بررسی اثر رطوبت، دما و فشار بر مقدار سختی واجهشی چکش اشمیت در سنگ‌های مختلف

هادی عطاپور*؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، واحد اراک،
محمدرضا اکبری؛ دانشگاه صنعتی اصفهان،
مهدی ترکاشوند؛ دانشگاه تهران

تاریخ: دریافت ۹۲/۷/۲۲ **پذیرش** ۹۳/۱۰/۹

چکیده

چکش اشمیت امکان اندازه‌گیری سریع و ارزان سختی سطح سنگ را به‌صورت برجا و آزمایشگاهی فراهم می‌آورد. این پارامتر به‌طور گسترده در تخمین خواص مکانیکی سنگ‌ها از جمله مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب یانگ استفاده می‌شود. سختی واجهشی چکش اشمیت هم‌چنین می‌تواند در ارزیابی کیفیت ساختاری سنگ، پیش‌بینی پارامترهای حفرپذیری[1] و برش‌پذیری[2] و میزان سایندگی سنگ، هوازدگی آن و تعیین مقاومت دیوارهٔ درزه استفاده شود. عوامل مختلفی مانند ابعاد نمونهٔ آزمایش شده، زبری سطح، هوازدگی، محتوای رطوبت، نوع چکش اشمیت و روش اندازه‌گیری و غیره بر نتایج سختی واجهشی اشمیت اثر می‌گذارند. در مقالهٔ حاضر بعد از مرور نتایج تحقیق‌های اخیر انجام گرفته در زمینهٔ تأثیرات این عوامل، به بررسی آزمایشگاهی اثر عوامل رطوبت، درجهٔ حرارت و بارگذاری تک‌محوری بر سختی واجهشی اشمیت چندین نوع سنگ سالم و نیز نمونهٔ بتن پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان داد که رطوبت عموماً سبب کاهش مقدار سختی واجهشی اشمیت سنگ می‌شود. میزان این کاهش وابسته به نوع سنگ است. هم‌چنین دما تأثیر زیادی بر مقدار سختی واجهشی اشمیت دارد. رابطهٔ بین کاهش سختی با افزایش حرارت برای سنگ‌های آزمایش شده، به شکل خطی بوده است. از طرفی اندازه‌گیری سختی نمونهٔ تحت بارگذاری تک‌محوره نشان داد که اعمال بار روی سنگ، سبب افـزایش سختی واجهشی اشمیت نمونه می‌شود. به این امر باید

* **نویسنده مسئول** atapour@aut.ac.ir

1. Excavability, drillability
2. Cuttability

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

اندازه‌گیری برجای سختی در دیوارهٔ فضاهای زیرزمینی که سنگ‌ها تحت بارگذاری قرار دارند، مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سختی واجهشی چکش اشمیت، رطوبت، درجه حرارت، بارگذاری تک‌محوره

مقدمه

سختی سنگ از ویژگی‌هایی است که مقاومت آن را در مقابل تغییر شکل ماندگار نشان می‌دهد. چندین عامل سختی سنگ‌ها را کنترل می‌کنند. از جملهٔ این عوامل می‌توان به ترکیب کانی‌شناسی، مواد سیمانی سنگ و چگالی آن اشاره کرد. روش‌های مختلفی از قبیل سختی شور[1]، موس[2] و سختی واجهشی چکش اشمیت[3] (SRH) برای ارزیابی سختی سطح سنگ‌ها در فعالیت‌های مهندسی به‌کار گرفته شده است. سختی واجهشی چکش اشمیت (SRH) بیش از نیم قرن است که به‌طور گسترده استفاده شود. این وسیله به‌علت قابل حمل بودن، سادگی، سرعت اندازه‌گیری و غیرمخرب بودن به‌طور فزاینده‌ای در سطح جهان در حال به‌کارگیری است [۱]. از دیگر مزایای چکش اشمیت می‌توان به امکان انجام آزمایشگاهی و نیز اجرای برجای آزمایش اشاره کرد [۱۵]. در تحقیقی که ترابی و جوانشیر (۱۳۸۵) انجام داده‌اند، اعتبار کاربرد چکش اشمیت به‌صورت برجا در برآورد مقاومت سنگ در معدن زغال‌سنگ طرزه ارزیابی شده است.

چکش اشمیت ابتدا به‌عنوان ابزاری برای آزمایش غیرمخرب بتن (به‌عنوان ماده‌ای مهندسی) در اواخر دهۀ ۱۹٤۰ توسعه یافت. سپس از اوایل دهۀ ۱۹٦۰ در مکانیک سنگ (به‌عنوان ماده‌ای طبیعی) به‌طور عمده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب یانگ سنگ استفاده شد. از طرفی امروزه اغلب برای ارزیابی قابلیت حفاری و قابلیت برش‌پذیری سنگ، در کنار عواملی هم‌چون ترکیب کانی‌شناسی، اندازۀدانه‌ها و شکنندگی سنگ، از سختی سنگ استفاده می‌شود [۲۰]. هم‌چنین از چکش اشمیت جهت تعیین کیفیت سنگ در صنعت معدن (در

1 . Shore hardness
2 . Mohs
3 . Schmidt rebound hardness (SRH)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

ساخت سازه‌های سنگی در روش جبهه کار طولانی، روش اتاق پایه و معدن‌کاری روباز)، صنعت تونل‌کاری و سدسازی استفاده می‌شود [۱۹]. از دیگر کاربردهای سختی واجهشی اشمیت که گوکتان و گونس (۲۰۰۵) شرح داده‌اند، می‌توان به این موارد اشاره کرد: تعیین وضعیت هوازدگی سنگ [۷]، [۱۷]، ارزیابی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ [۲۲]، اجرای TBM و رودهدر [۵]، [۹]، ارزیابی میزان نفوذ دستگاه حفاری [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]، تعیین مقاومت دیوارهٔ درزه [۱۰].

