

تاثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب روی خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ لوشان و ملات سیمان

کوروش عبدالغنی زاده^۱، مهدی حسینی^{۲*}، مرتضی ثقفی یزدی^۳

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۴

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۱۱

چکیده:

عوامل مختلف طبیعی تحت عنوان عوامل هوازدگی، مصالح طبیعی و مصنوعی از جمله سنگها و مصالح بر پایه سیمان مانند بتن و ملات سیمانی را به صورت فیزیکی و شیمیایی تحت تاثیر قرار می دهند. فرایند یخبندان-ذوب از جمله این عوامل است که به صورت گسترده خواص سنگها و بتن را تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین در مناطقی که احتمال رخ دادن این فرایند است ضروری می باشد تاثیر این فرایند بر روی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مصالح در نظر گرفته شود. در بیشتر پژوهش های انجام شده دمای دوره ی یخبندان و دوره ی ذوب و مدت زمان آن بدون توجه به وضعیت آب و هوایی مناطقی که احتمال رخ دادن فرایند یخبندان-ذوب است انتخاب شده است و همچنین در مورد مصالح بر پایه سیمان تمرکز پژوهش ها بر روی بتن بوده و پژوهش های اندکی در رابطه با تاثیر یخبندان-ذوب روی ملات سیمان انجام شده است. در این پژوهش تاثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب روی تخلخل، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی نمونه ماسه سنگ و ملات سیمان با توجه به بحرانی ترین داده های هواشناسی استان اردبیل در ده سال اخیر بررسی شده است. همچنین برای بررسی تخریب در اثر یخبندان-ذوب عکس برداری سی تی اسکن از نمونه ماسه سنگ به عمل آمده است نتایج نشان داده است با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقدار درصد تخلخل نمونه ها به صورت خطی افزایش در حالی که مقاومت تک محوره و مقاومت کششی آن ها کاهش پیدا کرده است همچنین بررسی عکس های سی تی اسکن نشان می دهد فاکتور آسیب در نمونه ماسه سنگ با افزایش سیکل افزایش پیدا کرده است.

کلید واژه ها: خواص فیزیکی و مکانیکی، سیکل یخبندان-ذوب، ماسه سنگ، ملات سیمان.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲. دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

۳. استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه:

عوامل محیطی مختلفی وجود دارند که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را تحت عنوان عوامل هوازدگی تحت تاثیر قرار می‌دهند. تاثیر این عوامل میتواند به دو صورت فیزیکی و یا شیمیایی باشد. فرایند یخبندان ذوب یکی از مهم‌ترین و قدرتمند ترین عامل هوازدگی از نوع فیزیکی می‌باشد که خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و باعث کاهش دوام و پایداری سنگ می‌شود (Zappia et al., 1998).

مقاومت سنگ در برابر سیکل‌های یخبندان-ذوب به مجموعه پیچیده ای از ویژگی‌های سنگ شامل ترکیب کانی شناسی (Dunn., 1966)، اندازه و توزیع حفرات موجود در سنگ (Everett., 1965) و متعاقب آن ویژگی‌های هیدرولیکی سنگ (Prick., 1995) و نیز ویژگی‌های مکانیکی به خصوص مقاومت کششی سنگ بستگی دارد (Nakamura et al., 1977).

علت تاثیر فرایند یخبندان-ذوب بر روی سنگ وجود ترک‌ها و حفرات داخل سنگ می‌باشد، در اقلیم‌های سردسیر هنگامی که دمای هوا به صفر می‌رسد، آب موجود در حفرات منجمد شده و ۹٪ افزایش حجم پیدا می‌کند که باعث اعمال فشار به حفرات و ریزترک‌های موجود در سنگ می‌شود و باعث توسعه‌ی حفرات و ترک‌های موجود و ایجاد ترک‌های جدید در سنگ می‌شود (Freire-Lista et al., 2015).

در سال‌های اخیر اکثر محققین تاثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب را بر روی سنگ‌های مختلف و مصالح بر پایه سیمان مانند بتن و ملات سیمان مورد مطالعه قرار داده اند بینال (Binal) اثر سیکل‌های یخبندان-ذوب را بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آذرآواری مورد بررسی قرار داده و مشاهده کرده است یخبندان-ذوب باعث کاهش شاخص دوام و ارتفگی شده می‌شود (Binal et al., 1997). توپال (Topal) و سازمن (Sözmen) تاثیر یخبندان-ذوب را بر روی توف‌های میداس (Midas tuff) ترکیه با توجه به داده های آب و هوایی منطقه مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه‌گیری نمودند که با

افزایش تعداد سیکل‌های یخبندان ذوب سرعت امواج طولی و مقاومت فشاری تک محوره کاهش و تخلخل سنگ افزایش پیدا میکند (Topal et al., 2003). سیکل‌های یخبندان-ذوب منجر به کاهش یکپارچگی سنگ و تخریب سنگ می‌شود، بر همین اساس موتلتورک مدل تابع تخریب را برای تعیین نیمه عمر مقاومت مکانیکی (تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب لازم برای نصف شدن پارامتر مورد نظر) سنگ‌ها پیشنهاد نمود (Mutlutürk et al., 2004). آلتینداگ کاهش در مقاومت مکانیکی آندزیت اسپارتا را در پایان ۵۰ سیکل یخبندان-ذوب مشاهده نموده و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی آن را با استفاده از مدل تابع تخریب پیش‌بینی نموده است (Altindag et al., 2004)، همچنین این محقق تاثیر ۵۵ سیکل یخبندان-ذوب را بر روی ایگنیمبریت‌های بنگازی (Benghazi) ترکیه مورد مطالعه قرار داده و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی را برای این سنگ برآورد کرده اند (Altindag et al., 2003). جمشیدی (Jamshidi) و همکاران با استفاده از مدل تابع تخریب و انجام آزمایش‌های بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی، رفتار دوام پذیری ۱۴ نوع سنگ ساختمانی را که در معرض سیکل‌های یخبندان-ذوب قرار گرفته شدند مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سرعت تخریب برای انواع مختلف سنگ‌ها متفاوت می‌باشد (Jamshidi et al., 2013). مومنی (Momeni) و همکاران با اعمال ۳۰۰ سیکل روی نمونه‌های گرانیتی تاثیر یخبندان-ذوب را مورد بررسی قرار داده اند و مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب، مقادیر سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک محوره کاهش درحالی که مقادیر جذب آب و تخلخل افزایش پیدا کرده است این تغییرات برای جذب آب به صورت نمایی و برای بقیه پارامترها به صورت خطی است (Momeni et al., 2016). یوجین و همکاران با اعمال ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب روی نمونه‌های ماسه سنگ قرمز مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب سرعت امواج طولی، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری تک محوره به علت ایجاد

