

ارزیابی تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی سرعت موج فشاری و چگالی سنگ شیست

(مطالعه موردی: معدن انگوران)

سید زانیار سید موسوی

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

حسین توکلی

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

پرویز معارف وند

دانشکده مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محمدرضائی*

گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۶

*m.rezaei@uok.ac.ir

چکیده

در این تحقیق تأثیر چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب بر سرعت موج فشاری و چگالی سنگ شیست بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا ۱۳ عدد گمانه در معدن انگوران حفاری و تعداد ۲۵ نمونه استوانه‌ای آماده‌سازی گردید. سپس، نمونه‌ها در آزمایشگاه با استفاده از فرآیند انجماد-ذوب هوازده و پارامترهای سرعت موج فشاری و چگالی خشک نمونه‌ها در چرخه‌های ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ اندازه‌گیری گردید. تحلیل نتایج نشان‌دهنده کاهش نمایی سرعت موج فشاری (۵۰٪ کاهش) و چگالی خشک (۲۰٪ کاهش) به‌ازای افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب می‌باشد. همچنین، سرعت موج فشاری با افزایش چگالی خشک به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. با برآزش نتایج حاصله، دو رابطه تجربی مجزا جهت محاسبه سرعت موج فشاری و چگالی خشک در سنگ شیست به‌ازای چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب و یک رابطه هم بین سرعت موج فشاری و چگالی خشک ارائه شده است. بعلاوه، بافت نمونه‌ها هم در حالت بکر و هم پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب به‌وسیله میکروسکوپ الکترونیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان‌دهنده متراکم بودن بافت نمونه‌ها قبل از هوازده‌گی و افزایش فاصله بین ناپیوستگی‌ها بعد از هوازده‌گی می‌باشد. در نهایت، نتایج اعتبارسنجی نشان داد که همخوانی خوبی بین خروجی حاصل از تحقیق حاضر و مطالعات قبلی وجود دارد.

کلمات کلیدی: معدن انگوران، شیست، چرخه انجماد-ذوب، سرعت موج فشاری، چگالی خشک

مقدمه

مشکلات اصلی در این مناطق، هوازده‌گی سنگ‌ها در اثر شرایط آب و هوایی ویژه این مناطق است که باعث سست شدن سنگ‌ها و تضعیف خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها می‌شود. در مناطق سرد و کوهستانی آب ناشی از بارش‌های جوی مانند برف و باران به داخل منافذ و ترک‌های سنگ نفوذ می‌کند. زمانی که دمای هوا در این مناطق به زیر صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد، آب منجمد شده و حجم آن حدوداً ۹ درصد افزایش می‌یابد که باعث ایجاد ریز ترک‌ها و تمرکز تنش در سنگ می‌گردد (Mamillan, 1979; Inigo et al., 2000). با افزایش دما، یخ مابین ناپیوستگی‌های سنگ ذوب می‌شود و از میان خلل و فرج و ترک‌ها عبور کرده و باعث خرد شدن سنگ می‌گردد (Chen et al., 2004). مراحل تخریب سنگ در اثر فرآیند انجماد-ذوب در شکل ۱ نشان داده شده است. تکرار چرخه‌های انجماد-ذوب باعث گسترش ترک‌های موجود در سنگ و تشکیل ترک‌های جدید می‌گردد که در نهایت منجر به تخریب سنگ شده و می‌تواند خسارات جدی را به پروژه‌های احداث شده و یا در حال ساخت وارد کند (Zhang et al., 2004; Sousa et al., 2005; Grossi et al., 2007; Lista et al., 2015; park et al., 2015). ارزیابی میزان کاهش پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ و ارتباط بین آن‌ها در اثر چرخه‌های انجماد-ذوب، در مراحل

تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ در پروژه‌های معدنی و عمرانی که غالباً با سنگ سر و کار دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در مراحل طراحی اولیه و نهایی سازه‌های مهندسی مدنظر قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری این پارامترها معمولاً با استفاده از آزمایش‌های مکانیک سنگی انجام می‌گیرد. با توجه به هزینه‌بر بودن این آزمایش‌ها، می‌توان با بررسی شاخص‌های معرف و کم هزینه، تخمینی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها داشت و با توجه به اهمیت پروژه، تعداد آزمایش‌های لازم جهت شناسایی سنگ را کاهش داد (Khanlari et al., 2000). برای شناخت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر از شاخص‌هایی نظیر چگالی، سرعت سیر موج اولتراسونیک، تخلخل، دوام و مقاومت سنگ استفاده می‌شود (Borhani et al., 2015). همچنین، استفاده از روش‌های غیر مخرب (آزمایش‌های دینامیکی) به منظور برآورد دقیق ثابت‌های الاستیکی در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است (Fahimifar and Soroush, 2001).

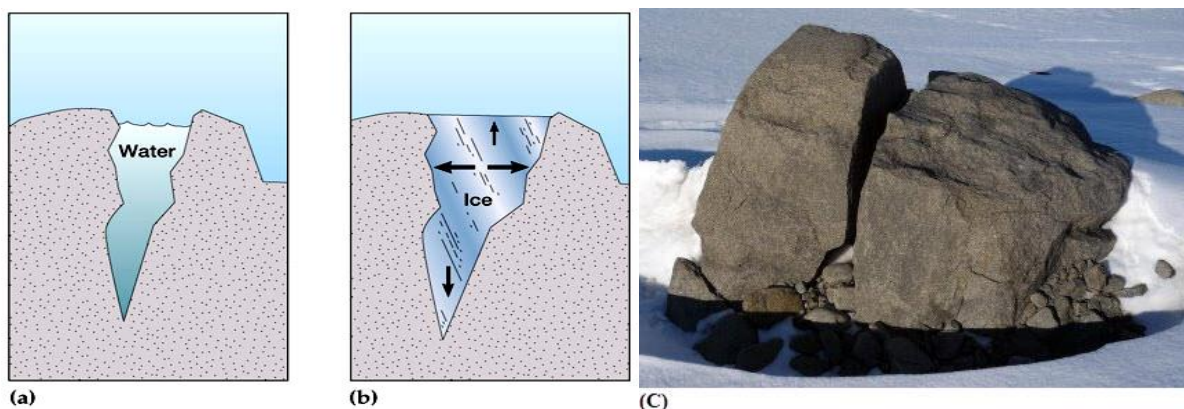
با توجه به توسعه و پیشرفت کشورها، ساخت پروژه‌های معدنی و عمرانی از جمله سدها، تونل‌ها، معادن و ساختمان‌های مسکونی-تجاری در مناطق کوهستانی در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است. یکی از

بررسی شده است که نتایج نشان‌دهنده افزایش سرعت موج فشاری با افزایش چگالی می‌باشد (Babuska, 1968).

ارتباط بین سرعت موج فشاری و چگالی رسوبات دریا توسط Hamilton در سال ۱۹۷۸ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، ارتباط سرعت موج فشاری با چگالی و مقاومت فشاری سنگ‌های کربناته توسط Yaser و Erdogan در سال ۲۰۰۴ مورد مطالعه قرار گرفته است. ارتباط موج فشاری و چگالی خشک نمونه‌های سنگ بکر هم توسط برخی از محققین بررسی شده است که در آن با افزایش چگالی خشک، سرعت موج فشاری به صورت نمایی افزایش یافته است (Kurtulus et al., 2016). علاوه بر مطالعات فوق، مهم‌ترین کارهای پژوهشی انجام شده در زمینه تأثیر فرآیند انجماد-ذوب بر روی پارامترهای فیزیکی سنگ از جمله چگالی، تخلخل، جذب آب و در جدول ۱ نشان داده شده است که در آن تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب نوع مورد استفاده برای آزمایش هم ارائه شده است.