با توجه با تاریخ طولانی و استفادهٔ گسترده از پارامتر سختی واجهشی اشمیت، انتظار می‌رود که استانداردهای استفاده شده برای آزمایش چکش اشمیت ASTM[1] (۲۰۰۱)، ISRM[2] (۱۹۷۸)، سبب اندازه‌گیری مقادیر معتبر و تکرارپذیر سختی برای انواع مختلف سنگ‌ها شوند. تحقیقات منتشر شده بیش‌تر بر روش‌های جمع‌آوری داده‌ها و توسعهٔ روابط هم‌بستگی جدید (بین سختی و دیگر پارامترهای سنگ) برای سنگ‌های متفاوت متمرکز شده‌اند. در هر حال اثر عواملی مانند ابعاد نمونهٔ آزمایش شده، زبری سطح، محتوای رطوبت، هوازدگی و غیره بر سختی واجهشی اشمیت، موجب تضعیف اطمینان‌پذیری نتایج چکش اشمیت می‌شود [٤]. بنابراین با شناخت این عوامل و اثر آن‌ها، باید تا حد امکان تأثیر این عوامل را از سختی اندازه‌گیری شده حذف کرد تا عدد به‌دست آمده معرف واقعی سنگ بوده و تکرارپذیر باشد. این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر درجهٔ حرارت، رطوبت و بارگذاری تک‌محوره بر سختی واجهشی اشمیت در سنگ‌های مختلف می‌پردازد. به‌طوری‌که با آگاهی از اثرات این عوامل و در نظر داشتن آن‌ها در آزمایش‌ها می‌توان ضمن کاستن از پراکندگی داده‌های حاصل از چکش اشمیت، سبب افزایش اعتبار و اطمینان به نتایج آن شد.

بررسی‌های آزمایشگاهی

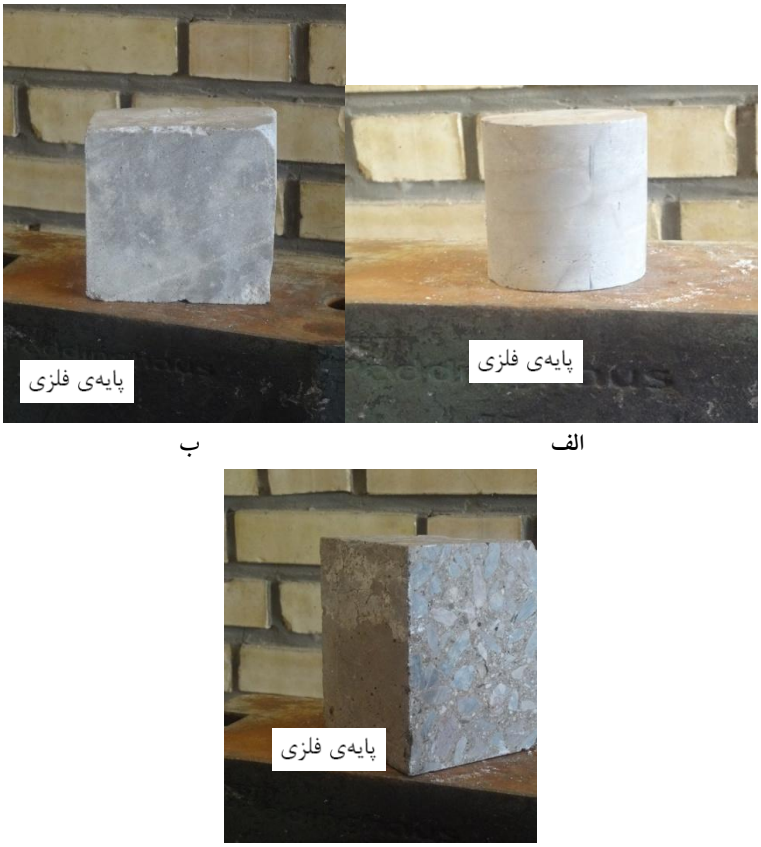
۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی اثر عوامل رطوبت و درجه حرارت بر مقدار سختی حاصل از چکش اشمیت، نمونه‌هایی از سنگ‌های گرانیت، تراورتن، ماسه‌سنگ، مرمر و بتن به‌شکل مکعب‌هایی با حدود

1. American society for testing and materials
2. International society rock mechanics

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

میانگین ابعادی ۱۰۰×۱۰۲×۱۱۰ میلی‌متر و هم‌چنین از سنگ آهک مغزهٔ با قطر و طول برابر با ٦۹/۷ و ٦۸/۳ میلی‌متر تهیه شد. در شکل ۱ برخی از این نمونه‌ها نشان داده شده‌اند. نمونه‌ها در تحقیق حاضر با رعایت ابعاد پیشنهادی استاندارد ISRM تهیه شده‌اند. نمونه‌ها طوری تهیه شدند که عاری از هر گونه شکستگی یا ضعف ساختاری باشند. سطوح آزمایش شده نیز کاملاً صاف و بدون ناهمواری بوده است. برخی از خواص فیزیکی این نمونه‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است.



