

مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران بهار ۱۳۹۹، جلد سیزدهم، شماره ۱، صفحه ۸۷ تا ۱۰۲

ارزیابی تغییرات سرعت موج برشی و چگالی خشک سنگ شیست تحت تأثیر هوازدگی

سید زانیار سید موسوی'، حسین توکلی'، پرویز معارفوند"، محمد رضایی*

دريافت مقاله: ۱/۰۷ ۹۸/۰ پذيرش مقاله: ۹۸/۰۹/۲۱

چکیدہ

چرخههای انجماد-ذوب یک هوازدگی طبیعی جدی برای پروژههای مهندسی سنگ و سازههای ساخته شده بر روی سنگها در مناطق کوهستانی می باشد. لذا ارزیابی کاهش پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در اثر چرخههای انجماد-ذوب در این مناطق بسیار حیاتی است. در این تحقیق سرعت موج برشی و چگالی خشک نمونههای سنگ شیست بکر و هوازده (چرخههای انجماد-ذوب ۷، ۱۵، ٤۰ و ۷۵) دیواره معدن انگوران اندازه گیری شده است. در هر چرخه هوازدگی ۵ نمونه مورد آزمایش قرارگرفته و محاسبات بر مبنای میانگین آنها صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد که با افزایش تعداد چرخههای هوازدگی، مقدار سرعت موج برشی و چگالی خشک نمونهها به صورت نمایی کاهش می یابد بطوریکه چرخههای اولیه انجماد-ذوب تأثیر کمتری بر روی خواص سنگ داشته است. با برازش نتایج، روابطی تجربی جهت محاسبه سرعت موج برشی و چگالی خشک سنگ شیست به ازای چرخههای معزاد مرعت موج برشی و چگالی خشک نمونهها به صورت نمایی کاهش می بابد بطوریکه چرخههای اولیه انجماد-ذوب تأثیر کمتری بر روی خواص سنگ داشته است. با برازش نتایج، روابطی تجربی جهت محاسبه سرعت موج برشی و چگالی خشک سنگ شیست به ازای چرخههای معزاد مای منگ داشته است. و می تحقیق استخراج و پیشنهاد شده است. همچنین، بافت نمونهها در حالت بکر و پس از ۵۷ چرخه انجماد-ذوب به وسیله میکروسکوپ الکترونیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعه میکروسکوپی نشان دهنده متراکم بودن بافت نمونهها در حالت بکر می باشد. همچنین پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب، فاصله بین ناپیوستگیها افزایش یافته و ترکهای جدیدی در بدنه نمونهها در حالت بکر می باشد. همچنین پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب، فاصله بین ناپیوستگیها افزایش یافته و ترکهای جدیدی در بدنه نمونهها ایجاد شده است.

كليد واژهها: معدن انگوران، سنگ شيست، چگالي خشک، سرعت موج برشي، فرآيند انجماد-ذوب.

* مسئول مكاتبات

۱. دانشجویان دکتری مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان s.zanyar.mousavi@gmail.com

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۳. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج m.rezaei@uok.ac.ir

مراحل اولیه طراحی پروژههای مهندسی از این روشها به درستی استفاده کرد (Moreno et al., 2012). اندازهگیری سرعت امواج اولتراسونیک یکی از روش های غیرمخرب مهم میباشد که به دلیل سرعت بالا، هزینه کم و استفاده راحت در آزمایشگاه و سر زمین، جهت آنالیز دوام، پایداری و سایر خصوصیات فیزیکی و مقاومتی سنگ استفاده می شود (Darot and Reuschle, 2000, Malaga et al., 2006, Ruedrich and Siegesmund, 2007, Yavuz and Topal, 2007, Ruedrich et al., 2011, Lee and Yoon, 2011, Ma et al., 2015, Ji et Ding) دىنگ و ھمكاران (al., 2015; , Özgan et al., 2015). et al, 2016) مشخصات مکانیکی سنگ را بعد از چرخههای انجماد-ذوب را با استفاده از روش اولتراسونیک به عنوان روش غیر مخرب استفاده کردند. مولرو و همکاران (Molero et al, 2012) تخریب بتن را در اثر چرخههای انجماد-ذوب با استفاده از سرعت امواج اولتراسونیک بررسی کردند. چن و همكاران (Chen et al, 2014) تكنيك امواج اولتراسونيك را برای ارزیابی تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بر روی خواص سنگ، گسترش دادند.

مرور منابع مورد مطالعه فوقالذکر نشان میدهد که تأثیر فرآیند انجماد-ذوب بر روی سرعت موج برشی و چگالی سنگ کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، معدن سرب و روی انگوران در منطقهای کوهستانی قرار گرفته است که مستعد فرآیند انجماد-ذوب میباشد. به دلیل در نظر گرفته نشدن تأثیر هوازدگی ناشی از بارشهای برف و باران در طراحی اولیه و شیب کلی معدن، در حال حاضر سالیانه هزینههای زیادی جهت باطلهبرداری شیست ریزشی موج برشی و چگالی خشک در نمونههای بکر و هوازده سنگ شیست محدوده مورد نظر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است تا تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ مذکور تعیین و در نهایت در طراحی معدن مورد استفاده قرار گیرد.

