal Engineering Geology, Vol. 25 (1992) 31-46.
9. Erosy A., Waller M. D, "Textural characterization of rocks", Engineering Geology, Vol. 39 (1995) 123-136.
10. Franklin J. A., Chandra A., "The slake durability test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences", Vol. 9 (1972) 325-341.
11. Ghobadi M. H., Momeni A. A., "Assessment of granitic rocks degradability susceptive to acid solutions in urban area", Environmental Earth Science, Vol. 64 (2011) 753-760.
12. Gokceoglu C., Ulusay R., Sonmez H., "Factor affecting the durability of selected weak and clay bearing rocks from turkey", with particular emphasis on influence of number of drying and wetting cycles, Engineering Geology, Vol. 57 (2000) 215-237.
13. Gupta V., Ahmed I., "The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from Lesser Himalaya", India, Engineering Geology, Vol. 95 (2007) 79-87.
14. ISRM, "Commission on Standardization of Laboratory and Field tests", suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]

properties. International journal rock mechanic mining science, Vol. 16 (1979) 48-156.

15. Kayabali K., Beyaz T., Kolay E., "The effect of the pH of the testing liquid on the slake durability of gypsum", Bull. Eng. Geol. Env. Vol. 65 (2006) 65-71.
16. Kuhnel R. A., Van der Gaast S. J., Brych J., Laan G. J., Kulnig H., "The role of clay minerals in durability of rocks observations on basaltic rocks", Jouranal Applied Clay Science, Vol. 9 (1994) 225-237.
17. Rodrigues J. G., "Physical characterization and assessment of rock durability through index properties", Applied Sciences, Vol. 200 (1991) 7-34.
18. Smyth R. C., Sharp J. M., "The hydrology of tuffs, in Heiken, G., ed., Tuff- Their properties, uses, hydrology, and resources, Geological Society of America Special Paper 408 (2006) 91-111.
19. Steindlberger E., "Volcanic tuffs from Hesse (Germany) and their weathering behavior", Enviromental Geology, Vol. 46 (2004) 378-390.
20. Ulusay R., Arikan F., Yoleri M. F., Caglan D., "Engineering geological characterization of coal mine waste material and an evaluation in the context of back-analysis of spoil pile instabilities in a strip mine SW Turkey", Engineering Geology, Vol. 40 (1995a) 77-101.
21. Ulusay R., Ozkan I., Unal E. (1995b) "Characterization of weak stratified and clay-bearing rock masses for engineering applications", in Myer, L. R., et al., eds., Fractured and Jointed Rock Masses Conference, June3-5, Lake Tahoe, CA. A. A. Balkema, Rotterdam (1992) 29-235.
22. Vatan A., Yasini I., "Geology of alborz mountain around Tehran", University of Tehran, Faculty of Engineering Pub. No.14 (1969) 36-63.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.4.6]