الف ب ج

شکل ۱. نمونه‌های آزمایش شده شامل الف) سنگ مرمر، ب) آهک و پ) نمونهٔ بتن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

جدول ۲. خواص فیزیکی نمونه‌های آزمایش شده

	گرانیت	تراورتن	ماسه سنگ	سنگ آهک	بتن	مرمر
چگالی خشک (gr/mm^3)	۲/٦۱	۲/۵	۲/۳٤	۲/۲۲	۲/۳۱	۲/۷۷
تخلخل ٪	۲/٤۷	٦/۱۲	٤/۷	۱/۲	۱٤/۳٦	۱/۲۵

۲. جزئیات آزمایش‌ها

برای تعیین سختی، از چکش اشمیت نوع N استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها طبق استاندارد ISRM انجام گرفت. به‌طوری که نمونه‌ها روی پایه‌ای فلزی قرار داده شد تا در حین انجام آزمایش هیچ حرکتی در آن‌ها ایجاد نشود (شکل ۲). سپس چکش اشمیت به‌شکل عمودی رو به پایین روی نمونه‌ها قرار گرفت و ۲۰ قرائت در نقاط مختلف نمونه‌ها برداشت شد. سپس داده‌ها به‌شکل نزولی مرتب شد و بعد از حذف ۱۰ قرائت پایین‌تر، از بقیهٔ داده‌ها میانگین گرفته شد و به‌عنوان سختی نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

شکل ۲. چکش اشمیت به‌همراه پایهٔ فلزی سنگین

برای بررسی اثر رطوبت بر سختی واجهشی اشمیت سنگ‌های آزمایش شده، نمونه‌ها در دو حالت اشباع و خشک تحت آزمایش چکش اشمیت قرار گرفتند. برای انجام آزمایش در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

حالت اشباع، ابتدا نمونه‌ها حدود ٦ ساعت در آب غوطه ور شدند. سپس نمونه‌ها از آب خارج و بعد از خشک کردن آب سطح نمونه‌ها، بلافاصله سختی آن‌ها تعیین شد.

به‌منظور بررسی اثر درجه حرارت بر سختی واجهشی اشمیت، نمونه‌ها در دماهای مختلف شامل دمای طبیعی آزمایشگاه، ۱۱۰، ۲۱۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد با چکش اشمیت آزمایش شدند. برای هر یک از دماهای فوق، نمونه‌ها در حدود ٤ ساعت در داخل کوره قرار گرفته و سپس بلافاصله بعد از خروج از کوره سختی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

برای بررسی اثر فشار اعمالی بر سنگ بر روی سختی اندازه‌گیری شده، نمونهٔ آزمایش شده به شکل محوری طی چندین مرحله تحت بارگذاری قرار گرفت و در هر سطح بارگذاری سختی نمونه اندازه‌گیری شد. در این حالت نمونه به شکل قائم تحت بارگذاری تک‌محوره قرار گرفته و چکش اشمیت به شکل افقی برای برداشت سختی استفاده شد.

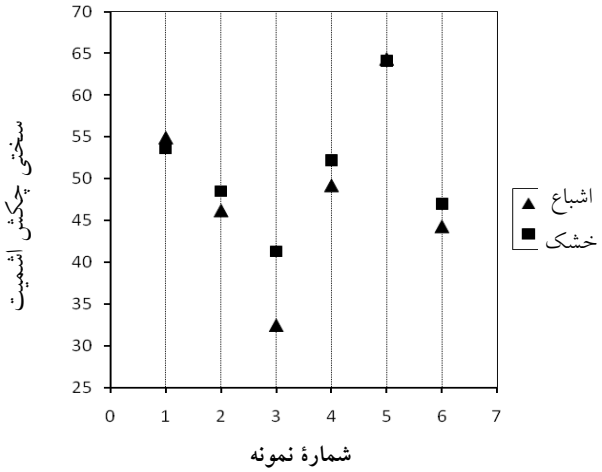
نتایج و بحث

۱. اثر رطوبت بر سختی

یکی از نکته‌های مهمی که در پژوهش‌های نمونه‌ها در آزمایشگاه اهمیت دارد، توجه به تغییرات رطوبت نمونه در طی مراحل نمونه‌گیری، انتقال و نگه‌داری در آزمایشگاه نسبت به رطوبت طبیعی و برجای سنگ‌ها است. زیرا تغییرات محتوای رطوبت می‌تواند خواص مکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. به‌منظور بررسی اثر رطوبت بر سختی واجهشی اشمیت سنگ‌ها، چندین نوع سنگ در حالت خشک و اشباع آزمایش شدند. نمودار شکل ۳، اثر رطوبت را بر سختی واجهشی اشمیت نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشخص است، برای نمونه‌های مرمر، بتن، ماسه‌سنگ و تراورتن سختی واجهشی اشمیت در حالت اشباع نسبت به حالت خشک کاهش یافته است. برای نمونهٔ گرانیت و سنگ آهک سختی تغییر محسوسی نداشته و در حد بسیار اندکی افزایش نشان داده است. علت این‌که سختی نمونه‌های گرانیت و سنگ آهک چندان تحت تأثیر رطوبت قرار نگرفته‌اند، می‌تواند مربوط به تخلخل کم این نمونه‌ها به‌همراه بافت متراکم و پیوستهٔ این سنگ‌ها باشد. در هر صورت سختی نمونهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

مرمر با وجود تخلخل کم، با رطوبت کاهش یافته است. این امر می‌تواند مرتبط با بافت ضعیف و دانه‌ای سنگ مرمر استفاده شده در آزمایش باشد.