سنگ‌های دگرگونی در راستای شیب‌توزیته به راحتی شکسته شده و در زمان حفاری و مغزه‌گیری لازم است بیشترین زمان و هزینه جهت تهیه مغزه سالم مورد نیاز صرف شود. به همین دلیل مطالعه تأثیر فرآیندهای هوازگی مخصوصاً چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. سطوح ضعیفی که در ساختار سنگ‌های دگرگونی به ویژه سنگ شیست وجود دارد، موجب گردیده است که سریعاً تحت تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب قرار گرفته و هوازده شوند. با توجه به اینکه روند ساخت پروژه‌های عمرانی و معدنی در مناطق کوهستانی کشور در حال توسعه می‌باشد و بستر بسیاری از پروژه‌های مذکور بر روی سنگ‌های دگرگونی قرار دارد لذا مطالعه تأثیر هوازگی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها بسیار ضروری می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی سرعت موج فشاری و چگالی سنگ شیست در معدن انگوران و همچنین ارتباط این دو پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

اولیه طراحی ساخت پروژه‌ها در مناطق سردسیر، مسئله‌ای مهم و حیاتی می‌باشد که بایستی مورد توجه ویژه قرار گیرد (Tan et al., 2011; Jamshidi et al., 2016). انتشار موج اولتراسونیک در داخل سنگ، ثبت اطلاعات ساختاری و تشکیل دهنده آن‌ها و تحلیل اطلاعات اولتراسونیک، روش مؤثری برای تخمین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ می‌باشد (Mahmoud et al., 2010; El-Gohary, 2013; Özgan et al., 2015; Wang et al., 2016). مشخصات اولتراسونیک سنگ هوازده مانند سرعت موج فشاری شاخص جذابی در کارهای ژئوتکنیکی، مکانیک سنگی و مهندسی سنگ می‌باشد. پارامتر سرعت موج فشاری در سنگ به چگالی، لیتولوژی، تخلخل و درصد رس موجود بستگی دارد (Domenico, 1986; Han et al., 1984). همچنین، چگالی سنگ تابع منافذ، درزه‌ها، شکافها و سایر فضاهای باز موجود در سنگ می‌باشد. چگالی یک نمونه مشخص سنگ با افزایش عمق بیشتر می‌شود، چرا که با افزایش عمق و در نتیجه فشار سنگ‌های فوقانی، درزه‌ها و ترک‌های موجود در سنگ به تدریج بسته می‌شوند. بنابراین سن سنگ رابطه مستقیم با چگالی آن دارد. از طرف دیگر هوازگی سنگ‌ها باعث کاهش چگالی آن‌ها می‌شود. این موضوع به خاطر افزایش درزه و ترک در سنگ، تجزیه شیمیایی و تورم برخی از کانی‌ها در اثر هوازگی می‌باشد. در نتیجه بررسی ارتباط بین سرعت موج فشاری و خصوصیات فیزیکی سنگ در وضعیت بکر و هوازده معیار مناسبی جهت ارزیابی میزان تخریب سنگ و بررسی تغییرات میزان همبستگی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در اثر هوازگی می‌باشد. در سال‌های اخیر محققین مختلفی مطالعات خود را در زمینه تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بر اساس اندازه‌گیری موج اولتراسونیک انجام داده‌اند (Spetzler et al., 1968; Ozgan, 2007; Chen et al., 2014; Wang et al., 2015). نتایج مطالعات فوق حاکی از کاهش خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها پس از اعمال چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب می‌باشد. برخی از محققین از سرعت موج فشاری جهت ارزیابی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های هوازده استفاده کرده‌اند (Wang et al., 2015). ارتباط سرعت موج فشاری و چگالی نیز توسط تعدادی از محققین



شکل ۱- مراحل تخریب سنگ در اثر فرآیند انجماد-ذوب.

Fig. 1. Rock degradation steps due to freezing-thawing process (a-c).

جدول ۱- مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی سرعت موج فشاری سنگ.

Table 1. Conducted studies on the effect of F-T cycles on rock compressive wave velocity.

Row	Reference	Number of F-T cycle	Rock and soil type
1	Ruedrich et al. (2011)	1400	Granite, Tuff, Limestone
2	Draebing and Krautblatter (2012)	-	Carbonate, Metamorphic, Gneiss
3	Ozbek (2014)	50	Black Ignimbrite, Yellow Ignimbrite, Gray Ignimbrite, Red Ignimbrite
4	Khanlari and Abdilor (2015)	30	Sandstone
5	Fener and Ince (2015)	30	Andesite
6	Ding and Song (2016)	50	Sandstone
7	Celik (2017)	25	Travertine

ژئومکانیکی توده سنگ ضروری می‌باشد. بر همین اساس، این موضوع در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات سنگ‌شناسی

مطالعات سنگ‌شناسی علاوه بر شناسایی ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها، معیار مناسبی برای ارزیابی دوام آن‌ها در مقابل عوامل هوازدگی به‌شمار می‌رود (Dressen and Dusar, 2004). در این تحقیق، مطالعات سنگ‌شناسی و شناسایی کانی‌های موجود در سنگ با مطالعه مقطع نازک تهیه شده از سنگ شلیست و تحلیل XRD مشخص شده است (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که با توجه به پاراژنز موجود در سنگ که شامل کانی‌های کوارتز، کلسیت، بیوتیت و کلریت است، می‌توان انتظار داشت که رخساره دگرگونی در حد شلیست سبز باشد که در اثر دگرگونی‌های درجه ضعیف تشکیل شده است. همچنین درصد حجمی عناصر موجود در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه نتایج به‌دست آمده، تحلیل XRD نمونه‌های شلیستی مطالعات مقطع نازک را تأیید می‌نماید. همانطور که مشاهده می‌شود ۵۰ درصد حجم سنگ از کانی‌های ورقه‌ای (کلریت و بیوتیت) تشکیل شده‌اند. این کانی‌ها موجب تضعیف شدن سنگ در برابر عوامل هوازدگی از جمله نفوذ آب، کاهش دما، تمرکز تنش و ... می‌گردند.

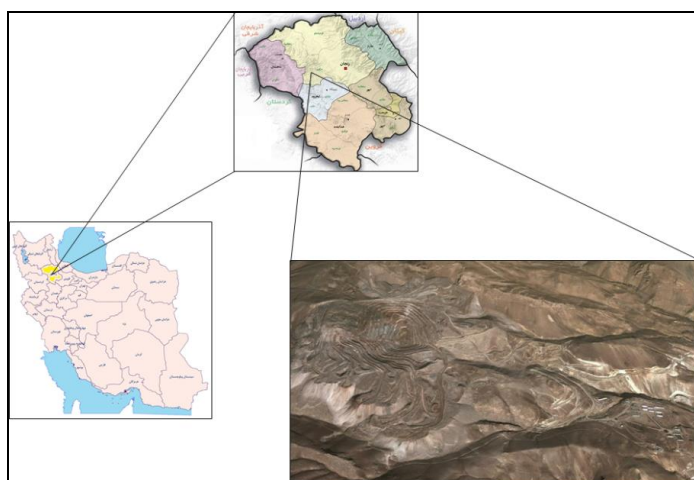
منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