۱. مقدمه

فرآيند انجماد-ذوب يک يديد تخريبي است که در مناطق سردسير و كوهستاني بهصورت مكرر اتفاق افتاده و باعث تضعیف خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ می شود (Tan, et al., 2011; lai, et al., 2012; Ozcelik et al., 2012, Baghini and Ismail, 2015, Karakurt and Baya, 2015; Jamshidi, et al., 2016). اين فرآيند باعث انجماد و ذوب مکرر آب موجود در ساختار سنگ و مابین حفرات و ناپیوستگیها منجمد میشود که در آن حجم آب حدود ۹ درصد افزایش یافته و باعث گسترش ترکهای موجود، تشکیل ریزترکهای جدید (قبادی و همکاران، ۱۳۹٤) و تمرکز تنش در ساختار سنگ می گردد (Hori and Morihiro,) 1998; Iñigo et al, 2000; Chen et al., 2004; Tan and et al., 2011) این فرآیند، هوازدگی غالب در مناطق کوهستانی بوده و فاکتور مهمی برای ایجاد مخاطرات جدی از قبیل زمین لغزش می باشد که در صورت نادیده گرفتن آن، خسارات جدی به یروژههای مهندسی وارد می شود (Sousa, et al., 2005; Luo, et al., 2003; Shen, et al., 2015). بنابراین برای احداث پروژههای مهندسی در مناطق کوهستانی که تحت تأثیر چرخههای انجماد-ذوب قرار دارند، ضروری است که رفتار سنگ بستر این پروژهها در برابر چرخههای مختلف انجماد-ذوب بررسی و تأثیر آن در مراحل اولیه طراحی برای

تحلیل پایداری اعمال گردد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲). در یک دهه اخیر مطالعات مختلفی در زمینه تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بر روی مشخصات طبیعی و شاخصهای سنگ صورت گرفته است (Siegesmun et al., 2000, Yavuz et) منگ صورت گرفته است (Siegesmun et al., 2000, Yavuz et al., 2006, Takarli et al., 2008, Karaca et al., 2008, Saad adultation and the state of t

۲. موقعیت جغرافیایی و زمینشناسی منطقه مورد مطالعه معدن انگوران در ۱۲۵ کیلومتری جنوب غربی زنجان و ٤٥٠ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد. این معدن در ناحیهای کوهستانی و در ارتفاع متوسط ۲۹۵۰ متری از سطح دریا واقع شده است. مختصات جغرافیایی معدن، طول ٤٧ درجه و ۲٤ دقیقه شرقی و عرض ۳٦ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی میباشد. از نظر زمینشناسی، معدن در پهنه زمینشناسی سنندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱ الف). زون کانیسازی محدوده مورد مطالعه شامل ترکیبی از کربنات روی (۲۰ تا ۳۵ درصد سنگ) و کربنات سرب (۳ تا ۱۶ درصد سنگ) همراه با کانیهای گروه کالامین میباشد که بهصورت عدسی با راستای تقریباً شمالی-جنوبی در حد فاصل آهکها و مرمرهای جانگوتاران و سنگهای دگرگونی شیست قرار گرفته است. این روند در بخش،های پایین به زون سولفور تبدیل می شود که بهنظر میرسد کانی سازی در آن در آغاز به صورت سولفور در میان شیستها و مرمرهای پرهکامبرین روی داده است (در پیوند با

محلولهای گرمابی فعالیت آتشفشانی نئوژن یا جوانتر) و سپس در اثر اکسیداسیون و نفوذ محلولهای سطحی و واکنش با آهکهای کمربالا به کربنات سرب و روی تبدیل شده است (شکل ۱ ب). در نهایت، قدیمی ترین سنگهای دارای بیرون زدگی در منطقه مورد مطالعه مربوط به زمان پرکامبرین می باشد (کوشا معدن، ۱۳۹۳).

پس از ریزش دیواره معدن در سال ۱۳۸۵، قسمت آهکی دیواره غربی معدن برداشته شده و در حال حاضر این دیواره به وسعت ۲٦٦ هزار متر مربع عمدتاً از سنگ شیست تشکیل شده است. به دلیل وجود شیستوزیته در سنگ شیست دیواره مذکور که ناشی از وجود کانیهای ورقهای همراستا میباشد، پتانسیل هوازدگی مکانیکی در آنها بیشتر است. تکرار عوامل هوازدگی موجب کاهش مقاومت سنگ شیست شده و به داخل معدن حرکت میکند که سالیانه حدود یک میلیون متر مکعب ریزش برداری میشود (شکل ۲).