شکل ۳. اثر رطوبت بر سختی واجهشی چکش اشمیت در سنگ‌های مختلف

با توجه به ارتباط سختی واجهشی اشمیت با دیگر خواص سنگ از جمله مقاومت فشاری و ضریب یانگ، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری و ضریب یانگ این سنگ‌ها نیز با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. کاهش مقدار چشم‌گیر مقاومت در اثر رطوبت در پژوهش‌های انجام شده اوجو[1] و بروک[2] (۱۹۹۰) مشاهده شده است. محققان دیگری نیز در این زمینه بررسی کرده‌اند [٦]، [۱۱]. این محققان مقادیر متغیری از کاهش مقاومت در اثر رطوبت در محدودهٔ ٦ تا ۸۵٪ مشاهده کرده‌اند [۱۸].

این نتایج بیان‌گر این است که در تحلیل پایداری سازه‌های سنگی، باید کاهش مقاومت سنگ در نتیجهٔ حضور آب را لحاظ کرد. این امر به‌خصوص در فعالیت‌های معدنی، که آب موجود در محیط عمدتاً دارای خاصیت اسیدی زیادی است، اهمیت بیش‌تری دارد. هم‌چنین با در نظر گرفتن اثر رطوبت بر مقاومت و تغییر شکل‌پذیری سنگ، می‌توان با ایجاد زهکشی در محیط و خشک کردن رطوبت محیط، سبب افزایش چشم‌گیری در مقاومت سنگ‌ها شد. از طرفی کاهش مقاومت سنگ با افزایش رطوبت می‌تواند در فعالیت‌های حفاری و آتش‌باری مد نظر قراره گرفته و سودمند واقع شود.

1. Ojo
2. Brook

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

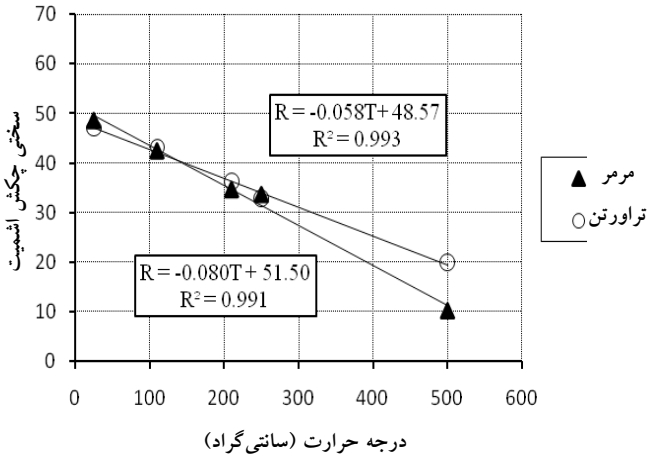
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

۲. اثر حرارت بر سختی

در برخی از فعالیت‌های ژئوتکنیکی از جمله مباحث انرژی ژئوترمال، دفن زباله‌های اتمی و هم‌چنین بررسی مکانیسم رخداد زلزله در اعماق، خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ در دماهای بیش‌تر اهمیت می‌یابد. از آن‌جاکه سختی واجهشی چکش اشمیت معیاری از مقاومت فشاری تک‌محورهٔ و نیز مدول یانگ سنگ‌ها است، بنابراین نتایج حاصل از بررسی اثر درجه حرارت بر سختی واجهشی اشمیت را می‌توان به اثر درجه حرارت بر مقاومت فشاری و ضریب یانگ نمونه‌ها تعمیم داد. از این رو در تحقیق حاضر به بررسی اثر دما بر سختی واجهشی چکش اشمیت می‌پردازیم. در شکل ٤، اثر افزایش درجه حرارت بر سختی واجهشی اشمیت نمونه‌های سنگ مرمر و سنگ تراورتن نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشخص است، با افزاش درجه حرارت مقدار سختی به شکل کاملاً خطی کاهش یافته است. مقدار کاهش برای نمونهٔ مرمر بیش‌تر از نمونهٔ تراورتن بوده است.



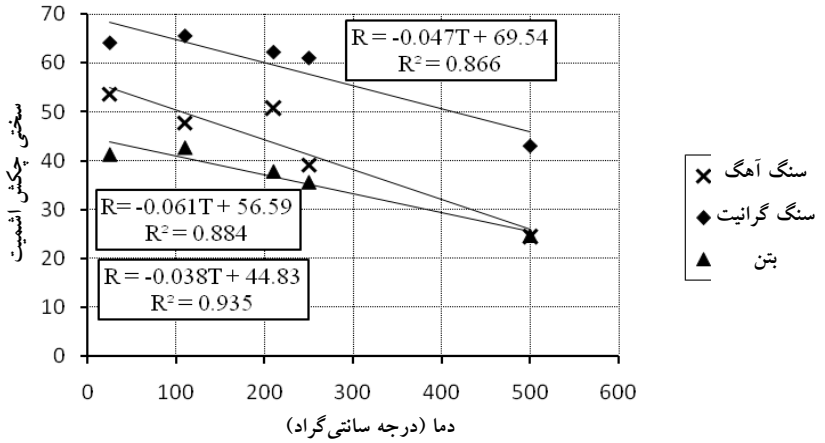
شکل ٤. اثر دما بر سختی واجهشی اشمیت نمونه‌های سنگ مرمر و تراورتن

