

ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌های ساختمانی کربناته بعد از چرخه‌های ذوب و انجماد

با استفاده از روش CART

وحید امیرکیایی^۱، ابراهیم قاسمی*^۲، لهراسب فرامرزی^۳

دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۰۷ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۲/۰۶

چکیده

چرخه‌های ذوب و انجماد یکی از مهمترین عوامل هوازدگی فیزیکی سنگ‌ها است که می‌تواند به شدت دوام طولانی مدت و عمر سرویس‌دهی سنگ‌های ساختمانی را تحت تأثیر قرار دهد. به منظور ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد می‌توان از دو پارامتر ثابت تخریب (λ) و شاخص نیمه عمر ($N_{1/2}$) استفاده کرد. تعیین این دو پارامتر نیازمند انجام آزمایش ذوب و انجماد است که فرآیندی سخت، زمان‌بر و پرهزینه است. لذا توسعه مدل‌هایی غیر مستقیم به گونه‌ای که بتوان این دو پارامتر را بدون انجام آزمایش ذوب و انجماد تخمین زد، می‌تواند در ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها به طور سریع و با هزینه کمتر مفید واقع شود. در این مقاله با بررسی سرعت موج فشاری (V_p) سنگ‌ها طی فرآیند ذوب و انجماد برای ۲۲ نوع از سنگ‌های ساختمانی کربناته ایران، دو پارامتر λ و $N_{1/2}$ تعیین شدند. سپس بر اساس داده‌های به دست آمده و با استفاده از دو تکنیک تحلیل رگرسیون و درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART) مدل‌هایی برای پیش‌بینی این دو پارامتر توسعه داده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های توسعه یافته بر اساس تکنیک CART، دقت و صحت بالاتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی دارند. این مدل‌ها قادر هستند بر اساس تخلخل اولیه سنگ پیش‌بینی قابل قبولی از λ و $N_{1/2}$ ارائه دهند.

کلید واژه‌ها: چرخه‌های ذوب و انجماد، دوام طولانی مدت، درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)، شاخص نیمه عمر، ثابت تخریب.

۱. کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، e_ghasemi@iut.ac.ir

۳. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

سنگ یکی از پرکاربردترین و رایج‌ترین مصالح ساختمانی است که از گذشته تا کنون مورد استفاده قرار گرفته است. سنگ‌ها دارای قابلیت منحصر به فردی هستند که قابل مقایسه با سایر مصالح ساختمانی نمی‌باشند. از جمله این ویژگی‌ها دوام و مقاومت آن‌ها می‌باشد، که یکی از پارامترهای اساسی در انتخاب سنگ‌های ساختمانی است که نقش قابل ملاحظه‌ای در پایداری آن‌ها دارد. امروزه یکی از مسائل مهم در صنعت سنگ ساختمانی بررسی زوال یا تخریب سنگ‌ها در طی فرآیند هوازدهی می‌باشد. سنگ‌هایی که در معرض فرآیند هوازدهی به خصوص چرخه‌های ذوب و انجماد قرار می‌گیرند یکپارچگی خود را از دست داده و در طی زمان معینی تخریب می‌شوند. با توجه به شرایط آب و هوایی برخی مناطق ایران با احتمال به وجود آمدن شرایط یخبندان می‌توان گفت چرخه یخبندان یکی از مهمترین عوامل اثر گذار بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ‌های مورد استفاده در نمای ساختمان‌ها می‌باشند. به همین علت ضروری است که پیش از انتخاب یک سنگ به منظور استفاده در نمای ساختمان‌ها و مراکز اداری توجه ویژه‌ای به چرخه‌های یخبندان شود و متناسب با شرایط آب و هوایی، سنگ‌هایی با مقاومت و دوام مناسب پیشنهاد شود. مطالعات گوناگونی به منظور بررسی میزان تخریب ایجاد شده در سنگ‌های مختلف تا کنون انجام گرفته است. در این مطالعات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شامل جذب آب، تخلخل، سرعت موج فشاری، شاخص بار نقطه‌ای، مدول الاستیک و مدول دینامیکی (Dynamic modulus)، مقاومت کششی و فشاری مورد بررسی قرار گرفتند و با توجه به تغییرات این پارامترها در طی فرآیند ذوب و انجماد، میزان تخریب صورت گرفته در سنگ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است (Chen et al., 2004; Takarli et al., 2008; Tan et al., 2011; Martínez-Martínez et al., 2013; Özbek, 2014; Khanlari and Abdilor, 2015; Park et al., 2015; Uğur and Toklu, 2019; Liping et al., 2019; Fan et al., 2020; Abdelhamid et al., 2020). از طرفی دیگر، طی سالیان اخیر مدل‌هایی به منظور ارزیابی و پیش‌بینی تخریب سنگ‌ها ناشی از چرخه‌های

ذوب و انجماد توسط محققین ارائه شده است. یکی از ابتدایی‌ترین و پرکاربردترین این مدل‌ها، مدل موتوتورک و همکارانش (Mutlutürk et al., 2004) می‌باشد. آن‌ها مدلی نمایی به منظور بررسی میزان تخریب در سنگ‌های کربناته توسعه دادند که فرم نهایی مدل آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$I_N = I_0 e^{-\lambda N} \quad (1)$$