ذوب را مورد بررسی قرار دادند (Jacobsen et al., 1995). سان(Sun) و همکاران تخریب بتن با مقاومت های مختلف را در اثر تاثیر همزمان یخبندان-ذوب و بارگذاری فشاری مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل-های یخبندان-ذوب میزان تخریب بتن بیش تر شده است همچنین این تاثیر روی بتن با مقاومت کم تر بیشتر می شود. آن ها مشاهده کردند با اضافه شدن هوا و الیاف فولادی به ساختار بتن میزان تخریب در برابر یخبندان-ذوب کم تر می شود (Sun et al., 1999). سائو(Cao) و همکاران با استفاده از اندازه گیری مقاومت الکتریکی ویژه بتن، تخریب آن ها را طی فرایند یخبندان-ذوب مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند تخریب بتن در دوره ی یخبندان بیش تر از دوره ی ذوب می باشد و استفاده از روش اندازه گیری مقاومت الکتریکی ویژه امکان مانیتورینگ همزمان دما و آسیب را فراهم کرده است (Cao et al., 2002). شنگ (Shang) و همکاران مقاومت و تغییر شکل بتن را تحت اعمال تنش سه محوره و بعد از اعمال سیکل های مختلف یخبندان-ذوب مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقاومت سه محوره بتن کاهش پیدا کرده است، همچنین این پژوهشگران معیار شکستی برای بتن با در نظر گرفتن تاثیر یخبندان-ذوب ارائه دادند (Shang et al., 2006). سلین (Siline) و همکاران تاثیر یخبندان-ذوب را بر روی ملات سیمانی حاوی مقادیر مختلف پوزولان مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش سیکل های یخبندان-ذوب مقادیر مقاومت تراکم تک محوره و هدایت گرمایی نمونه ها کاهش در صورتی که درصد تخلخل و جذب آب آن ها افزایش پیدا کرده است، همچنین وجود مواد پوزولانی باعث تقویت بتن در برابر یخبندان-ذوب می شود (Siline et al., 2017). رایس (Reis) و فریرا (Ferreira) تاثیر یخبندان-ذوب را روی چقرمگی شکست مود I بتن پلیمری ساده، بتن با الیاف شیشه و بتن با الیاف کربنی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند فرآیند یخبندان-ذوب روی چقرمگی شکست مود I بتن پلیمری ساده بدون تاثیر می باشد

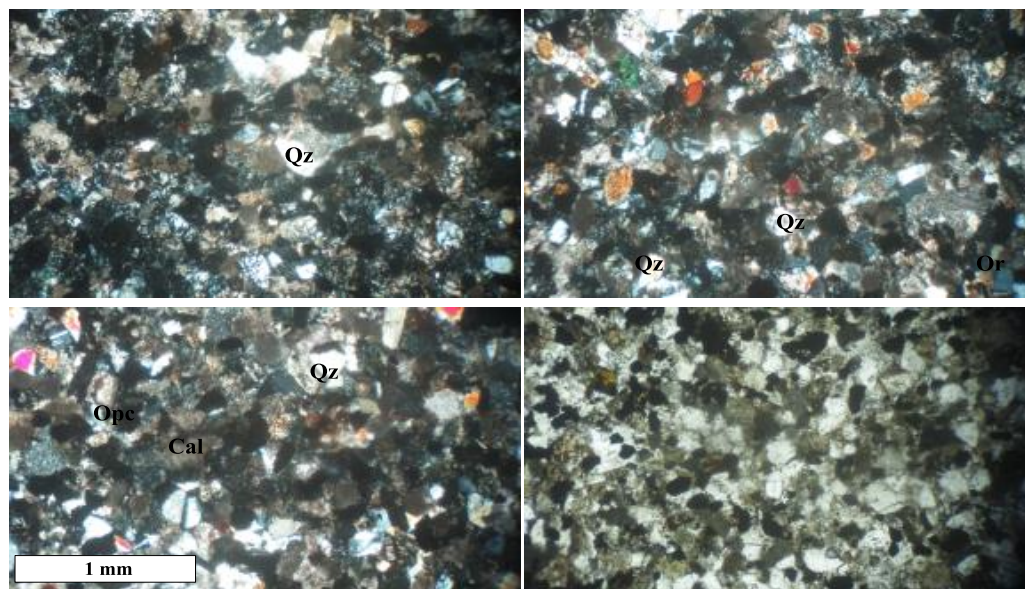
ریز ترک های مختلف و شل شدن مواد سیمانی سنگ در اثر بارگذاری و بار برداری در فرایند یخبندان-ذوب کاهش پیدا کرده است و همچنین ترک های ایجاد شده باعث افزایش نفوذ پذیری شده است (Yu et al., 2015). اندازه دانه ها، تخلخل موثر و مقاومت فشاری تک محوره سنگ به تنهایی اطلاعات کافی در باره میزان تاثیر فرآیند یخبندان-ذوب بر سنگ را نمی دهد و میزان تخریب سنگ وابسته به مشخصات حفرات داخل آن از جمله نحوه توزیع، اندازه، شکل و اتصال آن ها می باشد (Khanlari et al., 2015). جایلین لی (Jie-lin LI) و همکاران با استفاده از روش رزونانس مغناطیسی هسته ای و عکس برداری ام آر آی تاثیر یخبندان-ذوب را روی ویژگی های میکروسکوپی نمونه ماسه سنگ مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل ها، تخلخل و جرم اشباع نمونه ها افزایش پیدا کرده و عکس های ام آر آی گسترش و ایجاد متقارن حفرات در سنگ را نشان می دهد (Li et al., 2016). همچنین این پژوهشگر با اعمال ۱۴۰ سیکل یخبندان-ذوب تاثیر این فرایند روی ویژگی های دینامیکی را با اعمال بار دینامیکی به ماسه سنگ مورد بررسی قرار داده است، نتایج به دست آمده نشان داده است که با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقدار اوج تنش دینامیکی کاهش در صورتی که کرنش متناظر با این نقطه افزایش پیدا می کند (Li et al., 2018). سرکار نوری خدا (Sarkar Noor-E-Khuda) و همکاران تاثیر فرایند یخبندان-ذوب را بر روی مقاومت خمشی و سرعت امواج طولی نمونه های گرانیتی مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقاومت خمشی و سرعت امواج طولی نمونه ها کاهش پیدا می کند (Noor-E-Khuda et al., 2017). سایتو (Saito) و همکاران تاثیر یخبندان-ذوب را بر روی نفوذ پذیری بتن در برابر کلرید مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند فرایند یخبندان-ذوب باعث افزایش نفوذ پذیری نمونه ها شده است (Saito et al., 1994). جاکوبسن (Jacobsen) و همکاران با استفاده از تهیه مقطع نازک و میکروسکوپ فلوروسنس چگالی و الگوی ایجاد ترک در اثر یخبندان-

نمونه ماسه سنگ در اثر یخبندان-ذوب عکس برداری سی تی اسکن (CT Scan) به عمل آمده است.

