

تأثیر باران‌های اسیدی بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ تراورتن

مهدی حسینی^{۱*}، دانیال فخری^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۰۷، پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۲۲)

چکیده

یکی از مشکلات ناشی از آلودگی هوا، بارش باران اسیدی است. توسعه جوامع شهری و به دنبال آن استفاده بیشتر از وسایل نقلیه آلاینده هوا از یک سو و استفاده گسترده از سنگ تراورتن در نمای ساختمان در ایران از سوی دیگر بررسی اثر باران اسیدی بر روی خواص سنگ تراورتن را دو چندان کرده است. در این پژوهش سه نوع سنگ تراورتن مورد مطالعه قرار گرفته است. این مقاله به بررسی اثر باران در چهار پی اچ (۲٫۵، ۴، ۵٫۵ و ۷) روی خواص فیزیکی آن شامل تخلخل موثر، سرعت امواج طولی و نفوذپذیری و خواص مکانیکی آن شامل مقاومت کششی و مقاومت تراکمی تک محوری می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که در اثر کاهش پی اچ، تخلخل موثر و نفوذپذیری افزایش و سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت تراکمی تک محوری کاهش می‌یابد. بیشترین افزایش تخلخل موثر در اثر کاهش پی اچ مربوط به تراورتن B و کمترین افزایش مربوط به تراورتن R است. بیشترین کاهش سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک محوری در اثر کاهش پی اچ مربوط به تراورتن B و کمترین کاهش مربوط به تراورتن R است.

کلمات کلیدی

باران اسیدی، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، تراورتن، سنگ ساختمانی.

۱- مقدمه

توده سنگ به طور روزافزون به عنوان بستری در محدوده وسیعی از فعالیت‌های انسانی به کار می‌رود. تاسیساتی مانند انبارهای ذخیره‌سازی، چاه‌ها، تونل‌ها و نیروگاه‌های زیرزمینی در بستر انواع سنگ‌های مختلف تحت شرایط مکانیک سنگی مختلف قرار می‌گیرند، بنابراین تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و عوامل تاثیرگذار بر آن‌ها برای طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی امری بسیار ضروری است. یکی از مشکلات ناشی از آلودگی هوا، بارش باران‌های اسیدی است. سولفات (SO₄) از آلاینده‌های شاخص مناطق با اتمسفرهای آلوده است که در اثر ترکیب شدن با یون‌های هیدروژن، محلول اسید سولفوریک را تشکیل می‌دهد. این محلول از عوامل مهم در انحلال و زوال‌پذیری سنگ‌های ساختمانی است [۴-۱].

در گذشته بر روی اثر محیط اسیدی بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ پژوهش‌هایی انجام شده که در ادامه بعضی از این پژوهش‌ها ارایه شده است. نیکودل و همکاران در سال ۱۳۸۹ پژوهشی را بر روی اثر محلول اسیدی بر انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک انجام دادند. آزمایش دوام تا ۱۵ چرخه در این محلول‌ها با پی اچ ۱٫۵، ۳، ۵ و آب شرب با پی اچ ۷٫۳ انجام و شاخص دوام محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد نمونه‌های با ترکیب غیرکربناتی در برابر این محلول‌ها (اسید سولفوریک و اسید نیتریک) مقاوم و نمونه‌های با ترکیب کربناتی نامقاوم‌اند. با کاهش پی اچ محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک، شاخص دوام نمونه‌های با ترکیب کربناتی کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده افزایش اثر انحلالی این محلول‌ها با کاهش پی اچ است. شاخص دوام نمونه‌های با ترکیب کربناتی نشان می‌دهد، اسید سولفوریک اثر انحلالی بیشتری نسبت به اسید نیتریک با پی اچ‌های یکسان دارد [۵].

سینگ و همکاران [۶] ویژگی‌های مهندسی سنگ آهک را در پی اچ‌های مختلف در محیط‌های اسیدی و قلیایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مقدار پی اچ تاثیر مهمی روی این ویژگی‌ها دارد.

همچنین سینگ و همکاران [۶] به بررسی اثر پی اچ محلول روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ مرمر پرداختند. نمونه‌ها به مدت ۱۵ ساعت در محلول‌های با شرایط اسیدی و بازی قرار داده شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که خواص مقاومتی

(مقاومت تراکمی تک محوره و مقاومت کششی) در شرایط قلیایی و خنثی، بالاتر از شرایط اسیدی و کاهش مقاومت در محیط اسیدی بیشتر از محیط بازی است. وازکوز و همکاران [۷] اثر محیط اسیدی را برای ۶ نوع سنگ ساختمانی بررسی کردند. نتایج کار نشان داد اتمسفرهای اسیدی ممکن است به همه ۶ نوع سنگ آسیب برساند حتی سنگ‌هایی که کلسیم بسیار کمی دارند.

ژیبو و همکاران [۸] اثر محیط اسیدی را بر دو مصالح ساختمانی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ساختار منافذ و تغییرات کانی‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از توموگرافی با وضوح بالا بررسی شد. نتایج نشان داد باران اسیدی یک انحلال عمده بر روی سطح نمونه و تخلخل باز هر دو سنگ ایجاد می‌کند. ژنگ و همکاران [۹] اثر باران اسیدی را روی ملات آسفالت امولسیون سیمان مورد بررسی قرار دادند. مطالعات نشان داد که اثرات طولانی مدت باران اسیدی باعث خسارت شدید می‌شود.

مهدیخانی و همکاران [۱۰] اثر باران اسیدی را بر دوام و خواص مکانیکی بتن حاوی نانو سیلیس بررسی کردند. این مطالعات نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانو سیلیس بیشتر از نمونه‌های بتنی فاقد نانو سیلیس در محیط اسیدی است. با افزایش اسیدیته محلول، تخریب نمونه‌ها افزایش می‌یابد که در اثر آن، جذب آب و تخلخل نمونه‌ها بیشتر می‌شود.