سنگ‌های شلیست مربوط به دیواره معدن سرب و روی انگوران به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. معدن انگوران در فاصله ۱۲۵ کیلومتری جنوب غربی زنجان و در منطقه‌ای با ارتفاع متوسط ۲۹۵۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۲). ذخیره معدن مابین سنگ آهک (دیواره بالادست) و شلیست (دیواره پایین‌دست) قرار دارد (شکل ۳). ضخامت لایه شلیست حدوداً ۱۰۰۰ متر می‌باشد و عمدتاً از کالک شلیست تشکیل شده است. همچنین، ضخامت لایه آهکی حدوداً ۲۰۰ متر می‌باشد. سنگ‌شناختی دیواره غربی معدن انگوران در سال‌های اخیر به دلیل گسترش عملیات معدنکاری و افزایش عمق معدن، از آهک به شلیست تغییر یافته و در حال حاضر قسمت عمده دیواره غربی معدن از سنگ شلیست تشکیل شده است. سنگ شلیست دیواره غربی معدن انگوران به دلیل در معرض گرفتن شرایط جوی مذکور و همچنین پتانسیل بالای هوازدگی این سنگ به دلیل وجود صفحات ناپیوستگی (شلیستوزیته، فولیاسیون و لایه-بندی) و کانی‌های رسی در ترکیب کانی‌شناسی، در اثر چرخه‌های متوالی انجماد-ذوب شدیداً هوازده می‌شود. هوازدگی شلیست و ناپایداری حاصل از آن در سال‌های اخیر هزینه‌های هنگفتی را در زمینه باطله برداری به معدن تحمیل نموده است. بنابراین، مطالعه و ارزیابی تأثیر هوازدگی بر خصوصیات

جدول ۲- نتیجه مطالعه سنگ‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان.

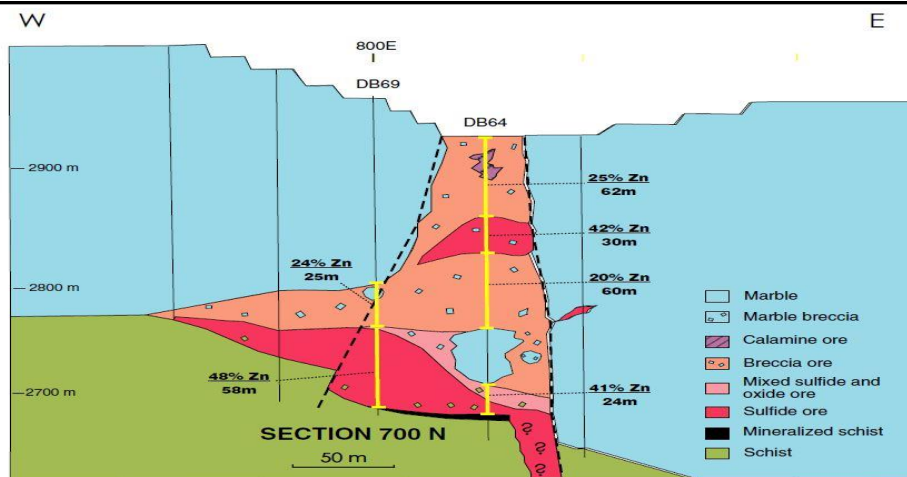
Table 2. The result of petrographic study using the polarizing microscope.

Mineral	Calcite	Quartz	Biotite	Chlorite	Opac
Content (%)	20	20	25	25	10



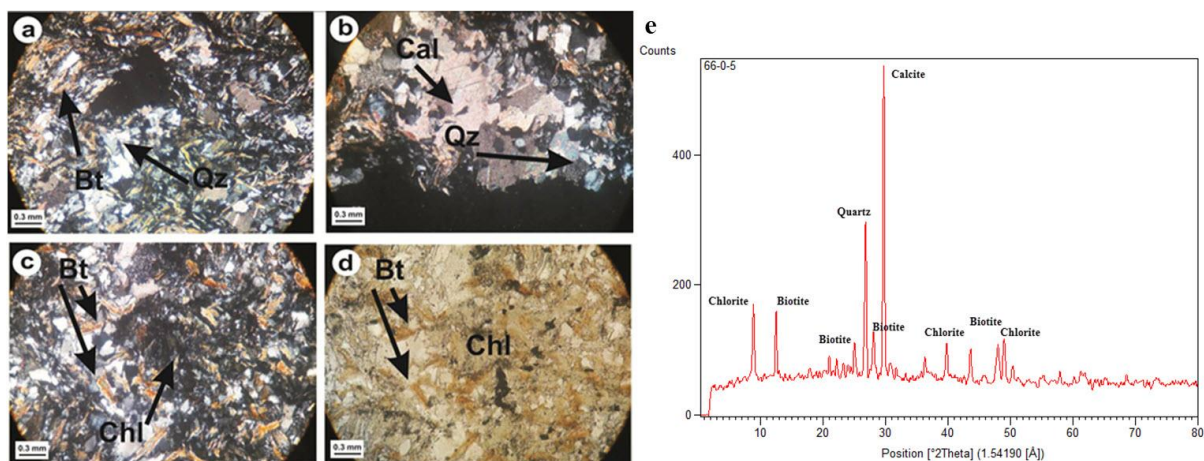
شکل ۲- موقعیت جغرافیایی معدن انگوران.

Fig. 2. Location of Angoran mine.



شکل ۳- وضعیت قرارگیری ماده معدنی بین سنگ‌های شیست و آهک.

Fig. 3. The position of ore body between schist and limestone rocks.



شکل ۴- (a) و (b) کانی‌های کوارتز (Qz) و بیوتیت (Bt) که به ترتیب در نور xpl و ppl مشخص شده است، (c) و (d) کانی‌های کلسیت (Cal) و کلریت (Chl) که به ترتیب در نور xpl و ppl مشخص شده است و (e) آنالیز XRD.

Fig. 4. (a-b) image of quartz and biotite minerals in xpl and ppl lights, respectively, (c) and (d) image of calcite and chlorite minerals in xpl and ppl lights respectively, and (e) XRD analysis.

محاسبه شده است بطوریکه ابتدا حجم نمونه‌ها با روش‌های مختلف اندازه‌گیری شده، سپس نمونه‌ها در آون با دمای ۱۰۵ درجه خشک می‌شوند. در نهایت با استفاده از حجم و جرم خشک آن‌ها، چگالی خشک نمونه‌ها محاسبه شده است.

اندازه‌گیری سرعت موج فشاری و چگالی

سرعت موج فشاری در سنگ به لیتولوژی، تخلخل، ساختارهای ناپیوستگی و مقدار رس محتوا بستگی دارد. یکی از روش‌های بررسی تأثیر تغییرات میکروساختارها (در اثر هوازدگی) بر روی رفتار مکانیکی سنگ، اندازه‌گیری سرعت موج الاستیک می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت موج فشاری، ابتدا طول مغزه‌ها اندازه‌گیری شده و سپس موج الاستیک به داخل آنها فرستاده شده است. برای حداکثر دقت در اندازه‌گیری زمان، ترانس دیوسر و دو سطح نمونه کاملاً جفت شده و به همین منظور انتهای سطوح مغزه‌ها کاملاً ساییده و صاف شده‌اند. ترانس دیوسرها در دو سر نمونه قرار داده شده و زمان عبور پالس‌ها ثبت شده است (شکل ۷). در نهایت، مقدار سرعت موج فشاری از نسبت طول مغزه بر زمان عبور پالس به دست آمده است. برای محاسبه چگالی نمونه‌ها از دو روش استفاده شده است. در روش اول با محاسبه جرم و حجم نمونه‌ها، چگالی آن‌ها تعیین شده است. این روش برای نمونه‌هایی به کار می‌رود که