رابطهٔ خطی موجود بین سختی واجهشی اشمیت و درجهٔ حرارت برای سنگ‌های تراورتن و مرمر را می‌توان بدین‌ترتیب نوشت:

$$R = -0.058T + 48.6 \quad (۲)$$

$$R = -0.08T + 51.5 \quad (۳)$$

شکل ۵، نحوهٔ اثر درجه حرارت بر سختی واجهشی اشمیت نمونه‌های سنگ آهک، گرانیت و نمونهٔ بتن را نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشخص است، در این نمونه‌ها نیز با افزایش درجه حرارت سختی واجهشی اشمیت به شکل خطی کاهش یافته است. نکته‌ای که باید اشاره کرد این است که با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه، سختی نمونه‌های گرانیت و بتن تغییر چندانی نداشته است. این در حالی است که در این بازهٔ دما، سختی نمونه‌های سنگ آهک، تراورتن و مرمر که دارای جنس آهکی هستند، کاهش یافته است.



شکل ۵. اثر دما بر سختی واجهشی اشمیت نمونه‌های سنگ آهک، گرانیت و نمونهٔ بتن

معادله‌های (٤)، (۵) و (٦) به‌ترتیب رابطهٔ سختی با دما را برای نمونه‌های سنگ آهک ، بتن و گرانیت نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن روابط موجود بین سختی و مقاومت فشاری و ضریب یانگ، می‌توان میزان و نحوهٔ کاهش این پارامترها با دما را ارزیابی کرد. در هر حال مشخص است که با افزایش درجه حرارت، از حالت الاستیک سنگ‌ها کم شده و به حالت پلاستیک آن‌ها افزده شده است.

$$R = -0.061T + 56.6 \quad (٤)$$

$$R = -0.038T + 44.8 \quad (۵)$$

$$R = -0.047T + 69.5 \quad (٦)$$

با توجه به معادله‌های مذکور، رابطهٔ خطی زیر برای اثر دما بر سختی سنگ‌ها پیشنهاد می‌شود:

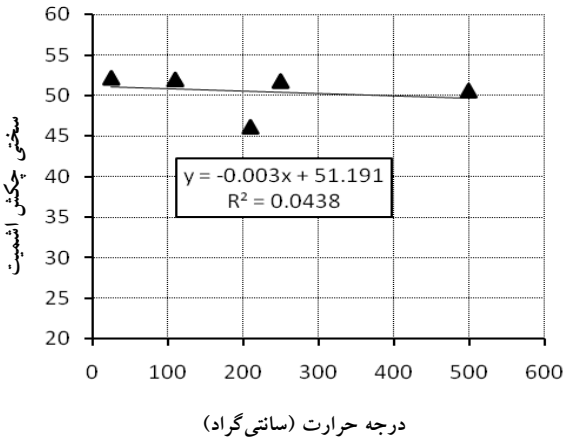
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

$$R_T = -aT + 1.07 * R_{T_0} \quad (۷)$$

در این رابطه، R_T؛ سختی سنگ در دمای T، R_{T0}؛ سختی سنگ در دمای آزمایشگاه و a؛ ضریب ثابت مربوط به سنگ است. به‌عنوان یک پیشنهاد اولیه، این ضریب برای سنگ‌های رسوبی آهک و تراورتن برابر با ۰/۰٦، برای سنگ آذرین گرانیت ۰/۰۵، برای سنگ دگرگونی مرمر ۰/۰۸ و برای بتن برابر با ۰/۰٤ پیشنهاد می‌شود. قابل ذکر است که تعیین این ضریب برای سنگ‌های مختلف نیازمند مطالعات بیش‌تر است.

در شکل ٦ نمودار سختی واجهشی اشمیت ماسه سنگ در مقابل درجه حرارت ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که درجه حرارت تأثیر چندانی بر سختی واجهشی اشمیت این نوع ماسه سنگ ندارد و برخلاف نمونه‌های دیگر، سختی ماسه سنگ با افزایش درجه حرارت کاهش محسوسی نداشته است.

چنان‌که در شکل‌ها و روابط مذکور مشخص است، دما بیش‌ترین تأثیر را به‌ترتیب بر سنگ‌های مرمر، آهک، تراورتن، گرانیت، بتن و ماسه سنگ داشته است. به‌طوری‌که سختی سنگ مرمر در اثر افزایش دما بیش‌ترین افت و سختی ماسه‌سنگ کم‌ترین کاهش را نشان داده است. این امر حساسیت بیش‌تر سنگ‌های مرمر، آهک و تراورتن را به درجه حرارت نشان می‌دهد (کربنات کلسیم).