ژو و همکاران [۱۱] زوال چقرمگی شکست مود II، مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته بتن را تحت باران اسیدی و سیکل‌های تر و خشک شدن بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت فشاری تک محوره، مدول الاستیسیته و چقرمگی شکست مود II با افزایش تعداد سیکل‌های تر-خشک شدن و افزایش اسیدیته باران کاهش می‌یابد. در ایران سنگ تراورتن به وفور برای نمای ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد در نتیجه سنگ تراورتن به عنوان ماده مورد مطالعه انتخاب شد. در این پژوهش سه نوع سنگ تراورتن مورد مطالعه قرار گرفت و خواص فیزیکی آن شامل تخلخل موثر، سرعت امواج طولی و نفوذپذیری و خواص مکانیکی آن شامل مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک محوری در اثر باران اسیدی در پی اچ ۲٫۵، ۴، ۵٫۵ و ۷ بررسی شد. بررسی‌های کتابخانه‌ای نشان می‌دهد در ایران در خصوص اثر محلول اسیدی روی سنگ ساختمانی کار شده است که به بعضی از آنها در بخش مقدمه

نیز دارد. در تراورتن R اکسید آهن نیز وجود دارد که روی کلسیت‌ها را به شکل برگ مانند پوشانده است. تخلخل تراورتن B بیشتر از تراورتن D و R است. مقطع میکروسکوپی نمونه‌ها همچنین نشان می‌دهد که میزان تخلخل بعد از بارش باران اسیدی افزایش یافته است. شکل ۱ تصاویر مقطع نازک تهیه شده از نمونه‌های D را در دو حالت که شامل: (۱) حالتی که نمونه تحت بارش باران اسیدی قرار نگرفته و (۲) حالتی که نمونه تحت بارش باران اسیدی دارای پی اچ ۲٫۵ قرار گرفته را نشان می‌دهد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

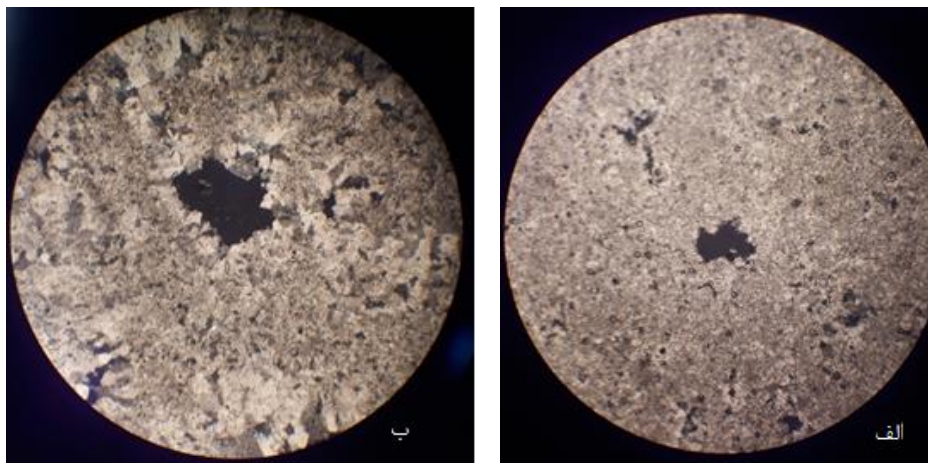
در آزمایشگاه از بلوک‌های سنگی به منظور تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل برای انجام آزمایش‌های متداول مکانیک سنگی از جمله آزمایش تراکم تک محوری (برای تعیین مقاومت تراکم تک محوری) و آزمایش برزیلی (برای تعیین مقاومت کششی) مطابق با استاندارد ISRM استفاده شد [۱۲]. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

اشاره شد ولی پژوهش در شرایطی که باران اسیدی بر روی سنگ ساختمانی همانند شرایط واقعی ریزش کند تا آنجایی که در مروری بر پژوهش‌های گذشته جستجو شده است جز یک مورد که توسط مهدیخانی و همکاران [۱۰] روی بتن کار شده است پژوهشی در ایران یافت نشد. در دنیا هم بیشتر روی بتن کار شده و پژوهش روی سنگ ساختمانی محدود است که جزو امتیازات این پژوهش است.

۲- نمونه‌های مورد مطالعه

۲-۱- مطالعه میکروسکوپی

برای مطالعه میکروسکوپی نمونه‌ها، مقطع نازک از نمونه‌های سه نوع تراورتن تهیه شده و زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفته است که شامل تراورتن دره بخاری محلات (با علامت D در متن مشخص شده)، تراورتن کرم کاشان (با علامت B در متن مشخص شده) و تراورتن قرمز آذرشهر (با علامت R در متن مشخص شده) است. کانی اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها کلسیت است و به میزان ناچیزی کانی‌های اپک



شکل ۱: مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های تراورتن (الف: نمونه قبل از بارش باران اسیدی و ب) نمونه بعد از بارش باران اسیدی با پی اچ ۲٫۵ (در نور XPL با بزرگنمایی ۵۰X)

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های تراورتن خشک

نوع سنگ تراورتن	سرعت امواج طولی (m/s)	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	مقاومت تراکم تک محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
B	۵۴۶۹	۲۳٫۷۳	۲۸٫۵۵	۳٫۷۷
D	۵۵۷۱	۲۳٫۹۵	۴۳٫۲۳	۵٫۷۵
R	۶۰۰۵	۲۵٫۰۱	۵۳٫۰۳	۶٫۸۵

در شکل ۴ بلوک‌های سنگ‌های تراورتن را بعد از مغزه‌گیری مشاهده می‌کنید.



شکل ۴: بلوک‌های سنگ‌های تراورتن بعد از مغزه‌گیری

برای مدلسازی باران اسیدی از دستگاهی استفاده می‌شود که از دو تشت، یک پمپ کولر و لوله‌های انتقال آب به همراه نازل ساخته شده است. یکی از تشت‌ها بر روی زمین قرار می‌گیرد که مخزن آب است و ۱۵ لیتر آب اسیدی با پی اچ های مورد نظر (۲/۵، ۴ و ۵/۵) و آب با پی اچ ۷ ریخته می‌شود. آب از داخل تشت به وسیله پمپ کولر به داخل لوله‌های آب انتقال می‌یابد تا به نازل‌ها برسد. نحوه پخش آب از نازل‌ها را با چرخاندن نازل می‌توان تنظیم کرد. نمونه‌ها در داخل تشت دیگری قرار داده می‌شوند که زیر نازل قرار دارد. بعد از بارش باران روی نمونه‌ها، آب از طریق سوراخ‌هایی که در کف تشت ایجاد شده به داخل تشت اول که مخزن است ریخته می‌شود و این چرخه تا ۵ ساعت ادامه پیدا می‌کند. اسیدیته آب مخزن مرتب با پی اچ متر کنترل می‌شود. شکل ۵ نمونه‌هایی را که در تشت قرار گرفته و روی آن باران می‌بارد نشان می‌دهد.

۳- بررسی اثر بارش باران روی خواص سنگ

روی نمونه‌های آماده شده آزمایش‌هایی برای تعیین سرعت امواج طولی، تخلخل موثر، مقاومت تراکم تک محوری، مقاومت کششی و نفوذپذیری انجام شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش شامل مراحل ۱ تا ۴ است.