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی معدن ب) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (باباخانی، ۱۳٦۹)



شکل ۲. نمایی از ریزش سنگ شیست در دیواره غربی معدن انگوران

۳. مواد و روشها

۳-۱. مطالعات سنگشناسی

مطالعات سنگشناسی علاوه بر شناخت کانی ها و بافت سنگ، ابزار مناسبی جهت ارزیابی دوام سنگ در مقابل عوامل هوازدگی نیز میباشد (Dreesen and Dusar, 2004). بدین منظور از مطالعه مقاطع نازک بهوسیله میکروسکوپ پلاریزان (مطالعه ۳ مقطع) و همچنین آنالیز XRD (آنالیز یک نمونه) استفاده شد. نتایج این مطالعات نشان داد که کانی های اصلی سنگ مورد مطالعه شامل کوارتز، کلسیت، بیوتیت، کلریت و کانی های اوپاک میباشد (شکل های ۳ و ٤). همچنین، درصد حجمی کانی های تشکیل دهنده سنگ مورد نطر بر اساس مطالعه میکروسکوپی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. کانی کلسیت در اثر اکسیداسیون و نفوذ محلولهای سطحی و همچنین واکنش با آهکهای کمر بالا در داخل ترکیب کانی شناسی سنگ شیست مورد مطالعه قرار گرفته است. در زمان کانی سازی های منطقه، سیال هیدروترمال در محل برخورد (کنتاکت) سنگ شیست (پایین دست) و سنگ آهک (کمر بالا) نفوذ کرده است که موجب رسوب کانی کلسیت بهصورت ثانویه میان شکستگیها و منافذ سنگ

شیست شده است. حدود • ٥ درصد نمونه مورد مطالعه شامل کانی های بیوتیت و کلریت میباشد که صفحات شیستوزیته سنگ را تشکیل میدهند. کانیهای مذکور بهدلیل ساختار ورقهای و تغییرپذیری زیاد، از پتانسیل بالایی جهت هوازدگی برخوردار میباشند. از آنجایی که هوازدگی غالب در منطقه عمدتاً فیزیکی و ناشی از بارش برف و باران میباشد لذا آب در طول زمان به داخل ساختار کانی های ورقهای (بیوتیت و کلریت) که سطوح شیستوزیته را تشکیل میدهند و همچنین به داخل ناپیوستگیهای موجود در سنگ، نفوذ میکند. با کاهش دما، آب جذب شده مابین سطوح ناپیوستگیهای موجود اعم از شیستوزیته، ترک و .. منجمد شده و حجم آن در حدود ۹ درصد افزایش می یابد. افزایش حجم موجب ایجاد تنش کششی در دیواره ساختارهای مذکور میگردد و در نهایت منجر به افزایش بازشدگی مابین کانی های ورقهای، ایجاد ریزترکهای جدید و همچنین توسعه ریزترکهای موجود می شود. همچنین، ایجاد حفره و منافذ جدید در سنگ را می توان مرتبط با انحلال کانی کلسیت در اثر تماس با آب در طول زمان دانست.



شکل ۳. الف) و ب) کانی های مربوط به دو مقطع شماره ۱ و ۲ مشخص شده در نور xpl، ج) و د) کانی های مربوط به مقطع شماره ۳ که به ترتیب در نور xpl و ppl مشخص شده است.



		-		-		
Sample No.		Mineral				
I	Calcite	Quartz	Biotite	Chlorite	Opac	
1	20	20	25	25	10	
2	25	25	25	25	-	
3	30	20	10	30	10	

جدول ۱. درصد حجمی کانی های تشکیل دهنده سنگ شیست مورد مطالعه.

۳-۲. فرآيند انجماد-ذوب

معدن انگوران به دلیل قرار گرفتن در تراز ارتفاعی ۳۰۰۰ متر بالای سطح آب دریا، بیش از نیمی از سال پوشیده از برف بوده و در مقاطع زمانی دمای هوا به زیر منفی ۲۰ درجه سانتی گراد می رسد. معدن به دلیل واقع شدن در منطقه کوهستانی، دارای زمستانهای بسیار سخت بوده و بارش ها از اوایل آبان تا اواخر اردیبهشت به صورت برف می باشد که میانگین بارش سالیانه به طور میانگین حدود ۲۰۰ میلی متر است. در این تحقیق جهت اعمال موجود در منطقه مورد مطالعه اقدام گردد به طوریکه ابتدا نمونه ها به مدت چرخه های انجماد – ذوب، سعی شده است که مشابه شرایط جوی ۶۸ ساعت در آب اشباع شده، سپس در فریز با دمای ۲۰ – به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شده و در مرحله آخر به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب با دمای ۲۰ + درجه جابجا شده اند.

بنابراین، هر چرخه انجماد-ذوب به میزان ۲۵ ساعت به طول میانجامد. در این مطالعه، چرخههای انجماد-ذوب ۰، ۷، ۱۵، ٤٠ و ۷۵ جهت انجام آزمایشهای آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

بهمنظور بررسی روند تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بر روی بافت سنگ، عکسبرداری از سطح نمونههای مورد مطالعه در تمام چرخههای هوازدگی انجام شد. شکل ۵ ساختار یکی از نمونهها در حالت بکر، پس از ٤٠ و پس از ٧٥ چرخه انجماد-ذوب را نشان میدهد. نتایج نشان داد که پس از عمال چرخههای انجماد-ذوب، ترکهایی در راستای ناپیوستگیهای موجود در سنگ از جمله شیستوزیته و افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب، تراکم ناپیوستگی افزایش یافته و ترکهای قبلی گسترش یافتند.