۲. نمونه مورد آزمایش

ماسه سنگ انتخاب شده برای این پژوهش از منطقه ی لوشان نمونه برداری شده است. برای بررسی خصوصیات میکروسکوپی نمونه، مقطع نازک از نمونه تهیه شده و زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل (۱) تصاویر مقطع نازک تهیه شده از نمونه را نشان می‌دهد و کانی‌های موجود با علائم اختصاری زیر بر روی تصاویر مشخص گردیده است. نمونه شامل یک سنگ از نوع ماسه-سنگ آهکی و دارای بافت آهکی-سیلیسی می‌باشد که نوع سیمان آن آهکی است از جمله کانی‌های اصلی و فرعی این سنگ می‌توان کلسیت، فلدسپار آلکالن، کوارتز و کانی‌های اپک را نام برد. کوارتزهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار همراه با کلسیت، از جمله شکل‌دهنده اصلی این سنگ می‌باشند. علت انتخاب ماسه سنگ فراوانی آن در بیش تر سازند های ایران است.

و همچنین این فرایند باعث کاهش چقرمگی شکست مود I بتن با الیاف شیشه و کربن می‌شود (Reis et al., 2006). در بیشتر پژوهش های انجام شده دمای دوره ی یخبندان و دوره ی ذوب و مدت زمان آن بدون توجه به وضعیت آب و هوایی مناطقی که احتمال رخ دادن فرایند یخبندان-ذوب است انتخاب شده است و همچنین در مورد مصالح بر پایه سیمان تمرکز پژوهش ها بر روی بتن بوده و پژوهش های اندکی در رابطه با تاثیر یخبندان-ذوب روی ملات سیمان انجام شده است. در این پژوهش اثر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب روی تخلخل، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی نمونه ماسه سنگ و ملات سیمان بررسی می شود. در این پژوهش با توجه به بحرانی ترین حالتی که مربوط به داده های اقلیمی استان اردبیل در ده ساله اخیر است دمای یخبندان، ۱۶- درجه سانتیگراد و دمای ذوب، ۲۰ درجه سانتیگراد انتخاب شده است و نمونه ها در معرض صفر، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سیکل یخبندان-ذوب قرار گرفته شده است همچنین برای بررسی آسیب ایجاد شده در



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه سنگ (Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Opc: کانی‌های اپک)

سیمان به ماسه ۱ تهیه شده است. ماسه ها از نوع ماسه ریزدانه کنار ساحل دریای خزر با اندازه ذرات ۱۲۵ تا ۲۵۰ میکرون

ملات سیمان استفاده شده برای آزمایش از سیمان پرتلند، ماسه طبیعی ریزدانه و آب با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و

المللی مکانیک سنگ (ISRM) (Hatheway, 2009) تعیین شده است، این خواص شامل تخلخل موثر، وزن مخصوص خشک، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی برزیلی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و چسبندگی می باشد. برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره از مغزه هایی به قطر ۵۹ (برای ملات سیمان) و ۵۴/۷ (برای ماسه سنگ) میلیمتر و نسبت طول به قطر ۲/۵، برای مقاومت کششی برزیلی از نمونه های دیسکی با نسبت قطر به ضخامت ۲ و برای آزمایش تراکم سه محوری از نمونه هایی با قطر ۵۴/۷ میلیمتر و با نسبت طول به قطر ۲/۶ استفاده شده است. با به کار گیری نرم افزار راک لب (Roclab) چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه ها تعیین شده است. برای تعیین وزن مخصوص خشک و میزان تخلخل موثر نمونه ها از روش اشباع و غوطه وری استفاده شده است (جدول ۱ و ۲).

است. (در هنگام تزریق در سنگ در جاهایی که حفره هایی بزرگی وجود دارد برای کاهش مصرف سیمان به اندازه سیمان، ماسه به ملات اضافه می کنند و در این حالت نسبت سیمان به ماسه یک انتخاب می شود. در ضمن برای ساخت ماسه سنگ های مصنوعی در بررسی چاه های نفت در مخازن ماسه سنگی نیز نسبت سیمان به ماسه ۱ در نظر گرفته می شود (امیری و مومیوند، ۱۳۹۶). برای این منظور ملات سیمان با نسبت های گفته شده تهیه و مخلوط می شوند و پس از ریختن ملات داخل لوله های (PVC) (برای ایجاد نمونه های استوانه ای شکل) (شکل ۲) به منظور خروج حباب های هوا مخلوط هم زده می شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه ها از لوله خارج و به مدت ۲۸ روز در داخل آب نگهداری می شوند.

خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه های ماسه سنگ و ملات سیمان با بکارگیری روش های پیشنهاد شده توسط انجمن بین

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه ماسه سنگ

UCS(MPa)	TS(MPa)	internal friction angle (°)	E(GPa)	Poisson's ratio	Cohesion(MPa)	effective porosity (%)	dry unit weight (KN/m ³)
60	5.3	48.5	14.60	0.25	8.25	13.18	21.63

جدول ۲. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه ملات سیمان

UCS(MPa)	TS(MPa)	internal friction angle (°)	E(GPa)	Poisson's ratio	Cohesion(MPa)	effective porosity (%)	dry unit weight (KN/m ³)
29	4.7	36.07	20.45	0.18	2.16	12.23	18.25



شکل ۲. (a) لوله‌های PVC برای آماده سازی نمونه‌ها (b) نمونه‌های آماده شده برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی.

۳. آزمایش یخبندان-ذوب

۴. نتایج

۴-۱. نتایج تاثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب روی تخلخل موثر ماسه سنگ و ملات سیمان

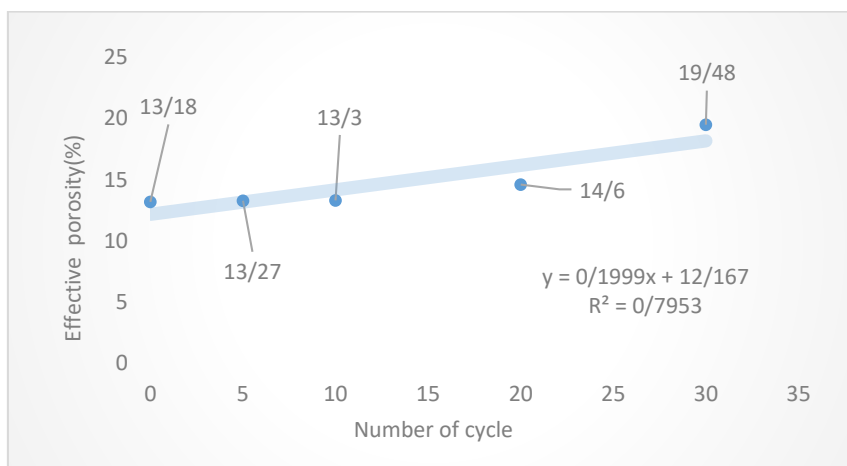
تخلخل موثر نمونه‌ها قبل از اعمال سیکل‌های یخبندان-ذوب و پس از سیکل‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تعیین شده است (جدول ۳). تعداد آزمایش‌های انجام شده برای تعیین تخلخل موثر برای هر سیکل ۳ عدد می‌باشد و میانگین آن در جدول ذکر شده است.