- ۱- مغزه‌گیری از بلوک سنگی (شکل ۲)
- ۲- برش نمونه‌های استوانه‌ای شکل (شکل ۳)
- ۳- ساب دادن نمونه‌های برش داده شده
- ۴- قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در زیر بارش باران در چهار پی اچ ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷



شکل ۲: دستگاه مغزه‌گیری



شکل ۳: دستگاه برش

جدول ۲: تغییرات سرعت امواج طولی نمونه‌ها در اثر تغییرات پی اچ

سرعت امواج طولی (m/s)	پی اچ	نوع سنگ
۵۰۰۸	۲٫۵	تراورتن B
۵۳۶۹	۲٫۵	تراورتن D
۵۷۲۰	۲٫۵	تراورتن R
۵۰۵۹	۴	تراورتن B
۵۳۹۱	۴	تراورتن D
۵۷۳۸	۴	تراورتن R
۵۳۰۹	۵٫۵	تراورتن B
۵۶۵۴	۵٫۵	تراورتن D
۵۸۳۶	۵٫۵	تراورتن R
۵۵۸۹	۷	تراورتن B
۵۸۴۰	۷	تراورتن D
۶۰۵۰	۷	تراورتن R



شکل ۵: تجهیزات مورد استفاده برای شبیه‌سازی باران اسیدی

۳-۱- سرعت امواج طولی

سرعت امواج طولی به کمک دستگاه اولتراسونیک اندازه‌گیری شده است. محل قرار گرفتن فرستنده و گیرنده‌های امواج طوری روی سطوح انتهایی نمونه علامت‌گذاری می‌شود که محل عبوری از مراکز آنها با محور مرکزی نمونه بیش از ۲ درجه اختلاف نداشته باشد. سپس مسافت حرکت موج که فاصله مرکز تا مرکز ترانس دیوسرهاست اندازه‌گیری می‌شود. یک لایه نازک از وازلین در محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها مالیده می‌شود تا انرژی عبوری از ترانس دیوسرها کاهش پیدا نکند. برای به دست آوردن سرعت امواج طولی در نمونه از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱۲].

$$V_p = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (1)$$

که در آن:

V_p : سرعت موج طولی (m/s)

t : زمان گذر موج طولی (μs)

L : طول نمونه (mm) است.

در جدول ۲ نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. برای هر پی اچ، آزمایش بر روی ۶ نمونه انجام شد. در جدول ۲، میانگین سرعت امواج طولی برای هر پی اچ ذکر شده است.

۳-۲- تخلخل موثر

برای تعیین تخلخل موثر بعد از بارش باران از روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد نمونه استفاده شده که از رابطه ۲ تعیین می‌شود [۱۲]. در جدول ۳ نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. برای هر پی اچ، آزمایش بر روی ۶ نمونه انجام شد. در جدول ۳

جدول ۳: تغییرات تخلخل موثر نمونه‌ها در اثر تغییرات پی اچ

تخلخل موثر (درصد)	پی اچ	نوع سنگ
۳٫۷۵	۲٫۵	تراورتن B
۳٫۳۱	۲٫۵	تراورتن D
۲٫۶۳	۲٫۵	تراورتن R
۳٫۶۱	۴	تراورتن B
۳٫۲۱	۴	تراورتن D
۲٫۵۶	۴	تراورتن R
۳٫۳۵	۵٫۵	تراورتن B
۳٫۰۳	۵٫۵	تراورتن D
۲٫۴۱	۵٫۵	تراورتن R
۳٫۲۷	۷	تراورتن B
۲٫۹۵	۷	تراورتن D
۲٫۳۶	۷	تراورتن R

میانگین تخلخل موثر برای هر پی اچ ذکر شده است.

$$n_e = \frac{V_{ve}}{V} \quad (2)$$

که در آن:

V_{ve} : حجم منافذ موثر

V : حجم کل نمونه است.

۳-۳- نفوذپذیری

برای آزمایش نفوذپذیری از روش بار ثابت استفاده می‌شود؛ سیال مورد استفاده آب است و نفوذپذیری طولی نمونه تعیین

می‌شود. در شکل ۶ وسایل آزمایش نشان داده شده است. مراحل آزمایش شامل:

الف) گذاشتن نمونه در سلول هوک.

ب) اعمال فشار جانبی برای آب‌بندی کردن سطوح جانبی نمونه‌ای که در غشا قرار گرفته است. در این آزمایش فشار ۲٫۵ مگاپاسکال به نمونه‌ها اعمال می‌شود. این فشار در طول آزمایش به وسیله اکومولاتور ثابت نگاه داشته می‌شود. آب‌بندی کردن سطوح جانبی نمونه باعث می‌شود سیال فقط از نمونه عبور کند.

ج) اعمال فشار ثابت سیال (آب) به میزان ۱ مگاپاسکال در طول آزمایش.

د) ثبت زمان مورد نیاز برای خروج حجم مشخصی از سیال از نمونه (مثلاً یک سانتی‌متر مکعب) و از طریق آن شدت جریان سیال خروجی از نمونه اندازه‌گیری می‌شود. البته این اندازه‌گیری‌ها ادامه دارد تا شدت جریان به حالت یکنواخت برسد. این شدت جریان در محاسبات استفاده می‌شود.

برای محاسبه نفوذپذیری از رابطه ۳ استفاده شده است [۱۳]. این رابطه برای تعیین نفوذپذیری در حالتی که جریان سیال یکنواخت است معتبر است.

$$k = \frac{\mu q L}{\Delta p A} \quad (3)$$

که در آن:

μ : ویسکوزیته دینامیکی سیال (آب) (MPa.S)

q : شدت جریان (m^3/s)

L : طول نمونه (m)

A : سطح مقطع نمونه (m^2)

Δp : اختلاف فشار سیال بین ورودی و خروجی (MPa)

است.

در جدول ۴ نتایج آزمایش نفوذپذیری ارایه شده است. آزمایش نفوذپذیری به دلیل خرابی دستگاه فقط روی سه نمونه D انجام شد. در جدول ۴ میانگین نتایج ذکر شده است.

جدول ۴: تغییرات نفوذپذیری نمونه‌ها در اثر تغییرات پی اچ

نوع سنگ	پی اچ	نفوذپذیری (m^2)
تراورتن D	۲٫۵	$۳٫۳۱ \times ۱۰^{-۱۷}$
تراورتن D	۴	$۳٫۲۲ \times ۱۰^{-۱۷}$
تراورتن D	۵٫۵	$۲٫۹۱ \times ۱۰^{-۱۷}$
تراورتن D	۷	$۲٫۷۱ \times ۱۰^{-۱۷}$

۳-۴- مقاومت کششی

برای تعیین مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها آزمایش برزیلی انجام شده است. مقاومت کششی نمونه‌های سنگ از رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۱۲]. شکل ۷ مجموعه‌ای از نمونه‌های دیسکی آماده شده برای آزمایش برزیلی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: دستگاه آزمایش نفوذپذیری

نشان می‌دهد.