شکل ٥. تصویر نمونهها در حالتهای الف) بکر ب) پس از اعمال ٤٠ چرخه انجماد-ذوب ج) پس از اعمال ٧٥ چرخه انجماد-ذوب

۳-۳. آمادهسازی نمونه ها و انجام آزمایشات جهت تهیه نمونه های مورد نیاز از سنگ شیست، تعدادی گمانه در محدوده معدن انگوران حفر گردید (شکل ٦) و پس

از انتقال مغزههای سالم به سطح زمین، بهمنظور انجام آزمایش های لازم به آزمایشگاه انتقال داده شد (شکل ۷). از میان گمانه های مذکور به غیر از گمانه شماره ۱۱ (نشان داده

شده در شکل ٦) که مغزههای آن از سنگ آمفیبولیت شیست تشکیل شده است، مغزههای حفاری شده از سایر گمانهها دارای خواص کانی شناسی یکسان بوده و از درجه دگرگونی مشابهی نیز برخوردار هستند (جهت افزایش دقت نتایج، از نمونههای گمانه شماره ١١ در این تحقیق استفاده نشد). در هر یک از چرخههای هوازدگی مذکور ٥ عدد نمونه و در سرعت موج برشی، آماده شد. نمونهها به شکل استوانه با قطر سرعت موج برشی، آماده شد. نمونهها به شکل استوانه با قطر حذف تأثیر مقدار زاویه شیستوزیته در نتایج آزمایش، کل حفاریها به صورت عمود بر سطح توپوگرافی انجام شده است که در آن زاویه شیستوزیته نمونهها با محور قائم (جهت حفاری مغزهها) حدوداً ٧٠ الی ٧٥ درجه می باشد. آماده سازی





شکل ۷. موم پیچی و انتقال نمونههای سنگ شیست به آزمایشگاه

برای اندازه گیری سرعت موج برشی از دستگاه التراسونیک پروسک (Proceq) که از دو مبدل با بسامد میانگین 3 کیلوهرتز و عرض پالس ۱ تا ۱۰۰ میلی ثانیه تشکیل گردیده است استفاده شد. پس از جفت کردن کامل دو مبدل فرستنده و گیرنده به دو سر نمونه، زمان عبور موج برشی از داخل نمونه اندازه گیری شد. سپس با توجه به مشخص بودن طول نمونه، سرعت موج برشی داخل هر نمونه استوانه ای محاسبه

شد (شکل ۸). سرعت موج برشی نمونهها پس از ۰، ۷، ۱۵، ۰۱ و ۷۵ چرخه انجماد و ذوب اندازهگیری شد. در هر چرخه، سرعت ۵ نمونه و مجموعاً ۲۵ نمونه اندازهگیری شد. همچنین چگالی سنگ شیست در هریک از چرخههای انجماد-ذوب مذکور برای ۱۰ عدد نمونه محاسبه شده است (شکل ۹).



شکل ۸ نحوه اندازه گیری سرعت موج برشی توسط دستگاه التراسونیک



شکل ۹. تعیین چگالی خشک نمونههای سنگ شیست مورد مطالعه

٤. نتايج و بحث

انجماد آب موجود در ساختار سنگ و افزایش تنش در سنگ صورت گرفته است. همچنین، هوازدگی موجب ایجاد منافذ و حفرات جدید و همچنین گسترش حفرات موجود در سطح نمونه شده است. کانی کلسیت بهدلیل کانیزایی و در اثر تزریق سیالهای هیدرترمال مابین سنگ شیست و سنگ آهک و بهصورت ثانویه در ناپیوستگیها در نمونههای شیستی مورد و بهصورت ثانویه در ناپیوستگیها در نمونههای شیستی مورد معرض آبهای جوی (ph=6.5) قرار می گیرد کانی کلسیت با آب حل می گردد.

بهمنظور بررسی تغییرات ساختار نمونههای مورد مطالعه در اثر اعمال چرخههای انجماد-ذوب و همچنین بررسی تأثیر هوازدگی بر روی تراکم ذرات، بافت نمونههای بکر و هوازده با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی مطالعه شد (شکل ۱۰). همانطور که مشاهده می شود، در حالت بکر بافت نمونه متراکم بوده و کانی های سنگ به صورت فشرده بر روی هم و داخل ساختار سنگ قرار گرفته است. پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب، ترک های جدید در ساختار سنگ ایجاد شده و ریزترکهای موجود گسترش یافته اند. ترک های جدید در اثر



شکل ۱۰. عکس سطح نمونه سنگ شیست: الف) قبل از اعمال هوازدگی ب) بعد از ۷۵ چرخه انجماد-ذوب