برای بررسی رابطه بین تخلخل موثر با تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب تغییرات تخلخل موثر نسبت به تعداد سیکل رسم شده (شکل ۳ و ۴).

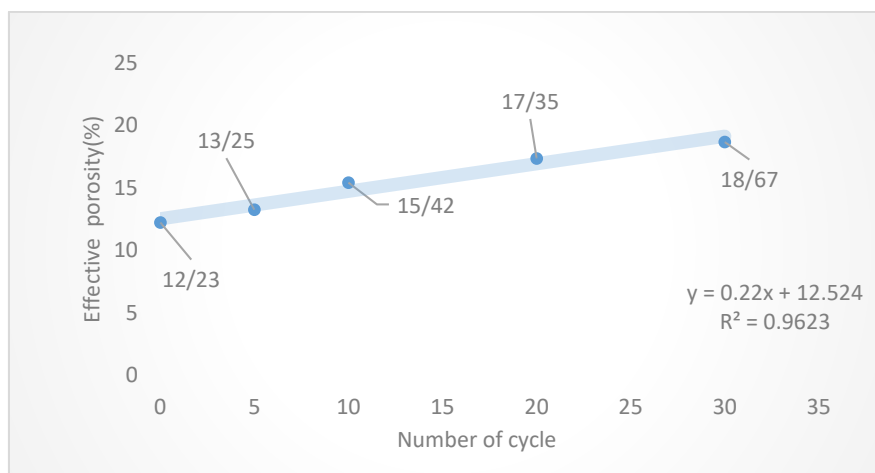
برای انجام آزمایش یخبندان-ذوب ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب و تحت فشار جو اشباع شده و برای دوره‌ی یخبندان با توجه به داده‌های هواشناسی مناطق غربی و شمالغرب ایران به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۱۶- درجه سانتیگراد و برای دوره‌ی ذوب به مدت ۶ ساعت در تشت آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود به این ترتیب هر سیکل یخبندان-ذوب ۲۴ ساعت زمان می‌برد. تخلخل موثر، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها قبل اعمال سیکل‌های یخبندان-ذوب و بعد از ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سیکل یخبندان-ذوب تعیین شده است.

جدول ۳. تخلخل موثر ماسه سنگ و ملات سیمان قبل از اعمال سیکل و پس از سیکل‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰

Number Of Cycle	Effective porosity (%) (Sandstone)	Effective porosity (%) (Mortar)
0	13.18	12.23
5	13.27	13.25
10	13.3	15.42
20	14.6	17.35
30	19.48	18.67



شکل ۳. تغییرات تخلخل موثر ماسه سنگ نسبت به تعداد سیکل های یخبندان-ذوب (نقاط مشخص شده میانگین مقدار تخلخل موثر در سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ می باشد)



شکل ۴. تغییرات تخلخل موثر ملات سیمان نسبت به تعداد سیکل های یخبندان-ذوب (نقاط مشخص شده میانگین مقدار تخلخل موثر در سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ می باشد)

مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی نمونه ها قبل از اعمال سیکل های یخبندان-ذوب و پس از سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تعیین شده است (جدول ۴ و ۵). تعداد آزمایش های انجام شده برای تعیین پارامتر های ذکر شده برای هر سیکل ۳ عدد می باشد و میانگین آن در جدول ذکر شده است

همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقدار درصد تخلخل ماسه سنگ و ملات سیمان به صورت خطی و با ضریب تعیین ۰/۷۹ و ۰/۹۶ افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده ایجاد و گسترش ترک در اثر یخبندان-ذوب است.

۴-۲. نتایج تاثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب روی مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی ماسه سنگ و ملات سیمان

جدول ۴. مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی ماسه سنگ قبل از اعمال سیکل و پس از سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰

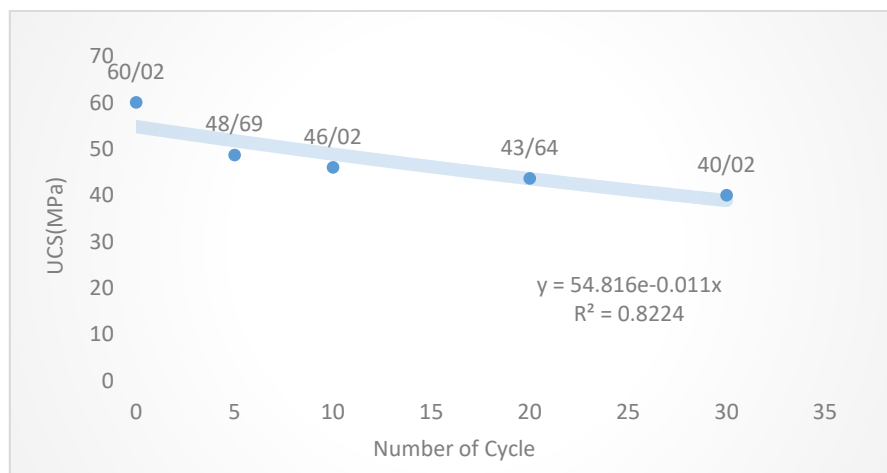
Number of Cycle	UCS(MPa)	standard deviation of UCS(MPa)	TS(MPa)	standard deviation of TS(MPa)
0	60.02	3.21	5.35	0.22
5	48.69	2.87	4.21	0.21
10	46.02	3.31	3.89	0.27
20	43.64	2.68	3.83	0.14
30	40.02	3.15	3.18	0.18

جدول ۵. مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی ملات سیمان قبل از اعمال سیکل و پس از سیکل‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰

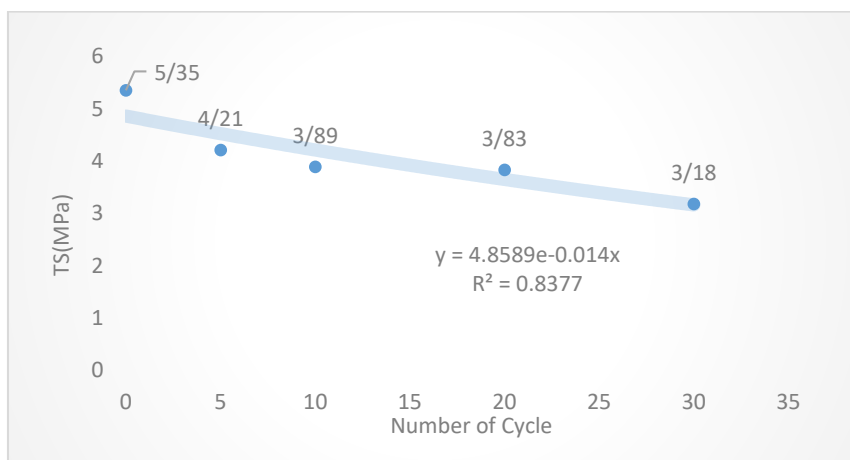
Number of Cycle	UCS(MPa)	standard deviation of UCS(MPa)	TS(MPa)	standard deviation of TS(MPa)
0	29.05	1.91	4.7	0.25
5	24.34	1.51	3.45	0.19
10	21.79	2.12	3.37	0.23
20	21	2.03	3.08	0.15
30	20.07	1.45	2.67	0.26

بهترین منحنی گذرنده از نقاط نمایش داده شده است (شکل ۵، ۶، ۷ و ۸).

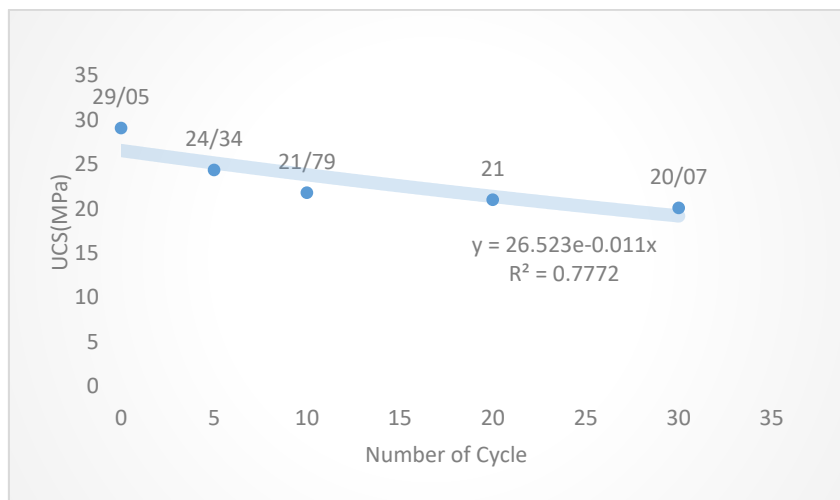
برای بررسی رابطه بین مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی با تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب تغییرات پارامترهای ذکر شده نسبت به تعداد سیکل رسم شده و



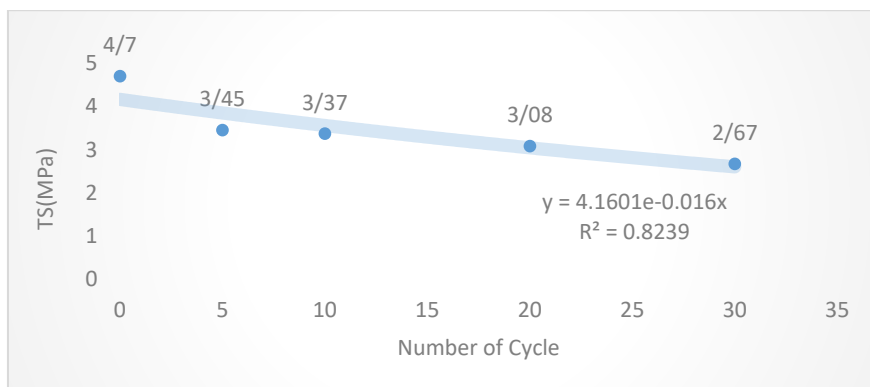
شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری تک محوره ماسه سنگ نسبت به تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب (نقاط مشخص شده میانگین مقدار مقاومت فشاری تک محوره در سیکل‌های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ می‌باشد)



شکل ۶. تغییرات مقاومت کششی برزیلی ماسه سنگ نسبت به تعداد سیکل های یخبندان-ذوب (نقاط مشخص شده میانگین مقدار مقاومت کششی برزیلی در سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ می باشد)



شکل ۷. تغییرات مقاومت فشاری تک محوره ملات سیمان نسبت به تعداد سیکل های یخبندان-ذوب (نقاط مشخص شده میانگین مقدار مقاومت فشاری تک محوره در سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ می باشد)



شکل ۸. تغییرات مقاومت کششی برزیلی ملات سیمان نسبت به تعداد سیکل های یخبندان-ذوب (نقاط مشخص شده میانگین مقدار مقاومت کششی برزیلی در سیکل های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ می باشد)

همان طور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقادیر مقادیر مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی نمونه ها کاهش پیدا کرده است رابطه همبستگی و ضریب تعیین مربوط به این تغییرات در جدول ۶. معادله و ضریب تعیین بین مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی نمونه های ماسه سنگ و ملات سیمان با تعداد سیکل های یخبندان-ذوب

Sample	regression equation for UCS	R ²	regression equation for TS	R ²
Sandstone	$UCS = 54.816e^{-0.011N}$	0.82	$\sigma_f = 4.8589e^{-0.014N}$	0.83
Mortar	$UCS = 26.523e^{-0.011N}$	0.77	$\sigma_f = 4.1601e^{-0.016N}$	0.82

جدول ۷. درصد افزایش تخلخل و کاهش مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی نمونه ها پس از ۳۰ سیکل

Sample	Percentage of porosity increase	Percentage of UCS increase	Percentage of TS decrease
Sandstone	47.8	33.3	40.5
Mortar	52.6	30.9	43.2

در سال ۲۰۰۴ پژوهش قابل توجهی توسط فنگ و همکاران (Feng et al., 2004) انجام شده است که در آن از روش سی تی اسکن دوبعدی برای مشاهده پیشرفت تخریب نمونه ماسه سنگ تحت فشار سه محوره استفاده شده است آن ها متذکر شده اند که میتوان از پارامتر CT و لیو به عنوان شاخص در توصیف پیشرفت تخریب در طول آزمایش استفاده کرد و همچنین سی تی اسکن دو بعدی قابلیت بررسی تخریب سه بعدی را نیز فراهم می کند.