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{D \cdot t} \quad (4) \text{ که در آن:}$$

P: بار در لحظه شکست (kN)

D: قطر نمونه (mm)

t: ضخامت نمونه (mm)

σ_t : مقاومت کششی (MPa) است.

برای هر پی اچ، آزمایش روی ۱۰ نمونه انجام شد. در

جدول ۵، میانگین مقاومت کششی برای هر پی اچ ذکر شده است.

۳-۵- آزمایش تراکم تک محوری

برای تعیین مقاومت تراکم تک محوری نمونه‌ها بر روی

نمونه‌ها آزمایش تراکم تک محوری طبق استاندارد ISRM در

سال ۲۰۰۷ انجام شده است [۱۲]. برای هر پی اچ، آزمایش بر

روی ۵ نمونه انجام شد. در جدول ۶ میانگین مقاومت تراکم

تک محوری برای هر پی اچ ارائه شده است. شکل ۸ تعدادی از

نمونه‌های آماده شده برای آزمایش تراکم تک محوری را

جدول ۵: تغییرات مقاومت کششی در سه نوع تراورتن در اثر تغییرات پی اچ

نوع سنگ	پی اچ	مقاومت کششی (MPa)
تراورتن B	۲٫۵	۲٫۹۵
تراورتن D	۲٫۵	۵٫۰۴
تراورتن R	۲٫۵	۶٫۳۵
تراورتن B	۴	۳٫۰۵
تراورتن D	۴	۵٫۱۵
تراورتن R	۴	۶٫۴۱
تراورتن B	۵٫۵	۳٫۲۵
تراورتن D	۵٫۵	۵٫۵۳
تراورتن R	۵٫۵	۶٫۶۷
تراورتن B	۷	۳٫۵۳
تراورتن D	۷	۵٫۶۵
تراورتن R	۷	۶٫۷۷



شکل ۷: تعدادی از نمونه‌های آماده شده برای آزمایش برزیلی



شکل ۸: تعدادی از نمونه‌های آماده شده برای آزمایش تراکم تک محوری

سرعت امواج طولی را دارد. سرعت امواج در تراورتن D بین تراورتن B و R است. در جدول ۷ میزان تغییرات سرعت امواج طولی در سه نوع تراورتن در پی اچ های مختلف نسبت به سرعت امواج طولی در پی اچ ۷ ارایه شده است. همان طور که در جدول ۷ مشاهده می شود بیشترین کاهش سرعت امواج طولی در تراورتن نوع B و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می افتد. این کاهش سرعت به واسطه ایجاد و گسترش منافذ در نمونه های سنگ به واسطه کاهش پی اچ است. کاهش سرعت امواج طولی در اثر کاهش پی اچ از ۴ به ۲٫۵ کمترین مقدار است. در پژوهش سینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ که بر روی سنگ مرمر انجام شده است نیز این کاهش سرعت امواج طولی مشاهده شده است [۶]. در اثر کاهش پی اچ از ۷ به ۲٫۵ سرعت امواج طولی در تراورتن های B، D و R به ترتیب ۱۰، ۸ و ۵٫۵ درصد کاهش یافت.

جدول ۶: تغییرات مقاومت تراکم تک محوری در سه نوع تراورتن در اثر تغییرات پی اچ

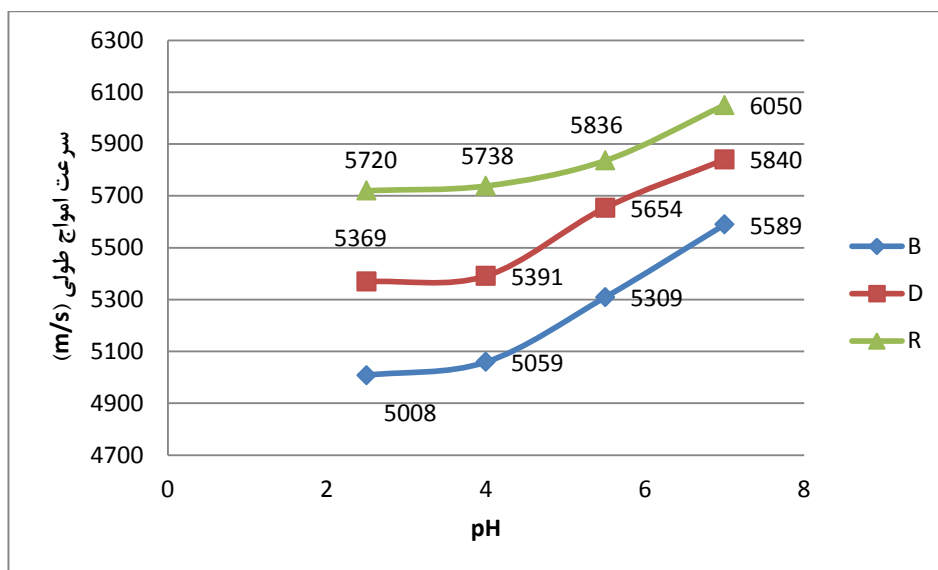
نوع سنگ	پی اچ	مقاومت کششی (MPa)
تراورتن B	۲٫۵	۲۱٫۱۱
تراورتن D	۲٫۵	۳۵٫۲۲
تراورتن R	۲٫۵	۴۵٫۵۳
تراورتن B	۴	۲۳٫۰۵
تراورتن D	۴	۳۶٫۱۷
تراورتن R	۴	۴۶٫۷۳
تراورتن B	۵٫۵	۲۵٫۸۵
تراورتن D	۵٫۵	۳۹٫۵۵
تراورتن R	۵٫۵	۴۹٫۳۷
تراورتن B	۷	۲۷٫۱۵
تراورتن D	۷	۴۱٫۶۵
تراورتن R	۷	۵۱٫۷۱

جدول ۷: نسبت سرعت امواج طولی در سنگ تراورتن بعد از بارش باران اسیدی به سرعت امواج طولی بعد از بارش باران غیراسیدی (دارای پی اچ ۷)

پی اچ	نوع سنگ تراورتن		
	R	D	B
۲٫۵	۰٫۹۴۵	۰٫۹۲	۰٫۹۰
۴	۰٫۹۴۸	۰٫۹۲۳	۰٫۹۱
۵٫۵	۰٫۹۶	۰٫۹۶	۰٫۹۵

۴- تحلیل نتایج

برای تحلیل نتایج، تغییرات خواص سنگ های تراورتن بر روی نمودار نشان داده شده است. در شکل ۹ تغییرات سرعت امواج طولی برای هر سه نوع تراورتن رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود در هر سه نوع تراورتن با کاهش پی اچ، سرعت امواج طولی کاهش می یابد. همان طور که مشاهده می کنید تراورتن B کمترین سرعت و تراورتن R بیشترین