که در این رابطه I_N میزان یکپارچگی سنگ بعد از N امین چرخه ذوب و انجماد، I_0 میزان یکپارچگی سنگ در حالت اولیه، N تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد و λ ثابت تخریب می‌باشند. ثابت تخریب (Decay constant, λ) یکی از مهمترین پارامترهایی است که می‌توان برای ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌های تحت تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد به کار برد و بیانگر متوسط کاهش یکپارچگی سنگ در اثر چرخه‌های ذوب و انجماد می‌باشد، به عبارتی میزان زوال یا تخریب ایجاد شده در سنگ را نشان می‌دهد (Mutlutürk et al., 2004; Turul, 2004; Yavuz et al., 2006; Yavuz, 2011). علاوه بر ثابت تخریب، پارامتر دیگری که می‌توان از مدل موتوتورک و همکارانش استخراج کرد و برای ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها به کار برد، شاخص نیمه عمر (Half-life index, $N_{1/2}$) است. به طور کلی به تعداد چرخه‌های لازم برای کاهش میزان یکپارچگی سنگ تا رسیدن به نصف مقدار اولیه (کاهش ویژگی‌های مکانیکی سنگ تا نصف مقدار اولیه)، شاخص نیمه عمر گفته می‌شود. شاخص نیمه عمر بر اساس رابطه ارائه شده توسط موتوتورک و همکارانش به صورت زیر محاسبه می‌شود (Mutlutürk et al., 2004):

طی سالیان اخیر، بعضی از محققین با تعیین دو پارامتر λ و $N_{1/2}$ ، دوام طولانی مدت سنگ‌ها را مورد بررسی قرار دادند، که برخی

از آن‌ها در زیر شرح داده شده است. آکین و اوسان (Akin and Özsan, 2011) با انجام آزمایش‌های سریع هوازدهی (مانند آزمایش ذوب و انجماد و تبلور نمک) و تعیین دو پارامتر ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر، دوام طولانی مدت

موج فشاری (P-wave velocity, V_p) طی فرآیند ذوب و انجماد مقدار ثابت تخریب را برای ۵ نمونه از سنگ‌های آهکی فرانسه با استفاده از رابطه موتلتورک و همکارانش تعیین کردند و سپس ارتباط بین ثابت تخریب با خواص سنگ تازه (سنگ قبل از چرخه‌های ذوب و انجماد) را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد تخلخل و ضریب موئینگی سنگ بالاترین ارتباط را با ثابت تخریب دارند. اخیراً عبدالحمید و همکارانش (Abdelhamid et al., 2020) به بررسی و تعیین میزان تخریب سنگ‌های ساختمانی در طی چرخه‌های ذوب و انجماد پرداختند. آن‌ها خواص مقاومتی (شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، شاخص بار نقطه‌ای و سختی چکش اشمیت) را برای ۶ نمونه از سنگ‌های آهکی معادن چین طی ۵۰ چرخه ذوب و انجماد مورد بررسی قرار دادند و در نهایت مقادیر ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر را با استفاده از رابطه موتلتورک و همکارانش با توجه به میزان تغییرات هر کدام از خواص مقاومتی برای هر کدام از سنگ‌ها تعیین کردند. تعیین ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر برای هر سنگ نیازمند آزمایش ذوب و انجماد می‌باشد که انجام آن بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است (Bayram, 2012). لذا توسعه مدل‌هایی به منظور پیش‌بینی این دو پارامتر به گونه‌ای که نیاز به انجام آزمایش ذوب و انجماد نباشد، می‌تواند در ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها با صرف زمان و هزینه کمتر، مفید واقع شود. اگرچه در بالا به مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره شد ولی تا کنون مدلی برای تخمین این دو پارامتر برای سنگ‌های ساختمانی ارائه نشده است. هدف اصلی در این مقاله، این است که با بررسی گسترده وسیعی از سنگ‌های ساختمانی کربناته ایران، مدل‌هایی برای پیش‌بینی دو پارامتر $N_{1/2}$ و توسعه داده شود به گونه‌ای که بتوان این دو پارامتر را تنها بر اساس خواص اولیه سنگ (خواص سنگ قبل از چرخه‌های ذوب و انجماد) تخمین زد و نیاز به انجام آزمایش ذوب و انجماد نباشد.

سنگ تراورتن زرد اسکپازار (Eskipazar) ترکیه را در برابر اثرات زیست محیطی گوناگون مورد بررسی قرار دادند. قبادی و همکارانش (۱۳۹۲) به بررسی و اندازه‌گیری دوام طولانی مدت ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در حضور آب تازه و محلول نمک تحت فرآیند ذوب و انجماد پرداختند. آن‌ها در این مطالعه دو پارامتر شاخص نیمه عمر و ثابت تخریب را با استفاده از رابطه نمایی که موتلتورک و همکارانش در سال ۲۰۰۴ توسعه داده بودند، اندازه‌گیری کردند و سپس با در نظر گرفتن این دو پارامتر توانستند دوام طولانی مدت ماسه سنگ-ها را ارزیابی کنند. جمشیدی و همکارانش (Jamshidi et al., 2013) با بررسی تغییرات مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای طی فرآیند ذوب و انجماد، ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر را برای ۱۴ نمونه سنگ ساختمانی تعیین کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که هیچ ارتباط معناداری بین نوع سنگ و مقادیر این دو پارامتر وجود ندارد. جمشیدی و همکارانش (۱۳۹۵) به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ تراورتن آذرشهر طی چرخه‌های ذوب و انجماد و تبلور نمک پرداختند و با تعیین ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر دوام طولانی مدت این سنگ را مورد ارزیابی قرار دادند. قبادی و همکارانش (۱۳۹۴) به بررسی تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد بر روی دو پارامتر دوام و مقاومت کششی توف‌های سازند کرج پرداختند. آن‌ها در این مطالعه نمونه‌های توف را تا ۸۰ چرخه تحت فرآیند ذوب و انجماد قرار دادند و در نهایت توانستند یک رابطه نمایی به منظور تخمین دوام و مقاومت کششی در طی فرآیند ذوب و انجماد ارائه دهند. جمشیدی و همکارانش (Jamshidi et al., 2016) با انجام آزمایش ذوب و انجماد در حضور آب تازه و محلول سدیم سولفات بر روی سنگ تراورتن گردویی آذرشهر و ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی آن طی چرخه-های ذوب و انجماد، پارامترهای ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر را برای این سنگ بر اساس خواص گوناگون تعیین و دوام طولانی مدت آن را مورد بررسی قرار دادند. اسلامی و همکارانش (Eslami et al., 2018) با بررسی تغییرات سرعت