شکل ٦. اثر دما بر سختی واجهشی اشمیت نمونهٔ ماسه سنگ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

۳. اثر تنش تک محوری بر سختی

چنان‌که اشاره شد، بر طبق استاندار ISRM، آزمایش چکش اشمیت را می‌توان روی نمونه‌های آزمایشگاهی، بلوک‌های آزاد صحرایی و هم‌چنین به‌صورت برجا روی سنگ دیواره، کف و سقف تونل‌ها انجام داد. نکته‌ای که در این زمینه باید بررسی شود، این است که آیا برای یک نوع سنگ مشخص در این شرایط مختلف (نمونه‌های آزمایشگاهی، بلوک‌های برجای آزاد بدون تنش و سنگ‌های برجایی که تحت تنش قرار دارند)، نتایج یک‌سانی برای سختی به‌دست می‌آید و یا مقدار سختی وابسته به این شرایط تغییر می‌کند. تحقیقات دمیرداگ[1] و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده است که اگر ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی بزرگ‌تر از ۱۱ سانتی‌متر باشد، سختی حاصل در آزمایشگاه با مقادیر به‌دست آمده از بررسی‌های برجا روی بلوک‌های سنگی برابر است. چنان‌که قبلا نیز بحث شد، استاندارهای موجود نیز حداقل ابعاد مورد نیاز برای حذف اثر ابعاد نمونه بر سختی سنگ را تعیین کرده‌اند.

موضوعی که در استانداردهای آزمایش چکش اشمیت به آن پرداخته نشده و در پژوهش‌های گذشته نیز کم‌تر به آن توجه شده است، اندازه‌گیری سختی واجهشی اشمیت بر روی سنگ‌های برجای تحت تنش است. سنگ‌های موجود در دیوارهٔ تونل‌ها و سایر فضاهای زیرزمینی، برخلاف بلوک‌های آزاد موجود در صحرا تحت تنش‌های برجا و القایی قرار دارند. به‌نظر می‌آید این تنش‌ها با توجه به ایجاد تغییرشکل در سنگ و تغییرات ریزساختای آن، می‌توانند سختی واقعی سنگ را تحت تأثیر قرار دهند. به‌طوری‌که ممکن است سختی یک نوع سنگ تحت تنش در دیواره و یا سقف فضاهای زیرزمینی با سختی همان سنگ به شکل بلوک آزاد و بدون تنش، متفاوت باشد.

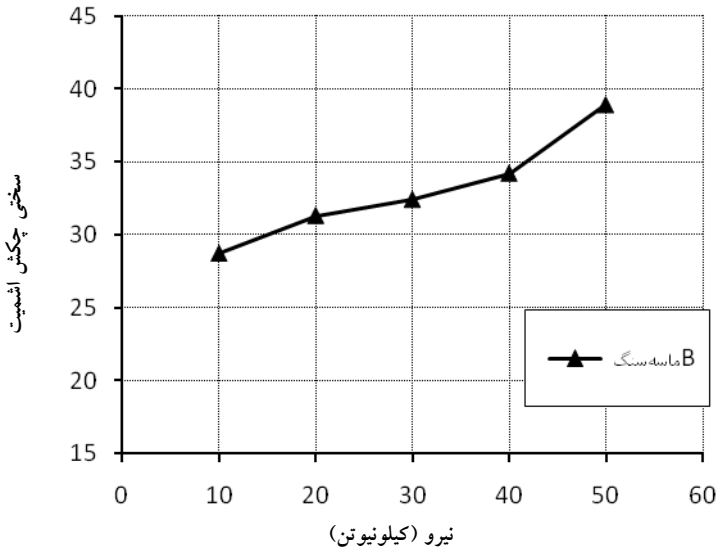
به‌منظور بررسی اثر تنش بر مقدار سختی واجهشی اشمیت، نمونه‌ای از نوعی ماسه سنگ و نیز نمونه‌ای بتن انتخاب و تحت بارگذاری تک‌محوره قرار گرفتند. این بارگذاری در چندین مرحله صورت گرفت و در هر مرحله از بارگذاری مقدار سختی سنگ بر طبق استاندارد ISRM تعیین شد.

1. Demirdag

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

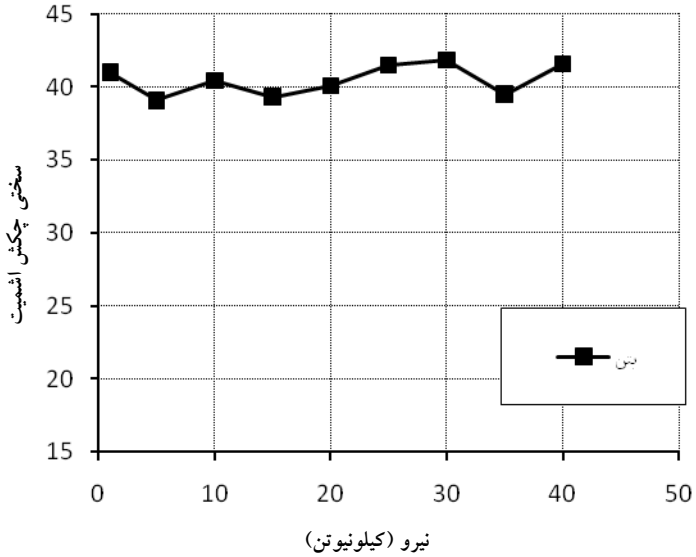
تغییرات سختی واجهشی اشمیت نمونهٔ ماسه سنگ با اعمال بار محوری بر آن در شکل (۷) نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشخص است، مقدار سختی با افزایش بار محوری روی نمونه، روند افزایشی داشته است. نکتهٔ که باید اشاره کرد این است که این افزایش مقدار چشم‌گیری است و سختی سنگ در حدود ۳۵ درصد سختی اولیه افزایش یافته است. علت این افزایش را می‌توان در کاهش تخلخل ماسه‌سنگ طی بارگذاری دانست. به‌طوری‌که با کاهش تخلخل سنگ، میزان صلبیت نمونه افزایش یافته و این امر سبب کاهش هدر رفتن انرژی ضربه و در نتیجه افزایش میزان بازگشت وزنهٔ چکش اشمیت شده است.