شکل ۹: تغییرات سرعت امواج طولی در سه نوع تراورتن در اثر تغییرات پی اچ

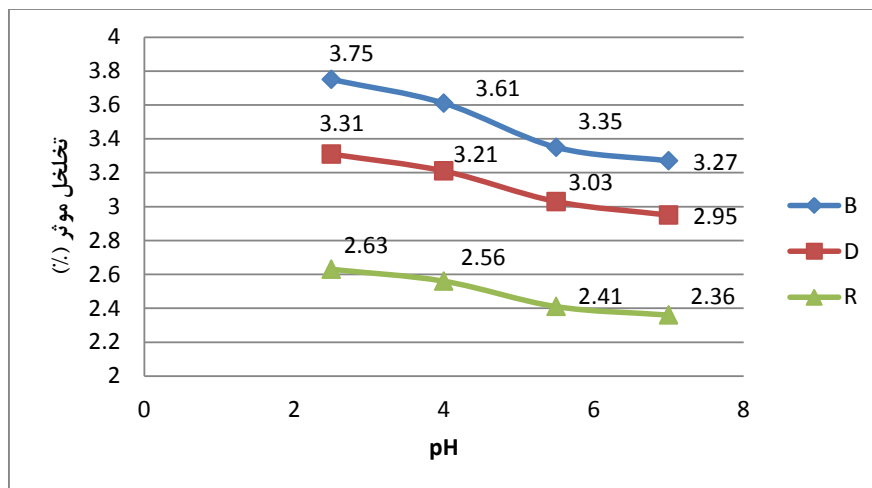
جدول ۸: نسبت تخلخل موثر در سنگ تراورتن بعد از بارش باران اسیدی به تخلخل موثر بعد از بارش باران غیراسیدی (دارای پی اچ ۷)

نوع سنگ تراورتن			پی اچ
R	D	B	
۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۵	۲٫۵
۱٫۰۸	۱٫۰۹	۱٫۱۱	۴
۱٫۰۲	۱٫۰۲۷	۱٫۰۳	۵٫۵

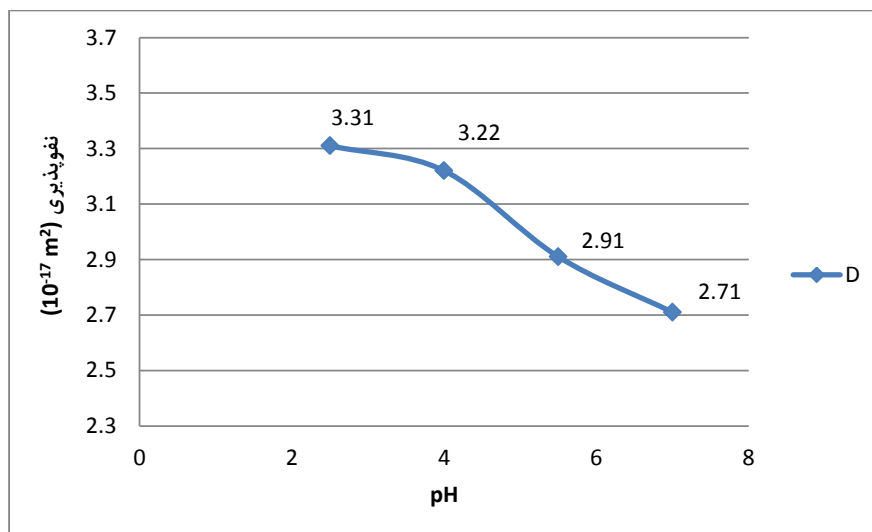
نتایج تخلخل موثر نمونه‌ها که در شکل ۱۰ ارایه شده است نشان می‌دهد در هر سه نوع تراورتن، تخلخل موثر با کاهش پی اچ افزایش می‌یابد. این افزایش در اثر ایجاد و گسترش منافذ سنگ اتفاق افتاده است. بیشترین افزایش تخلخل موثر مطابق جدول ۸ در تراورتن نوع B و کمترین افزایش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. افزایش تخلخل موثر در اثر کاهش پی اچ از ۴ به ۲٫۵ کمترین مقدار است. در اثر کاهش پی اچ از ۷ به ۲٫۵ تخلخل موثر در تراورتن‌های B، D و R به ترتیب ۱۵، ۱۲ و ۱۱ درصد افزایش یافت.

شده است در شکل ۱۱ ارایه شده و نشان می‌دهد در تراورتن D، نفوذپذیری با کاهش پی اچ افزایش می‌یابد. این افزایش در

نتایج آزمایش نفوذپذیری که فقط بر روی نمونه D انجام



شکل ۱۰: تغییرات تخلخل موثر در سه نوع تراورتن در اثر تغییرات پی اچ



شکل ۱۱: تغییرات نفوذپذیری در تراورتن نوع D در اثر تغییرات پی اچ

جدول ۹: نسبت نفوذپذیری در سنگ تراورتن D بعد از بارش باران اسیدی به نفوذپذیری بعد از بارش باران غیراسیدی (دارای پی اچ ۷)

نوع سنگ تراورتن	پی اچ
D	۲,۵
۱,۲۲	۴
۱,۱۸	۵,۵

جدول ۱۰: نسبت مقاومت کششی در سنگ تراورتن بعد از بارش باران اسیدی به مقاومت کششی بعد از بارش باران غیراسیدی (دارای پی اچ ۷)

نوع سنگ تراورتن			پی اچ
R	D	B	
۰,۹۴	۰,۸۹	۰,۸۳	۲,۵
۰,۹۵	۰,۹۱	۰,۸۶	۴
۰,۹۸	۰,۹۷	۰,۹۲	۵,۵

اچ از بین این سه نوع تراورتن، تراورتن B ضعیف‌ترین تراورتن در برابر بارش باران اسیدی و مقاوم‌ترین تراورتن در برابر باران اسیدی تراورتن R است. علت اینکه مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک محوری تراورتن B کمتر از دو تراورتن دیگر است را می‌توان تخلخل موثر بیشتر تراورتن B نسبت به دو تراورتن دیگر دانست که باعث نفوذ بیشتر باران اسیدی در سنگ

اثر ایجاد و گسترش منافذ سنگ اتفاق افتاده است. جدول ۹ نشان می‌دهد کمترین افزایش نفوذپذیری در اثر کاهش پی اچ از ۴ به ۲,۵ رخ می‌دهد. در اثر کاهش پی اچ از ۷ به ۲,۵ نفوذپذیری در تراورتن‌های B ۲۲ درصد افزایش یافت.