نتایج آمار توصیفی مقادیر مختلف سرعت موج برشی بر روی نمونههای مورد مطالعه در چرخههای مختلف انجماد-ذوب در جدول شماره ۲ ارائه شده است. همچنین، نمودار تغییرات مقادیر میانگین سرعت موج برشی محاسبه شده در مقابل افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب در شکل شماره ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب، سرعت موج برشی کاهش یافته است. کاهش سرعت انتقال موج برشی منافذ در بدنه ریزترکها، گسترش ترکهای موجود و افزایش منافذ در بدنه سنگ مورد مطالعه می باشد. لازم به ذکر است که ریزترکها

عمدتاً در اثر چرخههای انجماد-ذوب ایجاد و گسترش مییابند. افزایش تراکم ناپیوستگیها بهدلیل افزایش مقدار آب نفوذی به داخل سنگ میتواند بهطور فزایندهای به ایجاد و گسترش ریزشکستگیها در چرخههای انجماد-ذوب کمک نماید. بهترین مدل برازش داده شده بر دادههای اندازهگیری شده مدل نمایی با عرض از مبدأ است (شکل ۱۱). مطابق این مدل، رابطه شماره ۱ جهت محاسبه سرعت موج برشی در سنگ شیست تحت تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بهدست آمد.

 $V_{\rm s} = 3013 - 117.75e^{0.0275N} \tag{1}$

در رابطه فوق، V_S سرعت موج برشی (متر بر ثانیه) و N تعداد

چرخههای انجماد-ذوب میباشد. لازم به ذکر است که رابطه

مذکور صرفاً برای چرخههای انجماد-ذوب در محدوده صفر تا ۸۰ چرخه معتبر میباشد.

وی نمونههای شیست در چرخههای مختلف انجماد-ذوب	تعيين سرعت موج برشي بر	ل نتایج آزمایش	جدول ۲ . آمار توصيفي
--	------------------------	----------------	-----------------------------

The number of F-T cycles	Average	Standard deviation	Minimum	Maximum
0	2875	186	2700	3021
7	2890	179	2687	3074
15	2842	192	2645	2968
40	2653	178	2448	2875
75	2087	286	1847	2331



شکل ۱۱. نمودار تغییرات سرعت موج برشی در مقابل تعداد چرخههای انجماد-ذوب

کاهش مییابد. با توجه به شکل فوق، چگالی خشک سنگ با افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب (درجه هوازدگی)، بهمیزان بیشتری کاهش یافته و در نتیجه خواص فیزیکی و مکانیکی آن با شیب تندتری کاهش مییابد. با افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب، سطح تماس کانی بیوتیت و کلریت با آب بیشتر شده و بهمرور به اکسید آهن تبدیل میگردند. اختلاف در چگالی سنگها بیشتر مربوط به تخلخل آنهاست زیرا چگالی دانهای اکثر کانیها نزدیک به هم میباشد. با افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب، تراکم حفرهها و ترکها در سنگ افزایش یافته و در نتیجه تخلخل آن نیز افزایش مییابد. علاوه بر سرعت موج برشی، تأثیر چرخههای مختلف انجماد-ذوب بر روی چگالی خشک نمونهها نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. چگالی خشک نمونهها نیز مطابق آزمایش سرعت موج برشی، در هر یک از چرخههای انجماد-ذوب مشخص (۰، ۷، ۱۵، ۰۰ و ۷۰) اندازه گیری شد. در چرخههای مذکور، چگالی ۱۰ عدد نمونه اندازه گیری گردید (مجموعاً ۵۰ عدد نمونه) که نتایج حاصله در جدول شماره ۳ ارائه شده است. شکل ۱۲ تغییرات چگالی خشک نمونهها در مقابل افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب، را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود میانگین چگالی خشک نمونهها با افزایش تعداد چرخههای انجماد-ذوب،

The number of F-T cycles	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	

جدول ۳. آمار توصیفی نتایج آزمایش تعیین چگالی خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب) بر روی نمونههای شیست در چرخههای مختلف انجماد-زمین



شکل ۱۲. نمودار تغییرات چگالی خشک در مقابل تعداد چرخههای انجماد-ذوب

همچنین جهت محاسبه چگالی خشک نمونهها در چرخههای مختلف انجماد-ذوب، رابطه شماره ۲ از برازش مدل نمایی بر مقادیر میانگین چگالی خشک اندازهگیری شده بهدست آمد.

 $\rho_d = 3.337 - 0.799e^{0.0064N} \tag{(Y)}$

در رابطه فوق، ρ_d چگالی سنگ (گرم بر سانتیمتر مکعب) و N تعداد چرخههای انجماد-ذوب میباشد. لازم به ذکر است که رابطه مذکور برای چرخههای انجماد-ذوب در محدوده صفر تا ۱۵۰ معتبر میباشد.