۲. مواد و روش

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد برای انجام این تحقیق رنج وسیعی از سنگ‌های ساختمانی کربناته شامل ۱۲ نوع تراورتن، ۷ نوع مرمریت و ۳ نوع سنگ آهک (Limestone) (مجموعاً ۲۲ نوع سنگ) در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها از معادن گوناگون سنگ ساختمانی در استان‌های مختلف کشور شامل آذربایجان غربی و شرقی، یزد، اصفهان، مرکزی، فارس، لرستان و کرمانشاه جمع‌آوری شده است (شکل ۱). نام تجاری، نوع، دسته و کد مربوط به هر نمونه در جدول ۱ ارائه شده است. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی آن‌ها انجام شد. در ابتدا خواص فیزیکی

نمونه‌ها شامل چگالی اشباع (ρ_{sat})، چگالی خشک (ρ_d)، جذب آب (WA)، تخلخل (n) به روش غوطه‌وری بر اساس استاندارد ISRM تعیین شدند (ISRM, 1979). سپس برای هر نوع سنگ، سه نمونه به ابعاد $7 \times 7 \times 7$ سانتی‌متر تهیه و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) طبق استاندارد ASTM C170 تعیین شد (ASTM, 2017). لازم به ذکر است مقدار میانگین سه اندازه‌گیری به عنوان مقدار نهایی مقاومت فشاری تک‌محوری در نظر گرفته شده است. مقادیر خواص فیزیکی و مقاومت فشاری تک‌محوری برای هر نوع سنگ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. نام تجاری، نوع، دسته و کد مربوط به سنگ‌های مورد مطالعه.

No.	Commercial name	Rock type	Rock class	Rock code
1	Bukan	Travertine	Sedimentary	T1
2	Targh	Travertine	Sedimentary	T2
3	Darebokhari	Travertine	Sedimentary	T3
4	Asali Yazd	Travertine	Sedimentary	T4
5	Hajiabad	Travertine	Sedimentary	T5
6	Ramshe	Travertine	Sedimentary	T6
7	Sefid abbas abad	Travertine	Sedimentary	T7
8	Ghermez Azarshahr	Travertine	Sedimentary	T8
9	Limoei Isfahan	Travertine	Sedimentary	T9
10	Doudi Takab	Travertine	Sedimentary	T10
11	Ghermez Isfahan	Travertine	Sedimentary	T11
12	Ghermez Yazd	Travertine	Sedimentary	T12
13	Sefid Shiraz	Limestone	Sedimentary	L1
14	Limestone Kermanshah	Limestone	Sedimentary	L2
15	Kerem marvdasht	Limestone	Sedimentary	L3
16	Chini Aligoudarz	Marble	Metamorphic	M1
17	Anarak	Marble	Metamorphic	M2
18	Lashotor	Marble	Metamorphic	M3
19	Khoubangan	Marble	Metamorphic	M4
20	Harsin	Marble	Metamorphic	M5
21	Chini Shiraz	Marble	Metamorphic	M6
22	Salsali	Marble	Metamorphic	M7

درون فریزر با دمای -20 درجه سانتی‌گراد (فرآیند انجماد) قرار داده شدند و سپس بلافاصله درون یک حمام آب با دمای $+20$ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت (فرآیند ذوب) اشباع شدند. هر چرخه ذوب و انجماد به مدت ۴ ساعت (۲ ساعت دوره انجماد و ۲ ساعت دوره ذوب) به طول می‌انجامد که نحوه تغییرات دمایی و زمانی برای هر سیکل در شکل ۲ نشان

در ادامه برای هر نوع سنگ مجدداً ۳ بلوک به ابعاد $7 \times 7 \times 7$ سانتی‌متر (مجموعاً ۶۶ نمونه) تهیه و آزمایش ذوب و انجماد بر روی آن‌ها انجام گرفت. آزمایش چرخه‌های ذوب و انجماد بر اساس استاندارد TS 699 انجام شده است (TSE, 1987). به این صورت که نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در یک استخر آب اشباع شدند و بعد از اشباع به مدت ۲ ساعت

موج فشاری طی چرخه‌های ذوب و انجماد را نشان می‌دهد. از آنجایی که برای هر نوع سنگ اندازه‌گیری V_p بر روی سه نمونه انجام می‌شد، در نهایت مقدار میانگین سه اندازه‌گیری به عنوان سرعت موج فشاری گزارش شده است. در جدول ۳ مقادیر سرعت موج فشاری طی فرآیند ذوب و انجماد برای هر سنگ ارائه شده است. همچنین درصد افت سرعت موج فشاری بعد از اتمام چرخه‌های ذوب و انجماد برای هر سنگ در ستون آخر جدول ۳ آورده شده است.