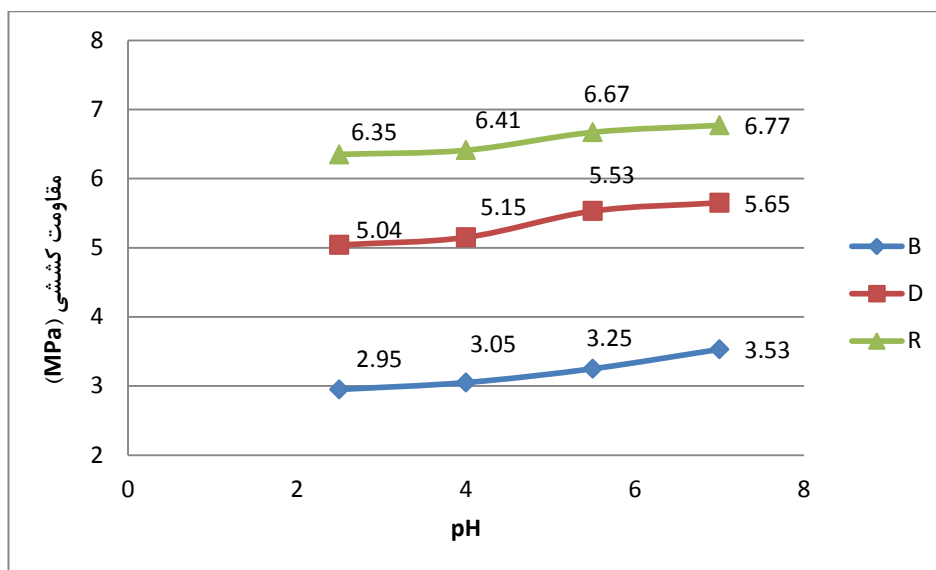
نتایج آزمایش برزبلی نیز نشان‌دهنده کاهش مقاومت کششی با کاهش پی اچ است (شکل ۱۲). نتایج این پژوهش با پژوهش سینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ مطابقت دارد [۶].

جدول ۱۰ نشان می‌دهد بیشترین کاهش مقاومت کششی در تراورتن نوع B و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می‌افتد.

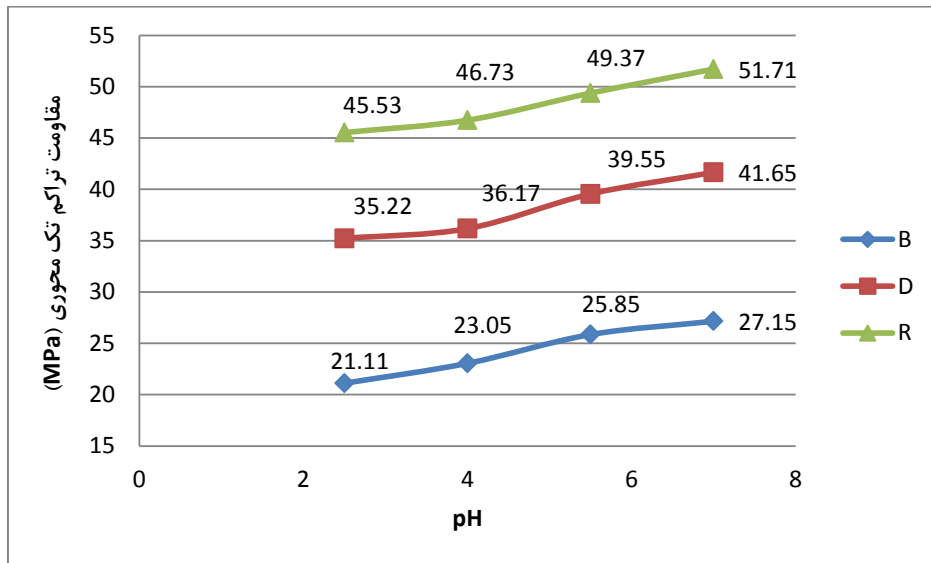
کمترین کاهش مقاومت کششی در هر سه نوع تراورتن در اثر کاهش پی اچ از ۴ به ۲,۵ اتفاق می‌افتد. در اثر کاهش پی اچ از ۷ به ۲,۵ مقاومت کششی در تراورتن‌های B، D و R به ترتیب ۱۷، ۱۱ و ۶ درصد کاهش یافت.

نتایج آزمایش تراکم تک محوری نیز نشان‌دهنده کاهش مقاومت تراکم تک محوری با کاهش پی اچ است (شکل ۱۳). نتایج این پژوهش با پژوهش‌های ژنگ و همکاران، ژو و همکاران و مهدیخانی و همکاران مطابقت دارد [۹-۱۱]. در اثر کاهش پی اچ از ۷ به ۲,۵ مقاومت تراکم تک محوری در تراورتن‌های B، D و R به ترتیب ۲۲، ۱۵ و ۱۲ درصد کاهش یافت.

جدول ۱۱ نشان می‌دهد بیشترین کاهش مقاومت تراکم تک محوری در تراورتن نوع B و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. در نهایت می‌توان گفت در اثر تغییرات پی



شکل ۱۲: تغییرات مقاومت کششی در سه نوع تراورتن در اثر تغییرات پی اچ



شکل ۱۳: تغییرات مقاومت تراکم تک محوری در سه نوع تراورتن در اثر تغییرات پی اچ

۵- نتیجه‌گیری

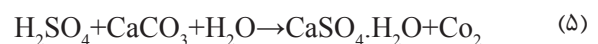
در این مقاله اثر باران اسیدی بر خواص فیزیکی و مکانیکی سه نوع سنگ تراورتن شامل تراورتن دره بخاری محلات (با علامت D در متن مشخص شده)، تراورتن کرم کاشان (با علامت B در متن مشخص شده) و تراورتن قرمز آذرشهر (با علامت R در متن مشخص شده) بررسی شد. خصوصیات فیزیکی بررسی شده شامل تخلخل موثر، سرعت امواج طولی و نفوذپذیری و خواص مکانیکی بررسی شده شامل مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک محوری می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد: - با کاهش پی اچ باران در هر سه نوع تراورتن تخلخل موثر افزایش می‌یابد. نفوذپذیری نیز که فقط برای تراورتن D تعیین شده است با کاهش پی اچ افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش تخلخل موثر در تراورتن B و کمترین افزایش در تراورتن R اتفاق می‌افتد.

- تخلخل موثر در تراورتن B، D و R برای نمونه‌هایی که تحت بارش باران اسیدی با پی اچ ۲٫۵ قرار گرفته‌اند به ترتیب ۱٫۱۵، ۱٫۱۲ و ۱٫۱۱ برابر میزان تخلخل موثر در حالت بارش باران غیراسیدی است. با کاهش پی اچ در هر سه نوع تراورتن سرعت امواج طولی کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش سرعت امواج طولی در تراورتن B و کمترین افزایش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. این موضوع نشان می‌دهد که ایجاد و گسترش منافذ در اثر بارش باران اسیدی در تراورتن B بیشتر از سایر تراورتن‌ها است.