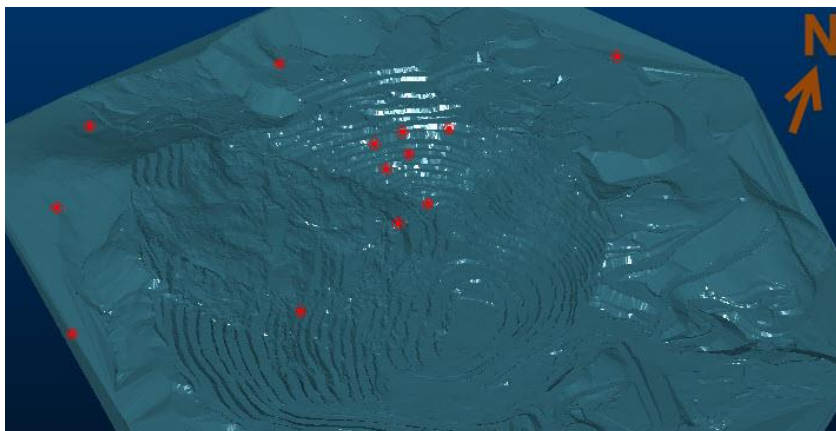
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور مغزه‌گیری و تهیه نمونه‌های مورد نیاز از سنگ شیست، ۱۳ گمانه به متر از کلی ۱۲۰۰ متر در محدوده معدن انگوران حفر گردید (شکل ۵). در این تحقیق ۲۵ عدد نمونه شیست برای انجام آزمایش تعیین سرعت موج فشاری، برش داده شده است (شکل ۶). قطر مغزه‌های حفاری ۶۳ میلی‌متر می‌باشد. این نمونه‌ها به شکل استوانه با قطر ۶۳ میلی‌متر و با نسبت ارتفاع به قطر ۲/۴ آماده شده است. زاویه شیستوزیته نمونه‌ها با محور افقی حدوداً ۱۵ درجه می‌باشد. سر و ته نمونه‌های آزمایش به موازات یکدیگر و عمود بر محور طولی نمونه بریده شده و تا ± 0.1 میلی‌متر صیقل داده شده و سر و ته نمونه آزمایش با دقت ± 0.1 رادیان صاف شده‌اند. اندازه‌گیری طول نمونه‌های مورد آزمایش با دقت ۰/۱ میلی‌متر صورت گرفته است. جهت انجام آزمایش سرعت موج فشاری مطابق استاندارد ASTM D2845، نمونه‌های استوانه‌ای با حداقل بعد جانبی پنج برابر طول موج تهیه گردیده است. چگالی خشک نمونه‌ها بر پایه روش پیشنهادی ISRM (Fahimifar and sorous, 2003) بر

های نامنظم با استفاده از بالن تعیین حجم شده و وزن آن‌ها به وسیله ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. در هر چرخه مشخص انجماد ذوب چگالی ۱۰ عدد نمونه اندازه‌گیری گردید (شکل ۹).

اشکال هندسی منظم دارند (مانند مغزه‌های استوانه‌ای و مکعبی). نمونه‌های منظم با نسبت ارتفاع به قطر حدوداً ۰/۹ (شکل ۸) آماده شده و در هر چرخه انجماد-ذوب چگالی ۵ عدد نمونه اندازه‌گیری شد (مجموعاً ۲۵ عدد). نمونه-



شکل ۵- موقعیت گمانه‌های حفر شده در محدوده معدن انگوران.

Fig. 5. Location of drilled boreholes in Angouran mine area.



شکل ۶- نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمایش.

Fig. 6. Prepared samples for test implementation.



شکل ۷- اندازه‌گیری سرعت موج فشاری نمونه‌های سنگ شیست.

Fig. 7. Compressive wave velocity measurement of schist samples.



شکل ۸- اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های منظم.

Fig. 8. Measuring the density of regular samples.



شکل ۹- اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های غیر منظم.

Fig. 9. Measuring the density of irregular samples.

شده است. تصویر سطح نمونه‌ها در حالت بکر و همچنین پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پس از طی ۷۵ چرخه انجماد-ذوب، ترک‌هایی در جهت موازی با شیب‌توزینه در نمونه‌های شیستی ایجاد شده و همچنین بازشدگی ناپیوستگی‌ها افزایش یافته است. آب موجود در ناپیوستگی‌ها در اثر کاهش دما منجمد می‌شود که در آن با تبلور بلورهای یخ، به دیواره ناپیوستگی‌ها فشار وارد می‌شود. زمانیکه این فشار به اندازه مقاومت کششی سنگ افزایش می‌یابد میکروتُرک‌های جدید در بدنه نمونه ایجاد شده و ترک‌های موجود گسترش می‌یابند. سرعت موج فشاری بازتابی از میزان تراکم شکستگی‌ها در سنگ می‌باشد به‌طوری‌که ترک‌های بازی که عمود بر راستای طولی نمونه هستند بیشترین تأثیر را در کاهش سرعت موج فشاری دارند. بالعکس، درزه‌های بسته تأثیر چندانی در کاهش سرعت موج فشاری ندارند.

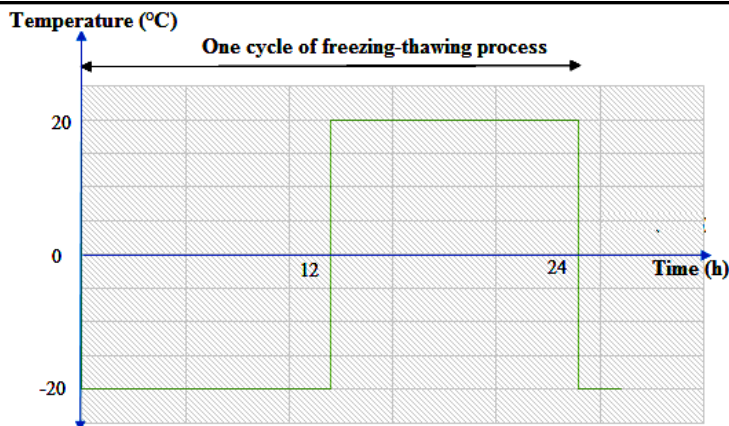
فرآیند انجماد-ذوب

باتوجه به اینکه در معدن انگوران بیشتر از ۶ ماه از سال بارش برف سطح معدن را سفید پوش می‌کند (شکل ۱۰)، لذا در این تحقیق برای اعمال چرخه‌های انجماد-ذوب سعی شده است که مشابه شرایط جوی منطقه مورد مطالعه اقدام گردد به‌طوری‌که ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب اشباع شده، سپس در فریزر با دمای ۲۰- به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفته و در مرحله آخر هم به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۲۰+ درجه قرار گرفته‌اند. بنابراین، هر چرخه انجماد-ذوب ۲۴ ساعت طول کشیده است. لازم به ذکر است که قانون خنک شدن-گرم شدن نیوتون در این چرخه‌های انجماد-ذوب اعمال شده و تغییرات دمایی، مسیر مشابهی را در هر چرخه انجماد-ذوب طی نموده که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این مطالعه، تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ چرخه جهت انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته



شکل ۱۰- وضعیت پله‌های معدن در فصل پاییز و زمستان.

Fig. 10. The status of mine benches in autumn and winter seasons.



شکل ۱۱- شرایط اعمال یک چرخه فرآیند انجماد-ذوب.

Fig. 11. Conditions of applying one cycle of freezing-thawing process.