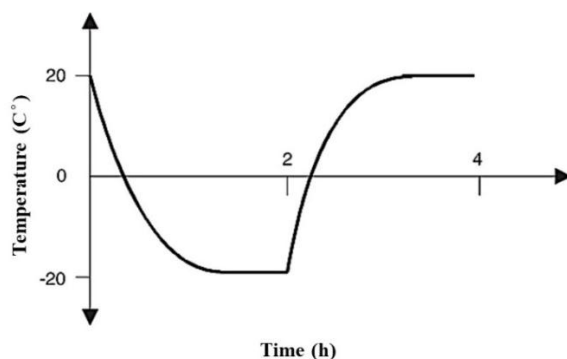
داده شده است. چرخه‌های ذوب و انجماد ۲۵ مرتبه بر روی نمونه‌ها انجام و در طی آن تغییرات سرعت موج فشاری (V_p) برای هر نوع سنگ به طور مجزا مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا V_p برای نمونه‌های پیش از آزمایش ذوب و انجماد تعیین شد (چرخه صفر) و سپس مقدار آن بعد از هر ۵ چرخه (پایان چرخه‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵) اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که سرعت موج فشاری نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISRM تعیین شدند (ISRM, 1978). شکل ۳ به طور شماتیک تعداد نمونه‌ها و مراحل اندازه‌گیری سرعت



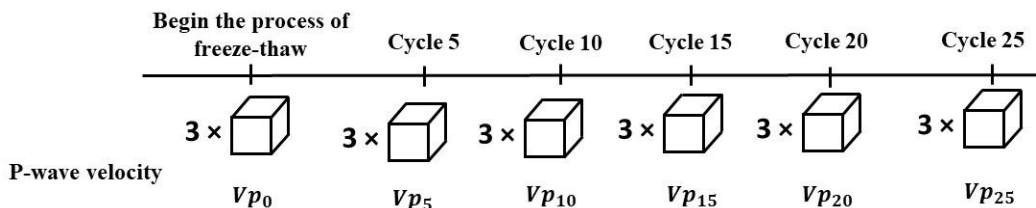
شکل ۱. موقعیت مکانی سنگ‌های مورد مطالعه.

جدول ۲. خواص فیزیکی و مقاومت فشاری تک‌محوری برای سنگ‌های مورد مطالعه.

No.	Rock code	ρ_{sat} (g/cm ³)	ρ_{dry} (g/cm ³)	WA (%)	n (%)	UCS (MPa)
1	T1	2.60	2.55	1.58	4.04	65.58
2	T2	2.45	2.41	1.62	3.91	46.96
3	T3	2.48	2.42	2.35	5.69	61.97
4	T4	2.39	2.32	2.82	6.56	42.64
5	T5	2.38	2.34	2.01	4.70	48.36
6	T6	2.44	2.40	1.77	4.25	55.77
7	T7	2.44	2.41	1.63	3.92	58.29
8	T8	2.44	2.35	3.65	8.58	36.08
9	T9	2.45	2.37	3.22	7.63	40.79
10	T10	2.34	2.27	3.24	7.35	48.36
11	T11	2.42	2.34	3.08	7.23	34.46
12	T12	2.44	2.35	3.61	8.50	47.22
13	L1	2.54	2.51	1.46	3.66	69.96
14	L2	2.38	2.28	4.48	10.22	36.10
15	L3	2.40	2.31	4.32	9.95	37.38
16	M1	2.67	2.65	0.38	1.02	113.38
17	M2	2.68	2.66	0.44	1.18	103.56
18	M3	2.67	2.65	0.51	1.35	118.75
19	M4	2.68	2.67	0.47	1.26	113.30
20	M5	2.67	2.66	0.49	1.31	103.69
21	M6	2.70	2.68	0.53	1.42	111.17
22	M7	2.67	2.66	0.41	1.09	108.20



شکل ۲. روند تغییرات دما و زمان در هر چرخه ذوب و انجماد (برگرفته از Yavuz et al., 2006).



شکل ۳. اندازه‌گیری سرعت موج فشاری طی فرآیند چرخه‌های ذوب و انجماد.

جدول ۳. سرعت موج فشاری اندازه‌گیری شده در طی فرآیند ذوب و انجماد.

No.	Rock code	Vp ₀ (m/s)	Vp ₅ (m/s)	Vp ₁₀ (m/s)	Vp ₁₅ (m/s)	Vp ₂₀ (m/s)	Vp ₂₅ (m/s)	Loss percentage (%)
1	T1	5738	5578	5504	5504	5504	5229	10.42
2	T2	5504	5299	5108	5108	4931	4829	12.26
3	T3	5504	5312	5108	5001	4875	4726	14.14
4	T4	5168	5135	4946	4920	4838	4422	14.43
5	T5	5504	5463	5299	5171	5095	4829	12.26
6	T6	5846	5615	5512	5512	5417	4986	14.71
7	T7	6140	5806	5652	5652	5578	5450	11.24
8	T8	4832	4410	4149	4128	3917	3747	22.45
9	T9	5049	4990	4724	4682	4651	4120	18.40
10	T10	5504	5171	4531	4455	4361	4277	22.29
11	T11	5010	4882	4469	4469	4278	4062	18.92
12	T12	5504	5401	5203	5203	5019	4501	18.22
13	L1	6140	6053	5973	5973	5806	5303	13.63
14	L2	4805	4240	3975	3852	3717	3675	23.52
15	L3	4835	4401	4250	4214	4062	3688	23.72
16	M1	6404	6283	5966	5726	5625	5550	13.34
17	M2	6475	6228	5973	5856	5751	5687	12.17
18	M3	6428	6228	5966	5966	5966	5610	12.73
19	M4	6514	6228	6228	6053	5955	5732	12.00
20	M5	6422	6228	6228	6228	5726	5600	12.80
21	M6	6452	6100	5806	5681	5681	5622	12.86
22	M7	6440	6236	6053	6053	5886	5578	13.39