جدول ۱۱: نسبت مقاومت تراکم تک محوری در سنگ تراورتن بعد از بارش باران اسیدی به مقاومت تراکم تک محوری بعد از بارش باران غیراسیدی (دارای پی اچ ۷)

نوع سنگ تراورتن			پی اچ
R	D	B	
۰٫۸۸	۰٫۸۵	۰٫۷۸	۲٫۵
۰٫۹۰	۰٫۸۷	۰٫۸۵	۴
۰٫۹۶	۰٫۹۴	۰٫۹۵	۵٫۵

تراورتن، انحلال بیشتر کربنات کلسیم و ایجاد منافذ بیشتر در تراورتن می‌شود. به همین علت سرعت امواج طولی در تراورتن B کمتر از دو تراورتن دیگر است. در این پژوهش هدایت الکتریکی باران غیراسیدی دارای پی اچ ۷ و باران اسیدی دارای پی اچ ۲٫۵ بعد از برخورد به نمونه‌ها که در یک ظرف جمع شده بود اندازه‌گیری شد. هدایت الکتریکی آب غیراسیدی ۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و آب اسیدی ۲۰۲۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده افزایش یون کلسیم در محلول است که در اثر کاهش پی اچ، انحلال کلسیم افزایش یافته است. اسید سولفوریک بر اساس رابطه ۵ با کربنات کلسیم واکنش می‌دهد و باعث انحلال کربنات کلسیم و تشکیل ژپس می‌شود [۱۴، ۱۵].



surface finish and composition on the deterioration of building stones exposed to acid atmospheres". Construction and Building Materials, 106: 392-403.

- [8] Gibeaux, S., Vázquez, P., De Kock, T., Cnudde, V., and Thomachot-Schneider, C. (2018). "Weathering assessment under X-ray tomography of building stones exposed to acid atmospheres at current pollution rate". Construction and Building Materials, 68: 187-198.
- [9] Zeng, X., Li, Y., Ran, Y., Yang, K., Qu, F., and Wang, P. (2018). "Deterioration mechanism of CA mortar due to simulated acid rain". Construction and Building Materials, 168: 1008-1015.
- [10] Mahdikhani, M., Bamshad, O., and Shirvani, M. F. (2018). "Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition". Construction and Building Materials, 167: 929-935.
- [11] Zhou, C., Zhu, Z., Zhu, A., Zhou, L., Fan, Y., and Lang, L. (2019). "Deterioration of mode II fracture toughness, compressive strength and elastic modulus of concrete under the environment of acid rain and cyclic wetting-drying". Construction and Building Materials, 228: 116809.
- [12] ISRM, (2007). "Suggested methods prepared by the commission on testing methods". In: Ulusay, Hudson (Eds.), International Society for Rock Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- [13] Boulin, P. F., Bretonnier, P., Gland, N., and Lombard, J. M. (2012). "Contribution of the steady state method to water permeability measurement in very low permeability porous media". Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies Nouvelles, 67(3): 387-401.
- [14] Zappia, G., Sabbioni, C., Riontino, C., Gobbi, G., and Favoni, O. (1998). "Exposure tests of building materials in urban atmosphere". The Science of the Total Environment, 224: 235-244.
- [15] Giavarini, C., Santarelli, M. L., Natalini, R., and Freddi, F. (2008). "A non-linear model of sulphation of porous stones: Numerical simulations and preliminary laboratory assessments". Journal of Cultural Heritage, 9: 14-22.

- با کاهش پی اچ در هر سه نوع تراورتن مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک محوری کاهش می‌یابد.

- تخلخل موثر مهم‌ترین عامل است که تاثیر باران اسیدی روی خواص سنگ تراورتن را بیشتر می‌کند زیرا باعث نفوذ بیشتر باران اسیدی در سنگ و انحلال بیشتر کربنات کلسیم می‌شود.

- در نهایت می‌توان گفت تراورتن R مقاوم‌ترین تراورتن در برابر باران اسیدی است و بعد از آن تراورتن D و B قرار می‌گیرد.

۶- سپاس‌گزاری

این اثر با حمایت مالی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است، لذا از مسوولین دانشگاه تقدیر و تشکر می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Winkler, E. M. (1994). "Stone in Architecture". 3rd Edition, Springer-Verlag, pp. 313.
- [2] Bell, F. G. (2004). "Engineering Geology and Construction". 1nd Edition, Spon Press, pp. 797.
- [3] Moreiras, S., Paraguassu, A., and Ribeiro, R. (2008). "Dimension stone for building facades: methodology for structural design". Bull Engineering Geology Environmental, 67: 53-57.
- [4] Sunil, B. M., Nayak, S., and Shrihari, S. (2006). "Effect of pH on the geotechnical properties of laterite". Engineering Geology, 85: 197-203.
- [5] نیکودل، م، جمشیدی، ا، حافظی مقدس، ن؛ ۱۳۸۹؛ "بررسی انحلال و زوال پذیری نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در محلولهای اسید سولفوریک و اسید نیتریک". نشریه علوم زمین، سال بیستم، شماره ۸۰، ص ۱۴۲-۱۳۵.
- [6] Singh, T. N., Sharma, P. K., and Khandelwal, M. (2007). "Effect of pH on the physico-mechanical properties of marble". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66(1): 81-87.
- [7] Vazquez, P., Carrizo, L., Thomachot-Schneider, C., Gibeaux, S., and Alonso, F. J. (2016). "Influence of



Effects of Acid Rain on Physical and Mechanical Properties of Travertine

Hosseini M.^{1*}, Fakhri D.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
ma.hosseini@eng.ikiu.ac.ir

2- M.Sc Student, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
danialfakhri.fkh@gmail.com

(Received: 28 Dec. 2019, Accepted: 11 Feb. 2020)

Abstract: One of the problems caused by air pollution is acid rain. The development of urban communities and subsequent use of air polluting vehicles on the one hand and the widespread use of travertine in building facades in Iran on the other hand have doubled the study of the effect of acid rain on the properties of travertine. In this study, three types of travertine (Travertine B, Travertine D and Travertine R) were studied. This paper investigates the effect of the rain at four pH (2.5, 4, 5.5 and 7) on its physical properties including effective porosity, longitudinal wave velocity and permeability, and its mechanical properties including tensile strength and uniaxial compressive strength. The results showed that as the pH decreases, the effective porosity increased and the longitudinal wave velocity, tensile strength and uniaxial compressive strength decreased. The highest increase in effective porosity due to decreasing pH was related to travertine B and the lowest increase was related to travertine R. The highest decrease in longitudinal wave velocity, tensile strength, and uniaxial compressive strength due to decreasing pH was related to travertine B and the lowest decrease was related to travertine R.