نتایج و بحث

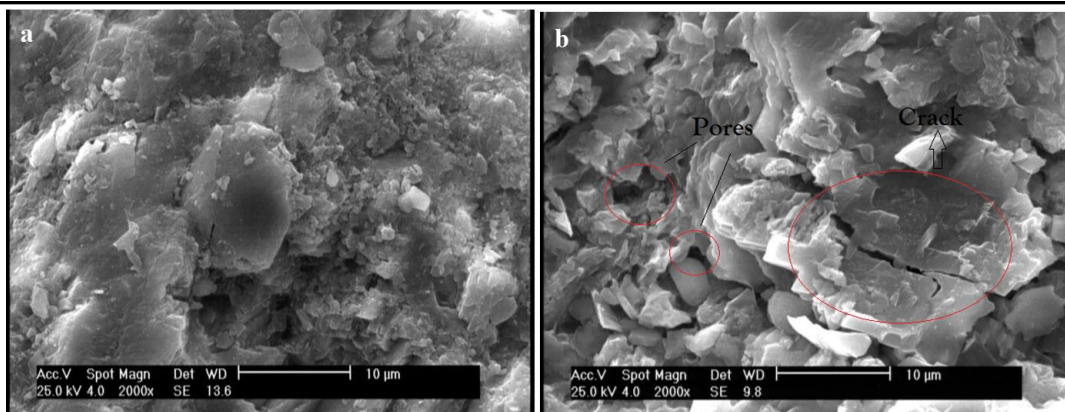
های انجماد-ذوب در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می-شود توزیع سرعت در چرخه‌های انجماد-ذوب مختلف نزدیک به توزیع نرمال می‌باشد. با توجه به وجود شیب‌توزیته، ساختارهای زمین‌شناسی و همچنین کانی‌هایی با مشخصات تبلور متفاوت، بازه تغییرات سرعت موج فشاری در سری چرخه‌های مختلف گسترده بوده و انحراف معیار زیادی دارد. بر اساس داده‌های فوق، نمودار تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نمودار ترسیم شده، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، سرعت موج فشاری نمونه‌ها به صورت خطی کاهش یافته است. کاهش V_p ناشی از تشکیل ریز ترک‌های جدید و همچنین گسترش ناپیوستگی‌های موجود می‌باشد. ریز ترک‌ها در اثر تکرار چرخه‌های انجماد-ذوب ایجاد شده و معمولاً در مرز کانی‌ها تشکیل می‌گردند. میکرو ترک‌هایی که در اثر اختلاف دمایی ایجاد می‌گردند در مرز دانه‌ها قرار دارند و الزاماً ارتباطی به منافذ و ترک‌های قبلی ندارند. همچنین گسترش ترک‌های موجود عمده‌تاً در اثر نفوذ آب به داخل شیب‌توزیته سنگ و افزایش حجم آن در اثر انجماد می‌باشد که به خودی خود باعث تمرکز تنش در دیواره شیب‌توزیته و گسترش آن می‌گردد. همچنین، زمانیکه آب با سنگ در ارتباط باشد تخلخل سنگ افزایش یافته و موجب کاهش سرعت موج فشاری می‌گردد. بر عکس تخلخل، امکان دارد نفوذپذیری سنگ در اثر واکنش آب با کانی‌های رسی و افزایش حجم آن‌ها، کاهش یابد.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات ساختاری نمونه‌ها در اثر اعمال چرخه-های انجماد-ذوب و تأثیر هوازدگی بر روی تراکم ذرات و تغییرات بافت آن‌ها، نمونه‌های سالم و دست نخورده (بکر) و همچنین نمونه‌های هوازده (پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب)، با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی مطالعه گردید و نتایج حاصله در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بافت سنگ در نمونه بکر متراکم بوده و کانی‌های ورقه‌ای سنگ شیبست (همانند میکا) به صورت فشرده بر روی هم قرار گرفته‌اند. پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب، حفرات و میکروتراک‌های جدید در سنگ تشکیل شده و همچنین ترک‌های قبلی گسترش یافته است. با توجه به اینکه سیمان سنگ از کانی کلسیت تشکیل شده است و همچنین زمانیکه این کانی در تماس با آب قرار می‌گیرد شسته می‌شود، لذا هوازدگی موجب افزایش حفرات و فضاهای خالی در سنگ شده است. زمانیکه سنگ‌های دگرگونی در معرض عوامل جوی قرار می‌گیرند آب به سطح تماس کانی‌های ورقه‌ای سنگ همانند بیتویت و کلریت نفوذ کرده و انجماد آن باعث افزایش فاصله مابین این کانی‌ها می‌گردد. پس از بررسی بافت نمونه‌ها، آزمایش تعیین سرعت موج فشاری بر روی نمونه‌ها طبق اصول استاندارد تشریح شده در بخش‌های قبلی، در چرخه‌های انجماد-ذوب ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ انجام شد. برای هر سری چرخه هوازدگی، پنج عدد نمونه و در مجموع ۲۵ عدد نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. پراکندگی سرعت موج فشاری و محدوده تغییرات آن برای انواع مختلف چرخه-



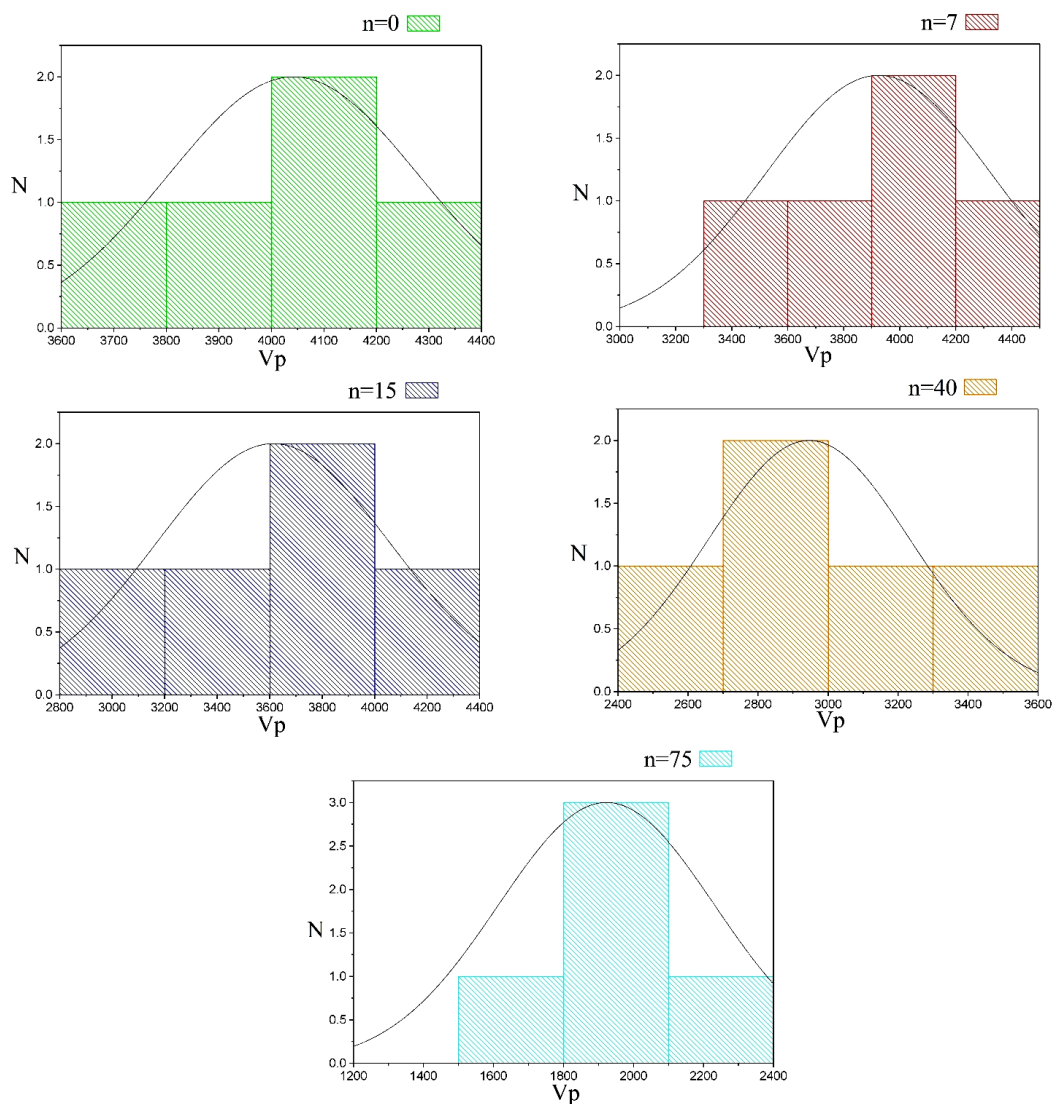
شکل ۱۲- (a) تصویر نمونه بکر و (b) نمونه هوازده (بعد از ۷۵ چرخه انجماد-ذوب).