۳. ارزیابی دوام طولانی مدت

همانگونه که پیش از این ذکر شد می‌توان برای ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد از دو پارامتر (λ) و ($N_{1/2}$) استفاده کرد. در این بخش، مقادیر این دو پارامتر برای سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس مدل تخریب موتوتورک و همکارانش با توجه به تغییرات سرعت موج فشاری طی چرخه‌های ذوب و انجماد تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است آزمایش سرعت موج فشاری به دلیل غیرمخرب و سریع بودن مدنظر قرار گرفته است که می‌تواند در کاهش هزینه‌ها بسیار مفید واقع شود. با توجه به تغییرات سرعت موج فشاری طی چرخه‌های ذوب و انجماد، می‌توان رابطه موتوتورک را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Vp_N = Vp_0 e^{-\lambda N} \quad (3)$$

که در این رابطه Vp_0 و Vp_N به ترتیب موج فشاری بعد از چرخه ذوب و انجماد و سرعت موج فشاری اولیه سنگ (پیش از آزمایش ذوب و انجماد) می‌باشند. در ادامه برای هر نوع سنگ با توجه به مقادیر سرعت موج فشاری طی چرخه-

های ذوب و انجماد، رابطه (۳) با استفاده از نرم افزار SPSS توسعه داده شد و بر اساس آن λ و $N_{1/2}$ استخراج شد. در جدول ۴، رابطه توسعه داده شده به همراه ضریب تعیین (R^2)، λ و $N_{1/2}$ برای هر نمونه سنگ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود برای تمامی سنگ‌ها رابطه توسعه داده شده از ضریب تعیین بالایی برخوردار است که بیانگر دقت بالای روابط می‌باشد. همچنین برای سنگ‌های مورد مطالعه مقدار λ بین ۰/۰۰۳۴ تا ۰/۰۱۰۲ مقدار $N_{1/2}$ بین ۶۷/۹۴ تا ۲۰۳/۸۴ در حال تغییر است. کمترین مقدار ثابت تخریب (بیشترین مقدار شاخص نیمه عمر) مربوط به سنگ تراورتن بوکان (T1) می‌باشد که بیانگر دوام بالای این سنگ در برابر فرآیند یخبندان است و بیشترین مقدار ثابت تخریب (کمترین مقدار شاخص نیمه عمر) مربوط به سنگ تراورتن دودی تکاب (T10) است که بیانگر آن است که این سنگ زمانی که در معرض چرخه-های ذوب و انجماد قرار می‌گیرد نسبت به سایر سنگ‌ها از دوام کمتری برخوردار است.

جدول ۴. روابط، ضریب تعیین، ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر برای سنگ‌های مورد مطالعه.

Rock code	Equation	R ²	λ	$N_{1/2}$	Rock code	Equation	R ²	λ	$N_{1/2}$
T1	$Vp_N = 5761.08e^{-0.0034N}$	0.80	0.0043	203.82	T12	$Vp_N = 5597.3e^{-0.0070N}$	0.84	0.0070	99.00
T2	$Vp_N = 5453.63e^{-0.0050N}$	0.96	0.0050	138.60	L1	$Vp_N = 6238.89e^{-0.0049N}$	0.75	0.0049	141.43
T3	$Vp_N = 5473.12e^{-0.0059N}$	0.99	0.0059	117.46	L2	$Vp_N = 4568.11e^{-0.0101N}$	0.88	0.0101	68.61
T4	$Vp_N = 5247.8e^{-0.0055N}$	0.84	0.0055	126.00	L3	$Vp_N = 4742.97e^{-0.0092N}$	0.92	0.0092	75.32
T5	$Vp_N = 5563.62e^{-0.0051N}$	0.95	0.0051	135.88	M1	$Vp_N = 6395.33e^{-0.0062N}$	0.96	0.0062	111.77
T6	$Vp_N = 5840.16e^{-0.0052N}$	0.84	0.0052	133.27	M2	$Vp_N = 6390.22e^{-0.0052N}$	0.94	0.0052	133.27
T7	$Vp_N = 6008.93e^{-0.0041N}$	0.86	0.0041	169.02	M3	$Vp_N = 6380.45e^{-0.0046N}$	0.88	0.0046	150.65
T8	$Vp_N = 4700.38e^{-0.0093N}$	0.94	0.0093	74.52	M4	$Vp_N = 6471.06e^{-0.0046N}$	0.95	0.0046	140.36
T9	$Vp_N = 5126.03e^{-0.0071N}$	0.83	0.0071	97.60	M5	$Vp_N = 6484.21e^{-0.0054N}$	0.83	0.0054	128.33
T10	$Vp_N = 5335.83e^{-0.0102N}$	0.87	0.0102	97.94	M6	$Vp_N = 6284.56e^{-0.0053N}$	0.84	0.0053	130.75
T11	$Vp_N = 5007.98e^{-0.0083N}$	0.95	0.0083	83.49	M7	$Vp_N = 6432.14e^{-0.0051N}$	0.94	0.0051	135.88

۴. توسعه مدل

گونه‌ای که دیگر برای تخمین آن‌ها نیاز به آزمایش وقت گیر و پرهزینه ذوب و انجماد نباشد. در ادامه نحوه توسعه مدل‌ها با شرح جزئیات بیان شده است.