از جمله عوامل مؤثر بر سرعت انتقال امواج الاستیک در سنگ میتوان به ترکیب کانی شناسی، ساختار، میزان تخلخل، درجه اشباع، محتوی سیال، درجه سنگ شدگی، درجه شکستگی و درجه هوازدگی اشاره کرد. این عوامل میتوانند بر چگالی سنگ نیز مؤثر باشند. از آنجایی که افزایش هوازدگی، چگالی

سنگ را تغییر می دهد، سرعت موج برشی ابزار مناسبی برای بررسی کیفیت سنگ تحت تأثیر هوازدگی می باشد. بر این اساس، تغییرات سرعت انتقال موج برشی در سنگ شیست در مقابل تغییر چگالی خشک نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۳). همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، سرعت موج برشی با افزایش چگالی خشک نمونه ها به صورت نمایی افزایش یافته است. چگالی سنگ ارتباط مستقیم با تعداد ناپیوستگی های سنگ و اندازه و تراکم حفرات موجود در آن دارد. زمانی که پارامترهای مذکور افزایش یابد چگالی سنگ کاهش یافته و در نتیجه سرعت انتشار امواج چگالی سنگ کاهش یافته و در نتیجه سرعت انتشار امواج تأثیر قرار می گیرد. همچنین، جهت محاسبه سرعت موج برشی سنگ شیست بر حسب چگالی خشک نمونه ها که خود معرف درجه هوازدگی و خردشدگی سنگ می باشد، رابطه

شماره ۳ از شکل فوق استخراج و ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود ضریب همبستگی بالایی بین سرعت موج برشی و چگالی خشک نمونهها وجود دارد و می توان با دقت

خوبی از چگالی خشک نمونهها برای محاسبه سرعت موج برشي استفاده نمود. $V_{\rm s} = 554e^{0.66\rho_d}$



(٣)

شکل ۱۳. تغییرات سرعت موج برشی در مقابل تغییرات چگالی خشک نمونهها

٥. اعتبارسنجي نتايج بدست آمده

تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ شیست بهدلیل مشکل، زمانبر و هزینهبر بودن عمليات مغزهگيري، در سالهاي اخير كمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. همچنین تاکنون مطالعه خاصی در خصوص ارزیابی تأثیر چرخههای انجماد-ذوب بر روی سرعت موج برشی سنگهای مختلف صورت نگرفته است و این امر برای اولین بار در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. بااین حال، مطالعات محدودی در زمینه تأثیر هوازدگی بر سرعت موج فشاری توسط محققین انجام شده است. بنابراین، جهت اعتبارسنجی نتایج بهدست آمده از تحقیق حاضر، تغییرات سرعت موج برشی در کلاسهای مختلف هوازدگی با نتایج مطالعات محققان قبلی Altindag) et al., 2004; Ozbec, 2012; Ghobadi and Babazadeh, که بر 2015; Momeni et al., 2015; Wang et al., 2017)

روی موج فشاری تمرکز داشتهاند، مقایسه و نتایج حاصله در شکل شماره ۱٤ نشان داده شده است. کلاس های در نظر گرفته شده بهمنظور تفکیک درجه

هوازدگی شامل A=0-10, B=10-25, C=25-40, D=40-75 میباشد. همانطور که در شکل ۱٤ هم مشاهده می شود روند کلی تغییرات در همه تحقیقات صورت گرفته مشابه می باشد. تحقيق حاضر از لحاظ درصد افت سرعت امواج التراسونيكي در ردههای هوازدگی فوق، تطابق بالایی با سه مورد از تحقيقات قبلي دارد (Altindag et al, 2004; Ozbec, 2012;) تحقيقات Momeni et al, 2105). علت درصد افت زیاد در دو مطالعه Wang et al, 2017; Ghobadi and Babazadeh,) ديگر 2015) و تفاوت آن با تحقیق حاضر، نمونه سنگ مورد آزمایش میباشد. دو تحقیق مذکور بر روی ماسه سنگ انجام شده است که مقاومت و دوام بسیار پایینی در مقابل نفوذ آب و چرخههای انجماد-ذوب دارد.



شکل ۱٤. مقایسه نتایج تحقیق حاضر در زمینه کاهش سرعت موج برشی در اثر چرخههای انجماد-ذوب با مطالعه محققان دیگر در زمینه تأثیر چرخههای مذکور بر روی سرعت انتشار امواج اولتراسونیک در سنگ