با توجه به این که فرایند یخبندان-ذوب به صورت سه بعدی نمونه را تحت تاثیر قرار می دهد از روش عکس برداری سی تی اسکن برای بررسی وضعیت ریز ترک ها و حفرات داخل نمونه و تغییرات آن ها در اثر اعمال سیکل های یخبندان-ذوب استفاده شده است. برای این کار از یک نمونه استوانه ای شکل ماسه سنگ به طول ۵۰ و قطر ۵۴ میلیمتر قبل از اعمال سیکل های یخبندان-ذوب و بعد از سیکل ۱۰ و ۲۰ عکس برداری سی تی اسکن به عمل آمده است. دستگاه سی تی

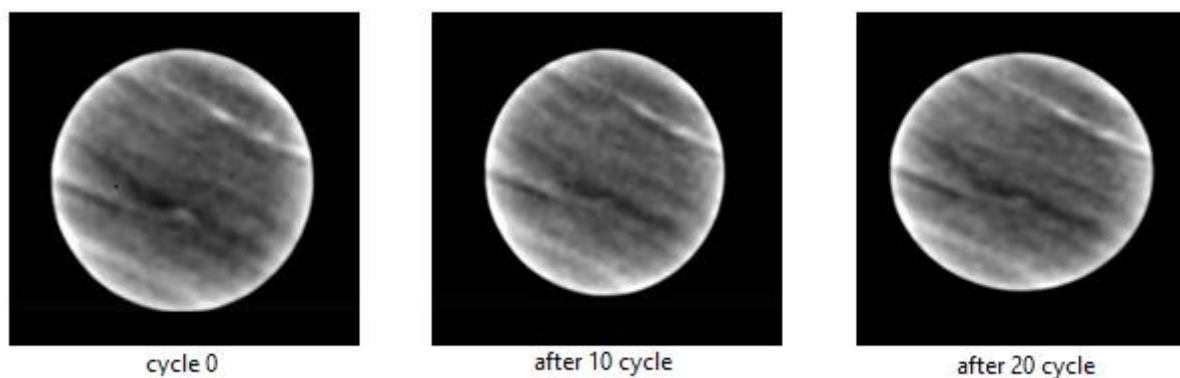
همان طور که مشاهده می شود بیشترین تاثیر پس از پایان ۳۰ سیکل بر روی تخلخل ملات سیمان با افزایش ۵۲/۶۵ درصد و کم ترین تاثیر بر روی مقاومت فشاری تک محوره ملات سیمان با ۳۰/۹۱ درصد است.

۳-۴. نتایج و تحلیل عکس های سی تی اسکن گرفته شده از نمونه در سیکل های مختلف

روش های های متداولی برای بررسی ترک ایجاد شده توسط فرایندهای وابسته به دما مانند روش اندازه گیری امواج آکوستیک (Nasseri et al., 2007) و روش میکروسکوپ نوری یا الکترونی (Latham et al., 2006) معرفی شده است. در طی چهل سال اخیر توسعهی روز افزون پرتونگاری اشعه ایکس (CT) روشی غیر مخرب را برای بررسی میکروسکوپی در پزشکی و مسائل صنعتی فراهم کرده است (Fujii et al., 2004). از این تکنیک در بررسی خواص فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیسم شکست سنگ استفاده شده است (Otani et al.,)

(Hounsfield radiological density) کاهش میزان عبور اشعه ایکس را در هنگام عبور از داخل مواد نشان می‌دهد، همچنین این مقدار نشان‌دهنده چگالی مواد نیز می‌باشد که با مقیاس بندی نسبت به مواد استاندارد و واحد HU نشان می‌دهند (مقدار HU برای هوا ۱۰۰۰- و برای آب خالص ۰ می‌باشد) (Raynaud et al., 1989)، بنابراین می‌توان از مقدار سی‌تی ویو در توصیف تغییرات ریز ترک‌ها در نمونه مورد آزمایش استفاده و میزان تخریب توسط فرایند یخبندان-ذوب را مشخص کرد.

اسکن، نمونه را به صورت عمود بر محور طولی آن و با فاصله‌داری ۵ میلی‌متر و با دقت $200 * 512 * 512$ وکسل (Voxel) اسکن کرده است که در نتیجه در هر عکس برداری ۱۰ مقطع از داخل نمونه ثبت شده است. در عکس های گرفته شده نقاط تاریک نشانگر قسمت‌های کم چگالتر و نقاط روشن قسمت‌های چگالتر را نشان می‌دهد. با بررسی کامل مقاطع یکسان در سیکل‌های مختلف تغییر محسوسی در تصاویر دیده نشده است (شکل ۹). برای بررسی تغییرات ایجاد شده در نمونه از پارامتر سی تی ویو (CT Value) استفاده شده است، سی‌تی ویو یا چگالی رادیوگرافی هانسفیلد



شکل ۹. عکس‌های سی تی اسکن از نمونه استوانه‌ای (عکس‌ها از مقطع شماره ۴ می‌باشد)

کارگیری رابطه (۱) محاسبه شده است (Feng et al., 2004) که در آن H_0 مقدار سی تی ویو قبل اعمال سیکل یخبندان-ذوب، D فاکتور آسیب و H مقدار سی تی ویو در سیکل مورد نظر است.

$$D = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad (1)$$

برای استفاده از سی تی ویو در بررسی حفرات و ترک‌های داخل نمونه و تغییرات آن میانگین مقدار سی تی ویو قبل از اعمال سیکل و پس از سیکل ۱۰ و ۲۰ با توجه به مقدار آن در هر مقطع محاسبه شده است (جدول ۸) فاکتور آسیب نیز بر اساس تغییرات میانگین سی تی ویو در هر سیکل برای توصیف تخریب ایجاد شده در اثر یخبندان-ذوب با به

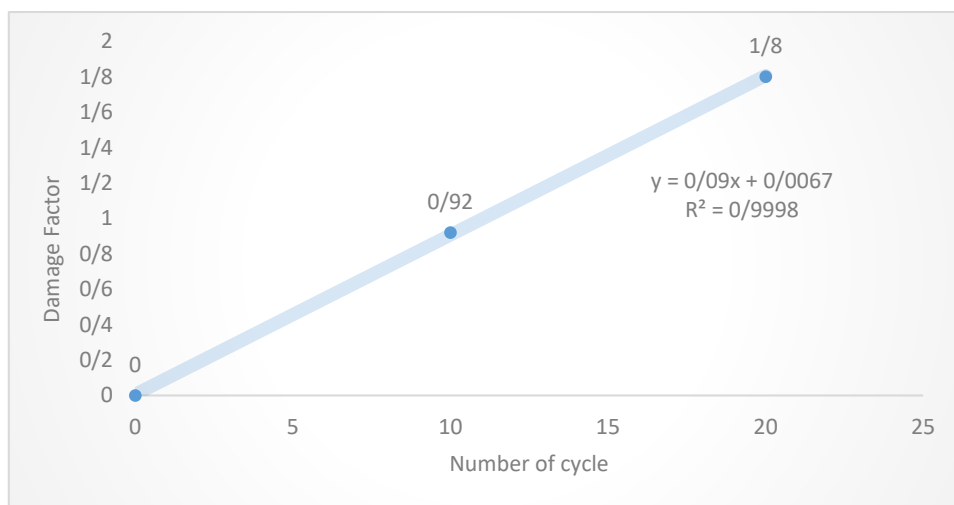
جدول ۸. مقادیر متوسط سی تی ویو در مقاطع مختلف در سیکل‌های ۰، ۱۰ و ۲۰