هدف اصلی این مقاله توسعه مدل‌هایی است که بتوان با استفاده از خواص اولیه سنگ دو پارامتر اساسی ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد یعنی ثابت تخریب (λ) و شاخص نیمه عمر ($N_{1/2}$) را تخمین زد به

۱-۴. تحلیل رگرسیون

در این بخش با استفاده از تکنیک آماری تحلیل رگرسیون روابطی (مدل‌هایی) برای تخمین مقادیر λ و $N_{1/2}$ توسعه داده شده است. برای این منظور از میان خواص اولیه سنگ سه ویژگی تخلخل (n)، سرعت موج فشاری (V_p) و مقاومت فشاری تک محوری (UCS) سنگ به عنوان پارامتر ورودی مدنظر قرار گرفتند. پیش از توسعه روابط لازم بود ارتباط هر یک از این پارامترهای ورودی با λ و $N_{1/2}$ (پارامترهای خروجی) مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از تحلیل رگرسیون ساده به فرم‌های خطی، لگاریتمی، توانی و نمایی در نرم افزار SPSS بهره گرفته شد. مقادیر ضریب تعیین برای فرم‌های گوناگون برای λ و $N_{1/2}$ به ترتیب در جدول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌شود خصوصیات فیزیکی-مکانیکی اولیه سنگ کم و بیش در ارتباط با λ و $N_{1/2}$ می‌باشند، لذا می‌توان تمامی آن‌ها را به عنوان پارامتر ورودی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده استفاده کرد.

جدول ۵. ضرایب تعیین برای ثابت تخریب (λ).

Model	n (%)	UCS (MPa)	Vp (m/s)
Linear	0.60	0.30	0.50
Logarithmic	0.38	0.38	0.52
Power	0.35	0.35	0.50
Exponential	0.56	0.27	0.48

جدول ۶. ضرایب تعیین برای شاخص نیمه عمر ($N_{1/2}$).

Model	n (%)	UCS (MPa)	Vp (m/s)
Linear	0.48	0.22	0.42
Logarithmic	0.28	0.30	0.44
Power	0.35	0.35	0.50
Exponential	0.56	0.27	0.48

در ادامه سعی بر آن است که با استفاده از تکنیک تحلیل رگرسیون در محیط نرم افزار SPSS، دو رابطه تجربی برای پیش‌بینی ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر برای سنگ‌های ساختمانی توسعه داده شود. توسعه مدل رگرسیونی با در نظر گرفتن سه پارامتر ورودی n ، UCS و V_p می‌تواند مشکل هم خطی چندگانه (Multi-collinearity) را به همراه داشته باشد زیرا این سه پارامتر از دیدگاه مکانیک سنگی به شدت در

ارتباط بوده و همبستگی بسیار بالایی بین آنها برقرار است. به منظور رفع این مشکل در نرم افزار SPSS می‌توان از دستور Stepwise برای توسعه معادلات رگرسیونی استفاده کرد. این دستور با در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترها، تأثیر گذارترین پارامترهای ورودی را برای توسعه روابط منظور کرده و سایر پارامترها را حذف می‌کند. با اجرای دستور Stepwise، تخلخل (n) به عنوان مؤثرترین پارامتر ورودی شناسایی شد. سپس با انجام تحلیل رگرسیون به فرم‌های خطی و غیر خطی، بهترین روابط برای پیش‌بینی ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر به ترتیب مطابق روابط ۴ و ۵ توسعه یافتند. در این روابط n بر حسب درصد است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بهترین رابطه برای پیش‌بینی ثابت تخریب به فرم خطی با ضریب تعیین 0.76 و بهترین رابطه برای پیش-بینی شاخص نیمه عمر به فرم نمایی با ضریب تعیین 0.56 می‌باشد. باید ذکر شود که آماره p -مقدار (p -value) برای هر دو رابطه برابر با 0.00 می‌باشد. از آنجایی که مقدار این آماره کمتر از 0.01 است یعنی هر دو رابطه از نظر آماری با سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار هستند و بر اساس داده‌های موجود قادر به بیان تغییرات ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر می‌باشند.

$$\lambda = 0.0005n + 0.0039 \quad (۴)$$

$$N_{1/2} = 164.77e^{-0.073n} \quad (۵)$$

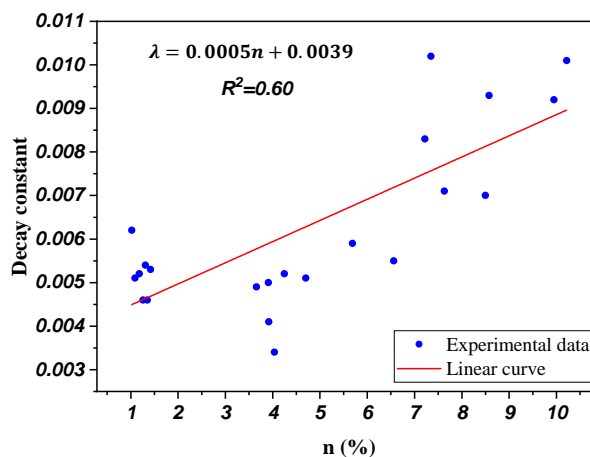
در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب ارتباط تخلخل با ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر بر اساس روابط ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، به طور کلی با افزایش تخلخل، ثابت تخریب افزایش و شاخص نیمه عمر کاهش می‌یابد.