٦. نتبيجهگيرى

یکی از مهمترین مسائل مورد نیاز در زمینه طراحی معادن روباز از جمله پايداري شيب، تعيين پارامترهاي ژئومكانيكي تودهسنگ می باشد. این پارامترها به عنوان دادههای ورودی در آنالیزهای عددی، روشهای تجربی و تحلیلی است که تعیین دقیق آنها ضروری میباشد زیرا کیفیت خروجی روشهای مذکور به اعتبار دادههای ورودی آن بستگی دارد. تخمین این پارامترها بر اساس آزمونهای آزمایشگاهی و معیارهای تجربی موجود صورت می گیرد. از آنجایی که آزمایش های صحرایی زمانبر و پرهزینه هستند و قابلیت اعتماد به این روش ها گاهاً سؤالبرانگیز است، بنابراین استفاده از آزمونهای آزمایشگاهی و روابط تجربی در این زمینه منطقی تر به نظر میرسد. زمانی که تودهسنگ تحت تأثیر عوامل جوی هوازده شده و خصوصيات ژئومكانيكي آن دستخوش تغييرات ميگردد می توان تأثیر عوامل مذکور را در مقیاس آزمایشگاهی بررسی نموده و به خصوصیات تودهسنگ تعمیم داد. هوازدگی سنگ شیست دیواره غربی معدن انگوران در اثر عوامل جوی سالیانه، هزینههای زیادی را در رابطه با باطلهبرداری مواد

ریزشی به داخل معدن وارد مینماید. معمولاً سنگ بکر قرار گرفته در پله استخراجی که بار روی آن برداشته می شود پس از یک سال هوازده می شود و شروع به حرکت به سمت کف کاواک مینماید. به همین جهت در این تحقیق تأثیر چرخه های مختلف انجماد-ذوب انجام شد. آزمایش های مذکور برای نمونههای بکر و بعد از چرخههای انجماد-ذوب مشخص شده (۰، ۷، ۱۰، ٤٠ و ۷۵) اندازهگیری شده است. نتایج بەدستآمدە نشاندھندە تأثيرپذيرى بالاي سرعت موج برشى و چگالی خشک از چرخههای هوازدگی میباشد بهطوریکه پس از ۷۵ چرخه، سرعت موج برشی ۲۷ درصد و چگالی خشک نمونهها ۱۸ درصد کاهش یافت. همچنین، پارامترهای مذکور با افزایش تعداد چرخههای هوازدگی، بهصورت نمایی کاهش یافتند که این امر ناشی از تأثیر تدریجی عوامل جوی بر تراکم شکستگیهای موجود در سنگ میباشد. زمانی که درجه هوازدگی سنگ (تعداد چرخههای انجماد-ذوب) افزایش مییابد آب بیشتری به داخل سنگ نفوذ کرده و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ با سرعت بیشتری كاهش مىيابد. بعلاوه، بافت نمونهها با استفاده از

میکروسکوپ الکترونیکی مطالعه و نتایج حاصله نشان داد که پس از اعمال ۷۵ چرخه انجماد-ذوب، ریزترکهای جدید در نمونه ایجاد شده و ترکهای قبلی گسترش یافته است. همچنین، ابعاد و چگالی منافذ در اثر حل شدن کانی کلسیت که بهصورت ثانویه در ترکیب کانی شناسی سنگ شیست مورد مطالعه قرار گرفته، به وسیله آب افزایش یافته است. در نهایت جهت اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، تغییرات سرعت موج برشی در کلاس های هوازدگی مختلف با نتایج به دست آمده

توسط تعدادی از محققین مقایسه و اثبات گردید که نتایج حاصله همخوانی مناسبی باهم دارند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم میدانند از پرسنل و مسئولین محترم معدن سرب و روی انگوران و آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر به خاطر همکاری صمیمانه، تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

باباخانی، ۱.، ۱۳٦٩. گزارش زمین شناسی معدن انگوران، شرکت توسعه معادن روی ایران.

- فهیمیفر، ا.، سروش، ح.، ۱۳۸۰. آزمایشهای مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها. جلد اول: آزمونهای آزمایشگاهی، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، چاپ اول، تهران، ۷۱۹ ص.
- قبادی، م.، بابازاده، ر.، اسفندیاری، م.، ۱۳۹۲. پیشربینی دوام طولانی مدت ماسه سنگهای سازند قرمز بالایی در مقابل پدیده ذوب–انجماد و هوازدگی نمک با استفاده از مدل تابع تخریب، مجله انجمن زمینشناسی مهندسی ایران، جلد هفتم، شماره ۳ و ٤، ۷۰–٥۷.
- قبادی، م.، طالب بیدختی، ع.، نیکودل، م.، ۱۳۹٤، اثر فرآیند ذوب و انجماد بر روی شاخص دوام وارفتگی و مقاومت کششی بریزیلی توفهای سازند کرج، مجله انجمن زمینشناسی مهندسی ایران، جلد هشتم، شماره ۱ و ۲، ٥٠–٣٥.

كوشا معدن، ۱۳۹۱. گزارش زمين شناسي معدن انگوران، شركت مهندسين مشاور كوشا معدن.