Section number	Average of CT value at cycle 0 (HU)	Average of CT value after cycle 10 (HU)	Average of CT value after cycle 20 (HU)
1	1806.142	1789.814	1734.625
2	1788.958	1549.94	1482.365
3	643.928	460.192	425.459
4	2283.325	1768.095	1648.348
5	1783.29	1796.424	1765.702
6	2283.325	1803.252	1831.048
7	1802.477	1809.335	1800.548

8	2283.325	1808.142	1814.103
9	1809.551	1804.737	1835.845
10	1809.033	1798.567	1754.963
Average	1654.101	1638.85	1609.2736
Damage Factor	0	0.92	1.8

همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل مقدار سی تی ویو کاهش پیدا کرده است، این کاهش نشان دهنده کاهش چگالی و ایجاد و گسترش ترک در داخل نمونه در اثر فرایند یخبندان-ذوب می‌باشد که در نتیجه ی این ترک‌های ایجاد شده تخلخل نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است و همان طور که در بخش های قبل بررسی شد خواص مقاومتی سنگ از جمله مقاومت تراکمی تک محوره، مقاومت کششی برزیلی

سنگ کاهش پیدا کرده است. برای بررسی نحوه تغییر فاکتور آسیب در اثر یخبندان-ذوب نمودار فاکتور آسیب نسبت به تعداد سیکل یخبندان-ذوب رسم شده است (شکل ۱۰). همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل درصد فاکتور آسیب به صورت خطی و با ضریب تعیین ۰/۹۹ افزایش پیدا کرده است. فاکتور آسیب از رابطه (۱) بدست آمده است.



شکل ۱۰. تغییرات فاکتور آسیب نسبت به تعداد سیکل

$$-\left\{\frac{dI}{dN}\right\}=\lambda I \quad (2)$$

که در آن $\left\{\frac{dI}{dN}\right\}$ عبارت است از سرعت تخریب، λ ثابت تخریب، I یکپارچگی سنگ و N تعداد سیکل می‌باشد. با انتگرال گیری از رابطه (۲) رابطه نمایی (۳) به دست می‌آید:

$$I_N = I_0 \cdot e^{-\lambda N} \quad (3)$$

که در آن λ ثابت تخریب، N تعداد سیکل، I_N مقدار یکپارچگی سنگ پس از N سیکل و I_0 مقدار یکپارچگی اولیه سنگ مورد نظر قبل از اعمال سیکل می‌باشد. در این پژوهش رابطه دیگری تحت عنوان نیمه عمر سنگ به عنوان

۴-۴. ارزیابی مدل تابع تخریب

مدل تابع تخریب توسط موتلوتورک (Mutluturk) برای پیش بینی تاثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب و تعداد سیکل های گرم شدن-سرد شدن بر روی یکپارچگی سنگ معرفی و بررسی شده است. در این مدل، فرایند کاهش یکپارچگی سنگ در اثر تاثیر یخبندان-ذوب و گرم شدن-سرد شدن به عنوان فرآیند مرتبه اول مدل سازی می‌شود و سرعت تخریب به واسطه عملکرد فرآیند های ذکر شده متناسب با یکپارچگی سنگ در شروع هر سیکل می‌باشد که مطابق با رابطه (۲) ارائه می‌شود (Mutluturk et al., 2004):

تجربی مربوط به تأثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب روی مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی ماسه سنگ و ملات سیمان به صورت نمایی می باشد بنابراین می توان از این مدل در پیش بینی بلند مدت تأثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب استفاده کرد؛ میزان انطباق مدل تابع تخریب با ضریب تعیین درج شده در جدول (۷) نشان داده می شود. در جدول (۹) پارامتر های مدل تخریب که شامل نیمه عمر و ثابت تخریب است ارائه شده است.

مقیاسی از دوام پذیری سنگ، که عبارت است از تعداد سیکل های لازم که یکپارچگی سنگ را به نصف کاهش می دهد مطابق با رابطه (۴) تعریف شده است (Mutluturk et al., 2004):

$$N_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (4)$$

که در آن $N_{1/2}$ نیمه عمر سنگ و λ ثابت تخریب می باشد. میزان اعتبار این مدل با بررسی داده های تجربی و میزان انطباق آن تعیین می شود، همان طور که در شکل های ۵، ۶، ۷ و ۸ مشاهده می شود بهترین منحنی گذرنده از داده های

جدول ۹. نیمه عمر و ثابت تخریب ماسه سنگ و ملات سیمان برای مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی برزیلی

Sample	Parameter	Decay Constant	Half life
SandStone	UCS	0.011	63
	TS	0.014	50
Mortar	UCS	0.011	63
	TS	0.016	44

.۵

نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر تعداد سیکل های یخبندان-ذوب بر روی تخلخل، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی ماسه سنگ و ملات سیمان مورد بررسی قرار گرفته شد برای این منظور دمای دوره ی یخبندان و ذوب و مدت زمان آن ها با توجه به بحرانی ترین حالتی که مربوط داده های اقلیمی استان اردبیل در ده سال اخیر است انتخاب شد و تعداد صفر، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سیکل یخبندان-ذوب به نمونه ها اعمال و پارامتر های ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان می دهد که:

یخبندان-ذوب می باشد. مقدار افزایش تخلخل موثر در پایان سیکل ۳۰ برای ماسه سنگ ۴۷/۸ درصد و برای ملات سیمان ۵۲/۶ درصد محاسبه شده است.

- با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقادیر مقاومت فشاری تک محوره ماسه سنگ و ملات سیمان به صورت نمایی و با ضریب تعیین ۰/۸۲ و ۰/۷۷ کاهش پیدا کرده است. مقدار کاهش پس از پایان ۳۰ سیکل برای ماسه سنگ و ملات سیمان به ترتیب برابر با ۳۳/۳ و ۳۰/۹ است.