Fig. 12. (a) Image of intact sample, and (b) weathered sample, after 75 freeze-thaw cycles.



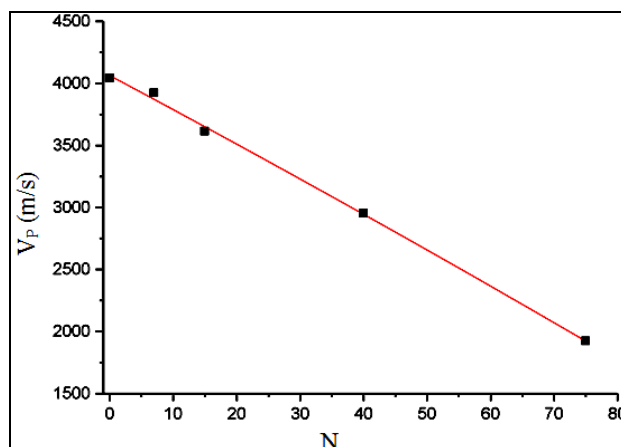
شکل ۱۳- (a) عکس سطح نمونه سنگ شیست قبل از اعمال هوازدگی و (b) بعد از ۷۵ چرخه انجماد-ذوب.

Fig. 13. (a) Surface image of the schist rock sample before weathering, and after 75 cycles F-T (b).



شکل ۱۴- توزیع مقدار سرعت موج فشاری در چرخه‌های انجماد-ذوب مختلف (n: چرخه انجماد-ذوب، N: تعداد نمونه).

Fig. 14. Distribution of compressive wave velocity in different F-T cycles (n: F-T cycle, N: number of samples).



شکل ۱۵- نمودار تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب.

Fig. 15. Diagram of compressive wave velocity changes versus number of F-T cycles.

افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، ترک‌های سنگ افزایش یافته و مقاومت آن در برابر عوامل جوی کاهش پیدا می‌کند.

در جدول ۳ مؤلفه‌های آماری سرعت موج فشاری اندازه‌گیری شده شامل میانگین، انحراف معیار، کمترین و بیشترین مقدار در چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب ذکر شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین سرعت موج فشاری با افزایش چرخه‌های انجماد-ذوب کاهش یافته است. تغییر در میکرو ساختارها سرعت انتقال موج فشاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش شکستگی‌ها (منافذ)، زمان عبور موج از داخل نمونه افزایش و در نتیجه سرعت موج اولتراسونیک کاهش می‌یابد. در واقع، منافذ و شکستگی‌ها انعکاس و شکست موج و انرژی آن را کاهش می‌دهد.

با برازش داده‌های حاصل از شکل ۱۵، رابطه ۱ جهت محاسبه سرعت موج فشاری در سنگ شیبست در چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب ارائه شده است.

$$V_p = 4072.4 - 28.55N \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن V_p سرعت موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه و N تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب می‌باشد.

با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مقدار کاهش سرعت موج فشاری در چرخه‌های ابتدایی انجماد-ذوب کمتر بوده و هر چه تعداد چرخه‌های مذکور افزایش یابد، مقدار افت بیشتر سرعت موج فشاری بیشتر خواهد بود. دلیل این امر مقاومت اولیه سنگ در برابر عوامل تخریبی می‌باشد به طوری که با

جدول ۳- نتایج آزمایش تعیین سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه) بر روی نمونه‌های شیبست در چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب.

Table 3. Test results of compressional wave velocity (m/s) on schist samples in different freezing-thawing cycles.

F-T cycle	Average	Standard deviation	Minimum	Maximum
0	4041.92	139.62	3742.84	4357.6
7	3923.34	404.78	3309.37	4246.68
15	3613.15	443.78	2951.76	4107.17
40	2950.26	278.83	2551.95	3309.9
75	1992	309.28	1501.31	2357.15

مشخص شده، چگالی ۱۰ عدد نمونه غیرمنظم و پنج عدد نمونه منظم اندازه‌گیری شده (مجموعاً ۷۵ عدد نمونه) و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

همانند آزمایش سرعت موج فشاری، مقدار چگالی خشک نمونه‌ها نیز در چرخه‌های انجماد-ذوب مشخص شده (۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵) بر اساس روش پیشنهادی ISRM محاسبه شده است بطوریکه در هر یک از چرخه‌های

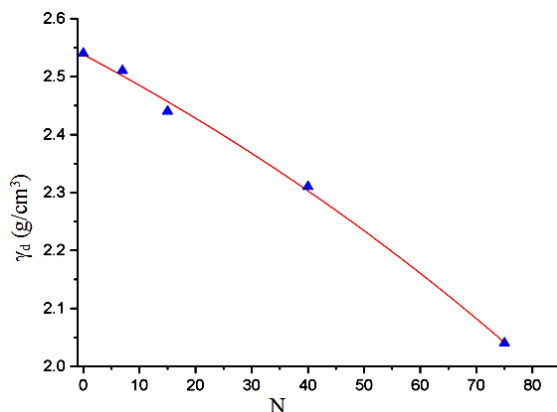
جدول ۴- نتایج آزمایش تعیین چگالی خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) بر روی نمونه‌های شیبست در چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب.

 Table 4. Results of dry density (gr/cm^3) determination on schist samples in different freezing-thawing cycles.

F-T cycle	Average	Standard deviation	Minimum	Maximum
0	2.54	0.08444	2.45	2.66
7	2.51	0.07791	2.45	2.64
15	2.44	0.04062	2.40	2.49
40	2.31	0.11136	2.17	2.45
75	2.04	0.08396	1.95	2.14

های جدید ذوب شده و حرکت می‌کند، تراکم ناپیوستگی‌های سنگ افزایش می‌یابد. تخریب در سنگ پس از چرخه‌های انجماد-ذوب، به دلیل فشار هیدرولیکی می‌باشد که در طول فرآیند انجماد-ذوب به وجود می‌آید. تشکیل ترک‌های جدید و گسترش ترک‌های موجود نیازمند فشار می‌باشد که با تبلور بلورهای یخ در چرخه‌های ابتدایی انجماد-ذوب و نرخ متفاوت گسترش کانی-های موجود در چرخه‌های بعدی، ایجاد می‌شود.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود میانگین چگالی خشک نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب کاهش یافته است. نمودار تغییرات چگالی در مقابل چرخه‌های هوازدگی در شکل ۱۶ نشان داده شده است که در آن، با افزایش درجه هوازدگی، میانگین چگالی خشک نمونه‌های شیبستی به صورت نمایی کاهش یافته و با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، چگالی نمونه‌ها کاهش بیشتری داشته است. زمانیکه آب منجمد شده در داخل ترک-



شکل ۱۶- نمودار تغییرات چگالی خشک در مقابل افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب.