- Bayram, F., 2012. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions, Cold Regions Science and Technology, 83: 98-102.
- 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.
- Darot, M., Reuschlé, T., 2000. Acoustic wave velocity and permeability evolution during pressure cycles on a thermally cracked granite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(7): 1019-1026.
- Ding, Q.L., Song, S.B., 2016. Experimental investigation of the relationship between the P-wave velocity and the mechanical properties of damaged sandstone, Adv. Mater. Sci. Eng. 10 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2016/7654234.
- 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.
- 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.
- Hori, M., Morihiro, H., 1998. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials, International Journal of Engineering Science, 36(4): 511-522.
- Iñigo, A.C., García-Talegón, J., Vicente-Tavera, S., Martín-González, S., Casado-Marín, S., Vargas-Muñoz, M., Pérez-Rodríguez, J.L., 2013. Colour and ultrasound propagation speed changes by different ageing of freezing/thawing and cooling/heating in granitic materials, Cold Regions Science and Technology, 85: 71-78.
- Iñigo, 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.

- ISRM., 1981. Rock characterization testing and monitoring. In: Brown ET (ed) ISRM suggested methods, Pergamon Press, Oxford.
- Jamshidi A, Nikudel M.R, Khamehchiyan 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
- Jiang, N., Zhou, C., Luo, X., Lu, S., 2015. Damage characteristics of surrounding rock subjected to VCR mining blasting shock, Shock Vib. Article ID 373021, 8 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2015/373021.
- Karaca, Z., Deliormanli, A.H., Elci, H., Pamukcu, C., 2010. Effect of freeze-thaw process on the abrasion loss value of stones, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 7(47): 1207-1211.
- Karakurt, C., Bayazıt, Y., 2015. Freeze-thaw resistance of normal and high strength concretes produced with fly ash and silica fume, Adv. Mater. Sci. Eng. Article ID 830984, 8 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2015/830984.
- Lai, Y., Zhang, S., Yu, W., 2012. A new structure to control frost boiling and frost heave of embankments in cold regions, Cold Regions Science and Technology, 79: 53-66.
- Lee, J. S., Yoon, H.K., 2014. Porosity estimation based on seismic wave velocity at shallow depths, Journal of Applied Geophysics, 105: 185-190.
- Lee, J.S., Yoon, H.K., 2015. Theoretical relationship between elastic wave velocity and electrical resistivity, J Appl Geophys. Journal of Applied Geophysics, 116: 51-61.
- Luo, X.D., Jiang, N., Fan, X.Y., Mei, N.F., Luo, H., 2015. Effects of freeze-thaw on the determination and application of parameters of slope rock mass in cold regions, Cold Regions Science and Technology, 110: 32–37.
- Ma, J., Zhao, G., Dong, L., Chen, G., Zhang, C., 2015. A comparison of mine seismic discriminators based on features of source parameters to waveform characteristics, Shock Vib. Article ID 919143, 10 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2015/919143.
- Malaga-Starzec, K., Åkesson, U., Lindqvist, J.E., Schouenborg, B., 2006. Microscopic and macroscopic characterization of the porosity of marble as a function of temperature and impregnation, Construction and Building Materials, 20(10): 939-947.
- Molero, M., Aparicio, S., Al-Assadi, G., Casati, M.J., Hernández, M.G., Anaya, J.J., 2012. Evaluation of freeze-thaw damage in concrete by ultrasonic imaging, NDT & E International, 52: 86-94.
- Moreno de Jong van Coevorden, C., Cobos Sánchez, C., Rubio Bretones, A., Fernández Pantoja, M., García, S.G., Gómez Martín, R., 2012. Nondestructive evaluation of the preservation state of stone columns in the Hospital Real of Granada, Nondestructive Testing and Evaluation, 27(4): 335-351.
- Ozcelik, Y., Careddu, N., Yilmazkaya, E., 2012. The effects of freeze-thaw cycles on the gloss values of polished stone surfaces, Cold Reg Sci Technol. Cold Regions Science and Technology, 82: 49-55.
- 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.
- Ruedrich, J., Kirchner, D., Siegesmund, S., 2011. Physical weathering of building stones induced by freezethaw action: a laboratory long-term study, Environmental Earth Sciences, 63(7-8): 1573-1586.
- Ruedrich, J., Siegesmund, S., 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones, Environmental Geology, 52(2): 225-249.
- Saad, A., Guédon, S., Martineau, F., 2010. Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: experimental study of state and transfer parameters, Comptes Rendus Geoscience, 342(3): 197-203.
- Shen, S., Xia, C., Huang, J., Li, Y., 2015. Influence of seasonal melt layer depth on the stability of surrounding rock in permafrost regions based on the measurement, Natural Hazards, 75(3): 2545-2557.
- Shojaei Baghini, M., Ismail, A., 2015. Freeze-thaw performance and moisture-induced damage resistance of base course stabilized with slow setting bitumen emulsion-Portland cement additives, Adv. Mater. Sci. Eng. Article ID 348691, 10 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2015/348691.
- Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T., Tschegg, E.K., 2000. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion, International Journal of Earth Sciences, 89(1): 170-182.
- 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.

- Takarli, M., Prince, W., Siddique, R., 2008. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze-thaw condition, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(7): 1164-1175.
- 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., 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.
- Yavuz, A.B., Topal, T., 2007. Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: examples from Western Anatolia, Turkey, Engineering Geology, 90(1-2): 30-40.
- Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I., Sengun, N., 2006. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(5): 767-775.