Keywords: Acid rain, Physical properties, Mechanical properties, Travertine, Building stone.

INTRODUCTION

The physico-mechanical properties of rocks are important parameters in the planning and design of mining and civil constructional works. These properties are adversely affected by acidic environments.

Travertine is composed mainly of calcite (CaCO₃).

The natural forces and agents of weathering, such as rain, snow, temperature, wind and atmospheric pollutants may have a degrading effect on the appearance and structural of travertine. In the past, studies such as research of Singh et al. have been conducted on the effect of acid rain on rock properties.

Singh et al. investigated effect of pH on the physico-mechanical properties of marble.

The study revealed that the physico-mechanical properties of marble are adversely affected by acidic watery environments. Both the unconfined and cohesive element of the shear strength of marble are reduced under acidic conditions while the angle of internal friction is not much affected by the pH of the solution. At pH 7, marble has its maximum strength. The strength decreases under increasingly acidic conditions.



As marble is composed of calcium carbonate, it is highly susceptible to attack by acidic agents, even when the solution is a very weak acid. The speed of the deterioration varies with the nature of the acid. The reduction in strength is due to the chemical reaction of the solution with the marble; the change in water characteristics reduces the bond strength between the different particles.

At a low pH value the dissolution of marble is faster as the acid is more able to attack the free charged particles that bind the CO₃ of the marble. The correlation coefficient between the pH and the physico-mechanical properties varies between 0.92 and 0.99; hence it is considered that the empirical equations established can be used for the estimation of the change in physico-mechanical properties of calcareous rocks in different pH environments [1].

Most research conducted around the world is focused on the effects of acid rain on Concrete. Little research has been conducted on the effects of acid rain on building stones. Moreover, such studies have mostly been conducted on marble. This study provides a new perspective in terms of the studied samples.

MATERIALS STUDIED AND THE METHOD OF EXPERIMENT

In this study, three types of travertine (Travertine B, Travertine D and Travertine R) were studied. Travertine blocks from mines were transferred to the laboratory. For microscopic studies, a thin section was prepared from the specimen and examined under a microscope.

The physical and mechanical properties of the specimen including dry weight, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and longitudinal wave velocity were determined using the methods proposed by the International Society of Rock Mechanics [2]. To determine the uniaxial compressive strength and the Brazilian tensile strength, cores with a diameter of 54 mm and a length/diameter ratio of 2 were used for uniaxial compressive strength and a diameter-to-thickness ratio of 2 for the Brazilian tensile strength. Saturation and immersion methods were used to determine the dry weight and effective porosity of the specimen. The results have been presented in Table 1.

Table 1. Physical and mechanical properties of dry travertins

Type of travertine	Dry unit weight (KN/m ³)	longitudinal wave velocity	Tensile Strength (MPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)
B	23.73	5469	3.77	28.55
D	23.95	5571	5.75	43.23
R	25.01	6005	6.85	53.03

In this study, three types of travertine (Travertine B, Travertine D and Travertine R) were studied. This paper investigates the effect of the rain at four pH (2.5, 4, 5.5 and 7) on its physical and mechanical properties.

TEST RESULTS

The results showed that as the pH decreases, the effective porosity (Figure 1) and permeability increased and the longitudinal wave velocity, tensile strength (Figure 2) and uniaxial compressive strength decreased.

CONCLUSION

The results of the present study on three types of travertine showed that by decreasing pH, longitudinal wave velocity and tensile strength of the samples decreased, while their porosity increased. Reduction of properties was different in three type travertine; so that the maximum reduction in longitudinal wave velocity, tensile strength, and uniaxial compressive was seen in the travertine B and the minimum reduction in the travertine R. Increase of properties was different in three type travertine; so that maximum increase in effective porosity was seen in the travertine B and the minimum increase in the travertine R.

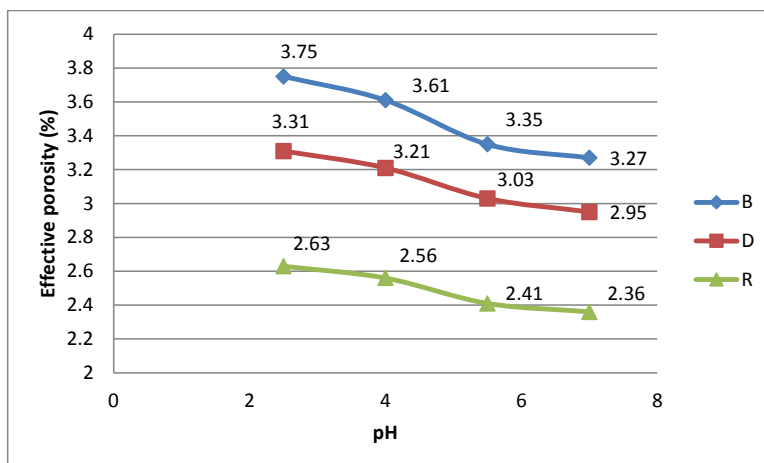


Figure 1. Effective porosity changes in three types of travertine due to pH changes

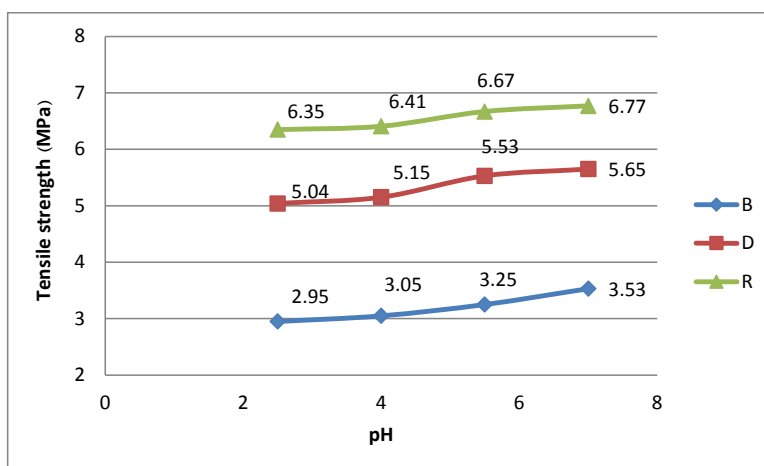


Figure 2. Tensile strength changes in three types of travertine due to pH changes

REFERENCES

- [1] Singh, T. N., Sharma, P. K., and Khandelwal, M. (2007). "Effect of pH on the physico-mechanical properties of marble". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66(1): 81-87.
- [2] ISRM, (2007). "Suggested methods prepared by the commission on testing methods". In: Ulusay, Hudson (Eds.), International Society for Rock Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.