Fig. 16. Diagram of dry density variations versus increasing the number of freezing-thawing cycles.

چرخه‌های انجماد-ذوب در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر دو پارامتر طی روند مشابهی با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، کاهش یافته‌اند. در چرخه انجماد-ذوب ۷۵، کاهش سرعت موج فشاری حدود ۵۰٪ می‌باشد درحالی‌که در چرخه مذکور، چگالی خشک نمونه‌ها به میزان ۲۰٪ کاهش داشته است.

سرعت انتقال موج الاستیک در نمونه‌های سنگی عمدتاً به چگالی آن بستگی دارد. بنابراین، سرعت موج فشاری ابزار خوبی برای بررسی کیفیت سنگ تحت تاثیر هوازدگی می‌باشد. بر این اساس، تغییرات سرعت سیر موج فشاری به ازای تغییر چگالی خشک نمونه‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش چگالی، سرعت موج فشاری به صورت نمایی افزایش یافته است. به منظور محاسبه سرعت موج فشاری بر حسب مقدار چگالی خشک نمونه‌های شیبستی، رابطه ۳ از نمودار فوق استخراج و ارائه شده است.

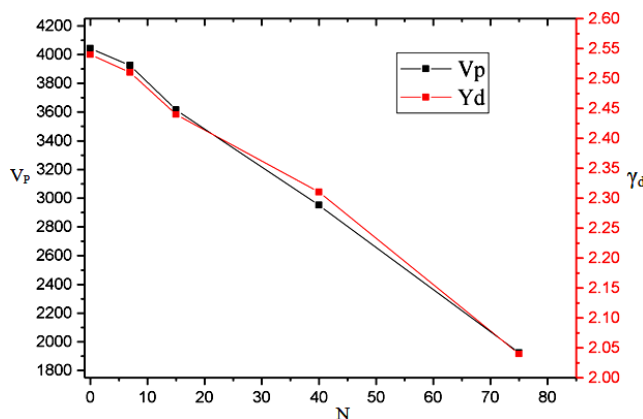
همچنین جهت محاسبه چگالی در چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب رابطه ۲ برازش و ارائه شده است.

$$\gamma_d(N) = 3.337 - 0.799e^{0.00644N} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن N تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب می‌باشد.

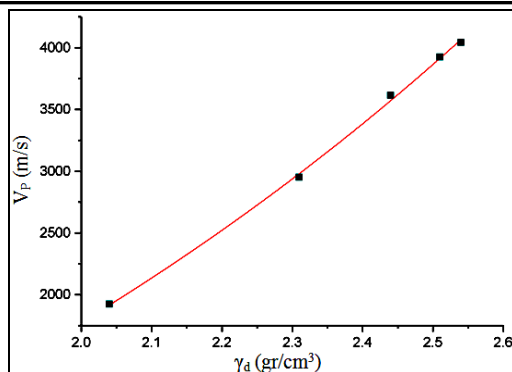
همانطور که در شکل ۱۶ و رابطه ۲ قابل مشاهده است، افزایش چرخه‌های انجماد-ذوب باعث کاهش چگالی سنگ می‌شود. این موضوع به خاطر افزایش درزه و ترک در سنگ و تجزیه شیمیایی و تورم برخی از کانی‌های تشکیل دهنده در اثر هوازدگی می‌باشد. اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آنهاست زیرا چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم می‌باشد و بدین ترتیب همبستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد. با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، تراکم حفرات و ترک‌ها در سنگ افزایش یافته و در نتیجه تخلخل آن نیز افزایش می‌یابد.

به منظور مقایسه تأثیر عوامل هوازدگی بر روی این دو پارامتر، تغییرات هم‌زمان سرعت موج فشاری و چگالی خشک نمونه‌ها در مقابل افزایش تعداد



شکل ۱۷- تغییرات V_p و γ_d در مقابل افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب.

Fig. 17. Variations of V_p and γ_d versus increasing the number of F-T cycles.

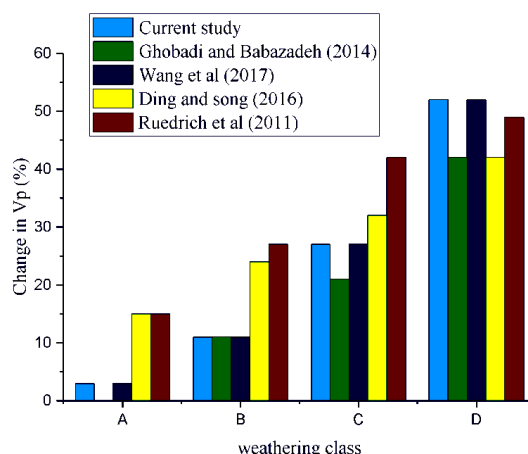


شکل ۱۸- تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل تغییرات چگالی خشک نمونه‌ها.

Fig. 18. Variations of compressional wave velocity versus the variations of dry density.

نتایج تحقیق انجام شده همخوانی بسیار خوبی با سایر مطالعات صورت گرفته دارد. همچنین در همه مطالعات، سرعت انتشار موج فشاری با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب کاهش یافته است و ضریب تغییرات داده‌ها نیز پایین می‌باشد.

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر، تغییرات سرعت موج فشاری حاصل از آن در مقابل کلاس‌های مختلف هوازدهی با نتایج مطالعات محققان قبلی (Ruedrich et al., 2011; Ghobadi and Babazadeh, 2015; Ding and Song, 2016; Wang et al., 2017) مقایسه و در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در کلاس‌های مختلف هوازدهی (A=0-10, B=10-25, C=25-40,)



شکل ۱۹- مقایسه نتیجه تحقیق حاضر با مطالعه محققان دیگر در زمینه تاثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی سرعت انتشار موج فشاری در سنگ.

Fig. 19. Comparing the present study results with the study of other researchers in the field of freezing-thawing cycles effect on the propagation of compressional wave velocity in rock.

برازش نمودارهای حاصله، دو رابطه تجربی جهت محاسبه مقدار سرعت موج فشاری و چگالی خشک به‌ازای تعداد چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب و یک رابطه تجربی بین سرعت موج فشاری و چگالی خشک ارائه و پیشنهاد گردید. در نهایت، بافت نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدهی با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان دهنده تراکم زیاد کانی-ها در نمونه‌های بکر می‌باشد در حالی به‌طوریکه پس از ۷۵ چرخه هوازدهی، بازشدگی مابین کانی‌های ورقه‌ای زیاد شده و همچنین ترک‌های جدید در راستای محور عرضی نمونه‌ها تشکیل شده است. مطالعات میکروسکوپی و تحلیل XRD نشان داد که کاهش سرعت موج فشاری و چگالی خشک ناشی از تغییر هندسه میکروساختارها در نتیجه چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب می‌باشد. در نهایت، مقایسه نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با نتایج مطالعه محققین مختلف در ارتباط با تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی سرعت موج فشاری نشان داد که همخوانی بسیار خوبی بین نتایج تحقیق حاضر و مطالعات قبلی وجود دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر فرآیند انجماد-ذوب بر روی پارامترهای سرعت موج فشاری و چگالی خشک سنگ شیبست بررسی شده است. بدین منظور، پارامترهای مذکور در چرخه‌های هوازدهی مختلف شامل ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ اندازه‌گیری و مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان‌دهنده کاهش سرعت موج فشاری و چگالی خشک با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب به‌صورت نمایی می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در چرخه‌های اولیه سرعت موج فشاری و چگالی خشک کمتر تحت تأثیر هوازدهی قرار گرفته و با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، مقدار کاهش هر دو پارامتر بیشتر می‌شود. با این حال، کاهش سرعت موج فشاری در حدود ۵۰٪ می‌باشد در حالی که چگالی خشک نمونه‌ها به میزان ۲۰٪ کاهش داشته است. بعلاوه، بررسی تغییرات سرعت موج فشاری به‌ازای مقادیر مختلف چگالی خشک نمونه‌ها نشان داد که با افزایش چگالی، سرعت موج فشاری به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و

کرمان، صنعتی امیرکبیر و دانشگاه کردستان به خاطر همکاری صمیمانه، تشکر و قدردانی نمایند.