- با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب مقادیر مقاومت کششی برزیلی ماسه سنگ و ملات سیمان به صورت نمایی و با ضریب تعیین ۰/۸۳ و ۰/۸۲ کاهش پیدا کرده است. مقدار کاهش پس از پایان ۳۰

- با افزایش تعداد سیکل های یخبندان-ذوب درصد تخلخل ماسه سنگ و ملات سیمان به صورت خطی و با ضریب تعیین ۰/۷۹ و ۰/۹۶ افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده ی ایجاد و رشد ترک در اثر

محوره و مقاومت کششی برزیلی و همچنین افزایش تخلخل موثر سنگ می‌شود. و با افزایش تعداد سیکل‌ها، فاکتور آسیب تعریف شده بر اساس سی-تی ولیو به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

- به منظور پیش بینی بلند مدت تاثیر یخبندان-ذوب روی مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی ماسه سنگ و ملات سیمان میتوان از تابع تخریب ارائه شده توسط موتلوترک (Mutluturk) استفاده کرد.

سیکل برای ماسه سنگ و ملات سیمان به ترتیب برابر با $40/5$ و $43/2$ است.

- با افزایش تعداد سیکل‌های یخبندان-ذوب مقدار سی تی ولیو که از آن به عنوان شاخصی برای بررسی ترک‌ها و حفرات داخل نمونه و تغییر آن در اثر فرایند یخبندان-ذوب استفاده شده است کاهش پیدا می‌کند که به معنای ایجاد و گسترش ترک و حفرات داخل سنگ در اثر فرآیند یخبندان-ذوب می‌باشد که منجر به کاهش مقاومت فشاری تک

منابع

- امیری، م.، مومیوند، ح.، ۱۳۹۷. ساخت ماسه سنگ مصنوعی با حوزه وسیعی از تخلخل، مجله ژئومکانیک نفت، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۸۵-۹۹.
- Altindag, R., Alyildiz, I.S. and Onargan, T., 2004. Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 6(41), pp.1023-1028.
- Altindag, R., Mutlutürk, M. and Karaguzel, R., 2003, September. The effects of freezing–thawing cycles on the use ability of Isparta andesite as a building stone. In *Proceedings of International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones* (p. 289).
- Binal, A., Kasapoğlu, K.E. and Gökçeoğlu, C., 1997. The Surficial Physical Deterioration Behaviour of Neogene Volcanosedimentary Rocks of Eskişehir-Yazılıkaya NW Turkey. *Engineering Geology and The Environment, Yunanistan*, pp.3065-3069.
- Cao, J. and Chung, D.D.L., 2002. Damage evolution during freeze–thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement. *Cement and concrete research*, 32(10), pp.1657-1661.
- Dunn, J.R. and Hudec, P.P., 1966. Water, clay and rock soundness.
- Everett, D.H., 1965. Complementary Information to Capillary Properties of Some Model Pore Systems with Special Reference to Frost Damage. *Rilem Bulletin*, (27).
- Feng, X.T., Chen, S. and Zhou, H., 2004. Real-time computerized tomography (CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2), pp.181-192.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R. and Varas-Muriel, M.J., 2015. Freeze–thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology*, 113, pp.40-51.
- Fujii, M. and Uyama, K., 2004, October. Recent advances on X-ray CT. In *Xray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks International Workshop on Xray CT for Geomaterials, Kumamoto, Japan* (p. 3). CRC Press.
- Hatheway, A.W., 2009. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring; 1974–2006.
- Jacobsen, S., Gran, H.C., Sellevold, E.J. and Bakke, J.A., 1995. High strength concrete—Freeze/thaw testing and cracking. *Cement and concrete research*, 25(8), pp.1775-1780.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R. and Khamchian, M., 2013. Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model. *Cold Regions Science and Technology*, 92, pp.29-36.

- Khanlari, G., Sahamieh, R.Z. and Abdilor, Y., 2015. The effect of freeze–thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones, central part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), pp.5991-6001.
- Latham, J.P., Van Meulen, J. and Dupray, S., 2006. Prediction of fragmentation and yield curves with reference to armourstone production. *Engineering geology*, 87(1-2), pp.60-74.
- Li, J., Kaunda, R.B. and Zhou, K., 2018. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone. *Cold Regions Science and Technology*, 154, pp.133-141.
- Li, J.L., Zhou, K.P., Liu, W.J. and Deng, H.W., 2016. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze–thaw cycles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(11), pp.2997-3003.
- Momeni, A., Abdilor, Y., Khanlari, G.R., Heidari, M. and Sepahi, A.A., 2016. The effect of freeze–thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), pp.1649-1656.
- Mutlutürk, M., Altindag, R. and Türk, G., 2004. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(2), pp.237-244.
- Nakamura, M., Togaya, T. and Okuda, S., 1977. Effect of Dimensional Distribution of Pores in porous ceramics on frost resistance under one dimensional cooling. *J. Ceram. Soc. Japan*, 85(987), p.549.
- Nasseri, M.H.B., Schubnel, A. and Young, R.P., 2007. Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(4), pp.601-616.
- Noor-E-Khuda, S., Albermani, F. and Veidt, M., 2017. Flexural strength of weathered granites: Influence of freeze and thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 156, pp.891-901.
- Otani, J. and Obara, Y. eds., 2004. *Xray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks International Workshop on Xray CT for Geomaterials, Kumamoto, Japan*. CRC Press.
- Prick, A., 1995. Dilatometrical behavior of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles. *Catena*, 25(1-4), pp.7-20.
- Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., Geraud, Y. and Latière, H.J., 1989. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics*, 159(1-2), pp.149-159.
- Reis, J.M.L. and Ferreira, A.J.M., 2006. Freeze–thaw and thermal degradation influence on the fracture properties of carbon and glass fiber reinforced polymer concrete. *Construction and building materials*, 20(10), pp.888-892.
- Saito, M., Ohta, M. and Ishimori, H., 1994. Chloride permeability of concrete subjected to freeze-thaw damage. *Cement and Concrete Composites*, 16(4), pp.233-239.
- Shang, H.S. and Song, Y.P., 2006. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*, 36(10), pp.1857-1864.
- Siline, M., Ghorbel, E. and Bibi, M., 2017. Effect of freeze–Thaw cycles on the physicommechanical properties of a pozzolanic mortar. *Construction and Building Materials*, 134, pp.32-38.
- Sun, W., Zhang, Y.M., Yan, H.D. and Mu, R., 1999. Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles. *Cement and Concrete Research*, 29(9), pp.1519-1523.
- Topal, T. and Sözmen, B., 2003. Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument. *Engineering Geology*, 68(3-4), pp.201-223.
- Yu, J., Chen, X., Li, H., Zhou, J.W. and Cai, Y.Y., 2015. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and permeability of red sandstone under triaxial compression. *Journal of Mountain Science*, 12(1), pp.218-231.
- Zappia, G., Sabbioni, C., Riontino, C., Gobbi, G. and Favoni, O., 1998. Exposure tests of building materials in urban atmosphere. *Science of the total environment*, 224(1-3), pp.235-244.