شکل ۸، تغییرات سختی واجهشی اشمیت با افزایش بار مربوط به نمونهٔ بتن را نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشخص است، در نمونهٔ بتن بر خلاف نمونهٔ ماسه‌سنگ، سختی واجهشی اشمیت تغییرات منظم و محسوسی با افزایش تنش تک‌محوره نداشته است. این امر را می‌توان به بافت ناهمگن و خاص نمونهٔ بتن (قرارگیری دانه‌های درشت و محکم خرده‌سنگ در زمینهٔ سیمانی نرمتر) نسبت داد.



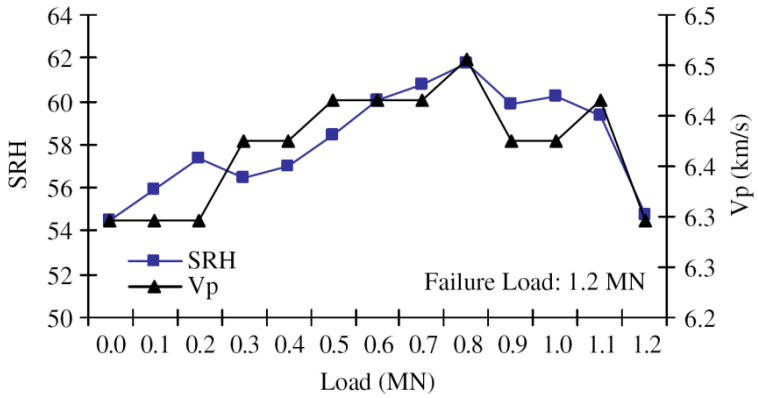
شکل۷. اثر بار محوری بر سختی واجهشی اشمیت نمونهٔ ماسه سنگ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]



شکل ۸. اثر بار محوری بر سختی واجهشی اشمیت نمونهٔ بتن

اخیراً در تحقیق مشابهی سنگون و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرده‌اند که مقدار سختی واجهشی اشمیت و نیز سرعت موج لرزه‌ای (Vp)، در نمونه‌های سنگی به‌شدت تحت تأثیر میزان بارگذاری نمونه قرار دارد. به‌طوری‌که با افزایش میزان بارگذاری تک‌محورهٔ سنگ، مقدار Vp و سختی واجهشی اشمیت افزایش یافته است (شکل ۹). قابل ذکر است که در آزمایش روی نوعی سنگ‌آهک، اعمال بار محوری تأثیر چندانی بر سختی واجهشی اشمیت نمونه نداشته است.



شکل۹. اثر بار بر سختی واجهشی اشمیت و سرعت موج (سنگون و همکاران، ۲۰۱۱)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

مقدار افزایش در مقدار این دو پارامتر در ابتدای بارگذاری که با بسته شدن حفرات و ترک‌های نمونه‌ها همراه است، زیاد است. بعد از بسته شدن کامل حفرات و شکستگی‌ها، مقدار این دو پارامتر تقریباً ثابت می‌ماند و در نهایت در سطوح بالاتر نیرو به‌علت شروع ایجاد ریزترک‌های جدید در داخل نمونه‌ها، مقادیر سختی واجهشی اشمیت و سرعت موج شروع به کاهش می‌کنند. قابل ذکر است که میزان افزایش این پارامتر در نمونه‌های دارای تخلخل زیادتر، بیش‌تر بوده است. به‌طوری‌که در نمونه‌های با تخلخل خیلی کم (در حدود ۰/۱ درصد)، تغییرات محسوسی در سختی واجهشی اشمیت با افزایش نیرو مشاهده نشده است.

با توجه به نتایج حاصل و تأثیرپذیری چشم‌گیر سختی واجهشی اشمیت از تنش اعمالی بر سنگ، به‌نظر می‌آید باید در مقادیر UCS و Et که از آزمایش اشمیت سنگ‌های دیوارهٔ فضاهای زیرزمینی تحت تنش تعیین شده‌اند، اصلاحاتی صورت گیرد. زیرا تنش موجود روی این سنگ‌ها سبب افزایش مقادیر سختی واجهشی اشمیت می‌شود. هم‌چنین پارامترهای حفرپذیری و برش‌پذیری سنگ که از نتایج سختی واجهشی اشمیت بر نمونه‌های آزمایشگاهی حاصل شده است، برای به‌کارگیری در حفر فضاهای زیرزمینی در پروژه‌های عمرانی و معدنی که سنگ‌ها تحت تأثیر تنش‌های برجا قرار دارند نیز باید اصلاح شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به تأثیر عوامل مختلف بر سختی واجهشی اشمیت، برای به‌دست آوردن سختی ثابت برای نوعی سنگ مشخص، لازم است که با شناخت این عوامل و کنترل آن‌ها به حذف اثر آن‌ها پرداخته شود. در مقالهٔ حاضر بعد از مرور پژوهش‌های انجام شده روی برخی از این عوامل، به بررسی آزمایشگاهی اثر عوامل رطوبت، درجه حرارت و تنش تک‌محوری بر سختی واجهشی اشمیت چندین نوع سنگ مختلف پرداخته شد واین نتایج به‌دست آمد:

- نمونه‌ها در حالت اشباع عموما دارای سختی واجهشی اشمیت پایین‌تری نسبت به حالت خشک هستند. میزان کاهش سختی وابسته به نوع سنگ است و در سنگ‌هایی که دارای سختی کم‌تری هستنند، میزان اثر رطوبت بیش‌تر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

- در برخی از فعالیت‌های مهندسی سنگ، ارزیابی خواص سنگ در دماهای بیش‌تر از دمای محیط آزمایشگاه لازم است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درجهٔ حرارت، سختی نمونه‌ها به‌جز در مورد یک نمونه کاهش می‌یابد. رابطهٔ کاهش سختی با دما به‌شکل خطی بوده است. قابل ذکر است که میزان کاهش سختی واجهشی اشمیت با دما دارای مقادیر چشم‌گیر است.
- بر طبق استاندارد، آزمایش سختی واجهشی اشمیت را می‌توان به‌صورت برجا بر بلوک‌های سنگی آزاد و هم‌چنین بر سنگ‌های موجود در دیواره، سقف و کف فضاهای زیرزمینی انجام داد. نکتهٔ مهم این است که سنگ‌ها موجود در دیواره‌های فضای زیرزمینی برخلاف بلوک‌های آزاد تحت تأثیر تنش قرار دارند. این تنش ممکن است سبب تغییر در مقادیر سختی سنگ شود. در پژوهش حاضر با افزایش فشار محوری روی نمونهٔ ماسه سنگ در آزمایشگاه، سختی واجهشی اشمیت به‌مقدار چشم‌گیری افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهندهٔ اهمیت در نظر گرفتن سطح تنش روی سنگ‌های دیوارهٔ فضاهای زیرزمینی است که سختی واجهشی اشمیت بر آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. قابل ذکر است که اعمال بار روی نمونهٔ بتنی، تأثیر چندانی بر سختی آن نداشته است.

تقدیر و تشکر

از مساعدت گروه مهندسی معدن دانشگاه علم و صنعت ایران–واحد اراک (دانشگاه صنعتی اراک) در انجام تحقیق حاضر، و هم‌چنین از گروه مهندسی مکانیک این دانشگاه برای همکاری برای کوره و حرارت دادن نمونه‌ها نهایت قدردانی را می‌کنیم.

منابع

۱. ترابی ر.، جوانشیر م.، *اعتبار استفاده از چکش اشمیت در آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی برای تعیین مقاومت سنگ و ارزیابی پایداری سقف در کارگاه های استخراج زغالسنگ*، دومین همایش معدن و علوم وابسته (۱۳۸۵).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

2. ASTM, "Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method", ASTM Standard, 04.09 (D 5873-00) (2001).
3. ASTM, "Standard test method for determination of rock hardness by Rebound Hammer Method", D5805–73 (2005).
4. Aydin A., Basu A., "The Schmidt hammer in rock material characterization", Engineering Geology, 81 (2005) 1-14.
5. Bilgin N., Seyrek T., Shahriar K., "Roadheaders glean valuable tips for Istanbul metro", Tunnels and Tunnelling (1990) 29-32.
6. Colback P.S.B., Wiid B.L., "The influence of moisture content on the compressive strength of rocks. Proc. Can. Symp. Rock Mech", (Toronto), 3rd (1965) 65-83.
7. Day M.J., Goudie A.S., "Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer", British Geomorphology Research Group Technical Bulletin, 18 (1977) 19-29.
8. Demirdag S., Yavuz H., Altindag R., "The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46 (2009) 725-730.
9. Dincer T., "The effect of some rock properties on the performance of roadheaders and impact hammers", PhD thesis, Istanbul Technical University (1990) 108.
10. ISRM, "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 15 (1978) 89-97.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

11. Jumikins A.R., "Some engineering aspects of Brunswick Shale", Proc. Int. Congr. Rock Mech. (Lisbon) (1966) 99-102.

12. Kahraman S., "Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36 (1999) 981-9.

13. Kahraman S., Balci C., Yaici S., Bilgin N., "Prediction of the penetration rate of rotary blasthole drills using a new drillability index", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37 (2000) 729-43.

14. Kahraman S., Bilgin N., Feridunoglu C., "Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (2003) 711-23.

15. Katz O., Reches Z., Roegiers J.C., "Evaluation of mechanical, rock properties using a Schmidt Hammer", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37 (2000) 723-728.

16. Kindybinski A., "Bursting liability indices of coal", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 17 (1980) 167-161.

17. Matthews J.A., Shakesby R.A., "The status of the 'Little Ice Age' in southern Norway: relative-age dating of Neoglacial moraines with Schmidt hammer and lichenometry", 13(3) (1984) 333-46.

18. OJO O., BROOK N., "The effect of moisture on some mechanical properties of rock", Mining Science and Technology, 10 (1990) 145-156.

19. Ozkan I., Bilim N., "A new approach for applying the in-situ Schmidt hammer test on acoalface", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 45 (2008) 888-98.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]

20. Sengun N., Altindag R., Demirdag S., Yavuz H., "P-wave velocity and Schmidt rebound hardness value of rocks under uniaxial compressional loading", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48 (2011) 693-696.

21. Sachpazis C.I., "Correlating schmidt hammer rebound number with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 42 (1990) 75-83.

22. Young R.P., Fowell R.J., "Assesing rock discontinuities", Tunnels and Tunnelling (1978) 45-8.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3649]