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از کارکنان و مسئولین محترم معدن سرب و روی انگوران و آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ دانشگاه‌های شهید باهنر

منابع

- Babuška, V., 1968. Elastic anisotropy of igneous and metamorphic rocks. *Studia Geophysica et Geodaetica* 12 (3), pp. 291.
- Barton, M., Hamilton, D.L., 1978. Water-saturated melting relations to 5 kilobars of three Leucite Hills lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 66 (1), 41-49.
- Borhani, A., Lashkaripoor, Gh., Ghafouri, M., 2015. Investigation of physical and mechanical properties of the schists in the South of Mashhad, Second National Conference on Geology and Exploration Resources, Shiraz.
- Çelik, M.Y., 2017. Water absorption and P-wave velocity changes during freeze-thaw weathering process of crosscut travertine rocks. *Environmental Earth Sciences* 76, 409, doi: 10.1007/s12665-017-6632-7.
- Chen, J., Xu, Z., Yu, Y., Yao, Y., 2014. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques. *NDT & E International* 67, 10-16.
- Chen, T.C., Yeung, M.R., Mori, N., 2004. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action. *Cold Regions Science and Technology* 38 (2-3), 127-136.
- Ding, Q.L., Song, S.B., 2016. Experimental investigation of the relationship between the P-wave velocity and the mechanical properties of damaged sandstone. *Advances in Materials Science and Engineering*, do: 10.1155/2016/7654234.
- Domenico, S.N., 1984. Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity. *Geophysics* 49 (8), 1188-1195.
- Draebing, D., Krautblatter, M., 2012. P-wave velocity changes in freezing hard low-porosity rocks: a laboratory-based time-average model. *The Cryosphere* 6, (5), 1163-1174.
- Dreesen, R., Dusar, M., 2004. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): Role of petrography in provenance and durability assessment. *Materials Characterization* 53 (2-4), 273-287.
- El-Gohary, M. A., 2013. Evaluation of treated and un-treated Nubia Sandstone using ultrasonic as a non-destructive technique. *Journal of Archaeological Science* 40 (4), 2190-2195.
- Fahimifar, A., Soroush, H., 2001. Rock Mechanics Experiments, Theoretical Foundations and Standards Volume I, Technical Lab Joint Stock Company and soil mechanics, Amirkabir University of Technology.
- Fahimifar, A., Soroush, H., 2003. Rock Mechanics Experiments - Theoretical Foundations and Standards Volume II Field tests, Amirkabir University of Technology Publishing Center.
- Fener, M., Ince, I., 2015. Effects of the freeze-thaw (F-T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building. *Journal of African Earth Sciences* 109, 96-106.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015. Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology* 113, 40-51.
- Ghobadi, M.H., Babazadeh, R., 2015. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48(3), 1001-1016.
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Harris, I., 2007. Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment* 377(2-3), 273-281.
- Han, D.H., Nur, A., Morgan, D., 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics* 51 (11), 2093-2107.
- Inigo, A.C., Vicente, M.A., Rives, V., 2000. Weathering and decay of granitic rocks: its relation to their pore network. *Mechanics of Materials* 32 (9), 555-560.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamsehchiyan, M., 2016. Evaluation of the durability of Gerdoee travertine after freeze-thaw cycles in fresh water and sodium sulfate solution by decay function models. *Engineering Geology* 202, 36-43.
- Khanlari, G., Abdilor, Y., 2015. Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74(4), 1287-1300.
- Khanlari, Gh., Momeni, A., Abdi, Y., 2010. *Engineering Geology and Geotechnics*, Publication of university of Bu Ali Sina, Hamedan.
- Kurtuluş, C., Sertçelik, F., Sertçelik, I., 2016. Correlating physico-mechanical properties of intact rocks with P-wave velocity. *Acta Geodaetica et Geophysica* 51 (3), 571-582.
- Mahmoud, A.M., Ammar, H.H., Mukdadi, O.M., Ray, I., Imani, F.S., Chen, A., Davalos, J.F., 2010. Non-destructive ultrasonic evaluation of CFRP-concrete specimens subjected to accelerated aging conditions. *Ndt & E International* 43, (7), 635-641.
- Mamillan, M., 1979. Méthodes d'essais au gel des pierres, Problems Raised by Frost Action. In 6th international congress of the fondation française d'Etudes Nordiques, Le Havre, p. 225-238.

- Özbek, A., 2014. Investigation of the effects of wetting–drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(2), 595-609.
- Özgan, E., 2007. Determining the stability of asphalt concrete at varying temperature and exposure times using destructive and non-destructive methods. *Journal of Applied Sciences* 7(24), 3870-3879.
- Özgan, E., Serin, S., Ertürk, S., Vural, I., 2015. Effects of freezing and thawing cycles on the engineering properties of soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 52(2), 95-99.
- Park, J., Hyun, C.U., Park, H.D., 2015. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze–thaw action. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74(2), 555-565.
- Ruedrich, J., Kirchner, D., Siegesmund, S., 2011. Physical weathering of building stones induced by freeze–thaw action: A laboratory long-term study. *Environmental Earth Sciences* 63(7-8), 1573-1586.
- Sousa, L.M., del Río, L.M.S., Calleja, L., de Argandona, V.G.R., Rey, A.R., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology* 77(1-2), 153-168.
- Spetzler, H., Anderson, D.L., 1968. The effect of temperature and partial melting on velocity and attenuation in a simple binary system. *Journal of Geophysical Research* 73(18), 6051-6060.
- Standard, A.S.T.M., 2008. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. ASTM International, West Conshohocken.
- Tan, X., Chen, W., Yang, J., Cao, J., 2011. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology* 68(3), 130-138.
- Wang, P., Xu, J. Y., Liu, S., 2015. Ultrasonic method to evaluate the residual properties of thermally damaged sandstone based on time–frequency analysis. *Nondestructive Testing and Evaluation* 30(1), 74-88.
- Wang, P., Xu, J., Fang, X., Wang, P., Zheng, G., Wen, M., 2017. Ultrasonic time-frequency method to evaluate the deterioration properties of rock suffered from freeze-thaw weathering. *Cold Regions Science and Technology* 143, 13-22.
- Wang, P., Xu, J., Liu, S., Liu, S., Wang, H., 2016. A prediction model for the dynamic mechanical degradation of sedimentary rock after a long-term freeze-thaw weathering: Considering the strain-rate effect. *Cold Regions Science and Technology* 131, 16-23.
- Yasar, E., Erdogan, Y., 2004. Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(5), 871-875.
- Zhang, S., Lai, Y., Zhang, X., Pu, Y., Yu, W., 2004. Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze–thaw cycle condition. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19(3), 295-3.