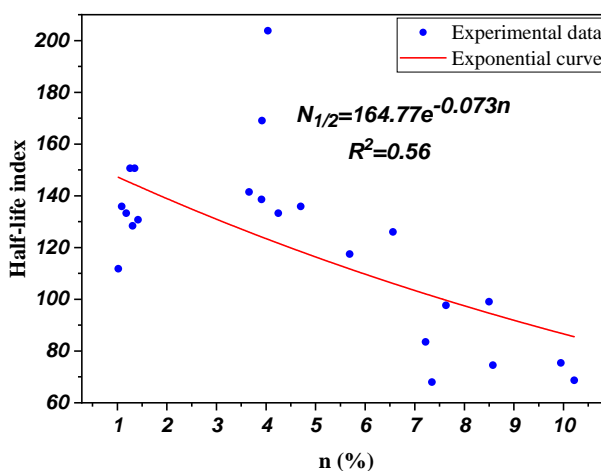
اگرچه این دو رابطه از نظر آماری و منطقی صحیح می‌باشند ولی ایراد اساسی آن‌ها پایین بودن ضریب تعیین یا به عبارتی دیگر پایین بودن دقت پیش‌بینی آن‌ها می‌باشد. لذا در ادامه سعی بر آن شد تا با استفاده از تکنیک‌های نوین داده کاوی

در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون می‌باشد که بر اساس آن ساختاری درختی شکل برای پیش‌بینی پارامتر خروجی ارائه می‌شود (Ghasemi et al., 2016). ساختار درختی شامل گره ریشه، گره‌های میانی و گره‌های پایانی (برگ‌ها) می‌باشد که مقادیر پیش‌بینی شده در برگ‌ها قرار گرفته‌اند. تکنیک CART یک پروسه افزاینده بازگشت دوتایی است که گره‌های والدین را دقیقاً به دو گره فرزند منشعب می‌کند و به طور بازگشتی منشعب کردن را تا زمانی که به یک معیار همگن برسد، ادامه می‌دهد (Kalmegh, 2015). به عبارتی دیگر فرآیند تقسیم داده‌ها تا زمانی ادامه پیدا می‌یابد که مقادیر متغیر هدف نمونه‌های رسیده به گره تغییرات اندکی داشته باشند یا اینکه تعداد نمونه‌های کمی در این گره باشند. CART داده‌ها را به دو مجموعه افزایش می‌کند به طوری رکوردهای درون هر زیر مجموعه نسبت به زیر مجموعه قبلی همگن‌ترند. همچنین فیلد پیش‌بینی کننده در چندین سطح از درخت تکرار می‌شوند. درخت CART به منظور انتخاب گره‌های درخت از شاخصی به نام شاخص جینی (Gini index) استفاده می‌کند (Rutkowski et al., 2014). به عبارتی دیگر برای اینکه درخت CART تشخیص دهد که کدام ویژگی اطلاعات بیشتری می‌دهد، از این شاخص در ساختار خود استفاده می‌کند. به طور کلی هر چقدر مقدار شاخص جینی برای یک ویژگی کوچکتر باشد، آن ویژگی اطلاعات بیشتری دارد و می‌تواند در قسمت‌های بالایی درخت قرار گیرد. همچنین در این درخت به منظور تعیین مقدار بهینه نقطه جداساز برای هر ویژگی از روش آزمون و خطا استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، کاربرد تکنیک CART به منظور توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده در مسائل معدنی و مکانیک سنگی مانند پیش‌بینی لرزش زمین (Hasanipanah et al., 2017)، پیش‌بینی عملکرد ماشین حفار مکانیزه (Salimi et al., 2018)، پیش‌بینی عقب‌زدگی ناشی از آتشفشاری (Ghasemi et al., 2016) و غیره رشد چشمگیری داشته است.

مدل‌هایی با دقت بالاتر برای پیش‌بینی دوام طولانی مدت سنگ‌ها توسعه داده شود.



شکل ۴: ارتباط بین تخلخل با ثابت تخریب.



شکل ۵: ارتباط بین تخلخل با شاخص نیمه عمر.

از آنجایی که هدف توسعه مدل‌هایی شفاف است به گونه‌ای که کاربر بتواند به راحتی ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی را درک کرده و مقادیر ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر را تخمین بزند لذا از تکنیک درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (Classification and Regression Tree, CART) استفاده شد.

۲-۴. درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)

درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART) یک تکنیک داده کاوی قوی و نوآورانه برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده

۳-۲. توسعه مدل CART

$n > 3.915; \lambda = 0.0044$
 $n \leq 3.915:$
 $n \leq 1.22; \lambda = 0.0051$
 $n > 1.22:$
 $n > 1.285; \lambda = 0.0050$
 $n \leq 1.285; \lambda = 0.0046$

از آنجایی که در بخش‌های قبلی مشخص شد که مؤثرترین پارامتر ورودی برای ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها تخلخل است لذا با استفاده از این پارامتر و تکنیک CART مدل درختی برای پیش‌بینی ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر توسعه داده شد. مدل‌های درختی با استفاده از نرم افزار STATISTICA ساخته شده‌اند و ساختار آن‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شوند. همانگونه که ملاحظه می‌شود هر دو مدل دارای ۸ گره برگ می‌باشند. همچنین قوانین استخراج شده به منظور پیش‌بینی ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر بر اساس مدل‌های درختی توسعه داده شده به صورت زیر می‌باشند:

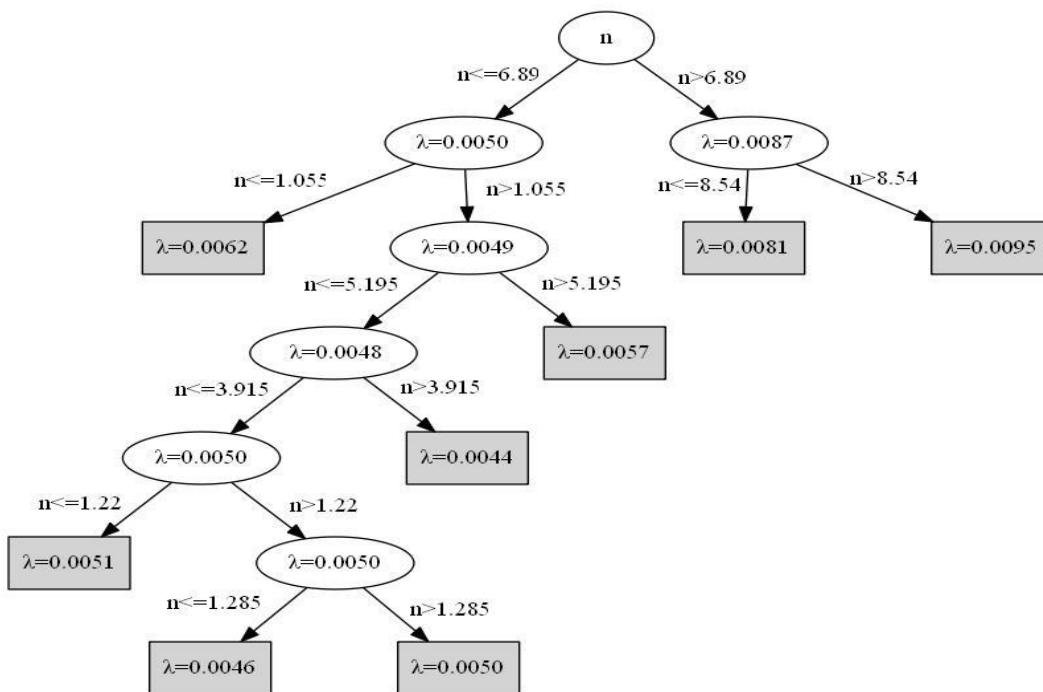
مجموعه قوانین استخراج شده به منظور پیش‌بینی شاخص نیمه عمر:

$n > 6.89:$
 $n > 8.54; N_{1/2} = 72.82$
 $n \leq 8.54; N_{1/2} = 87.01$
 $n \leq 6.89:$
 $n \leq 1.055; N_{1/2} = 111.77$
 $n > 1.055$
 $n > 4.145; N_{1/2} = 128.15$
 $n \leq 4.145:$
 $n > 3.915; N_{1/2} = 186.42$
 $n \leq 3.915:$
 $n \leq 1.22; N_{1/2} = 134.57$
 $n > 1.22:$
 $n > 1.285; N_{1/2} = 137.95$
 $n \leq 1.285; N_{1/2} = 150.65$

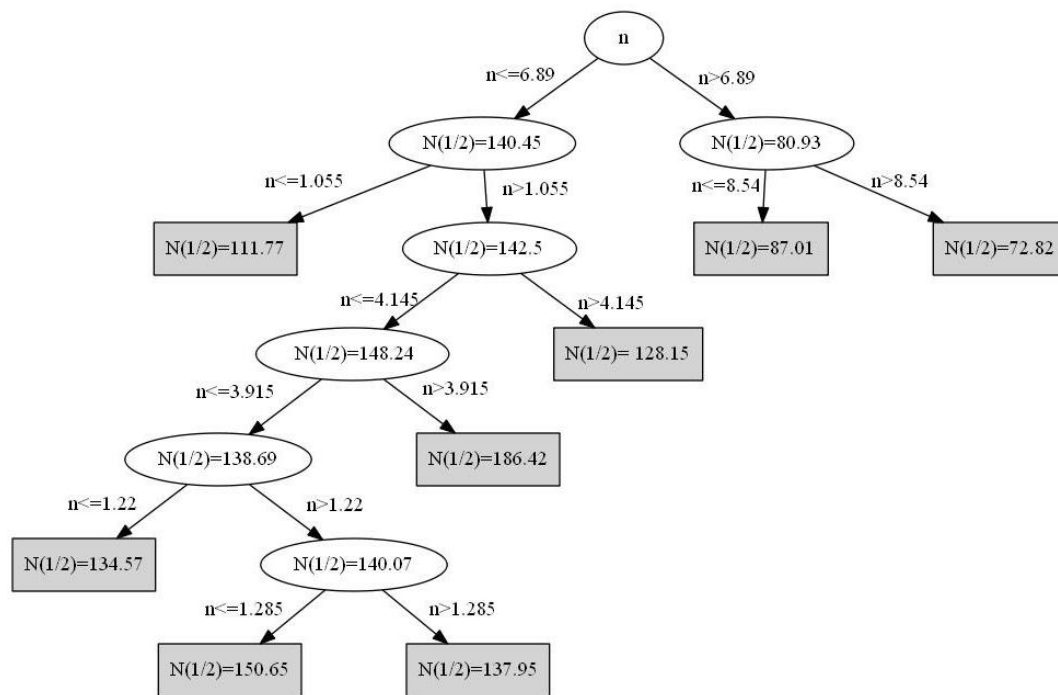
مجموعه قوانین استخراج شده به منظور پیش‌بینی ثابت تخریب:

بنابراین می‌توان به راحتی با در دست داشتن تخلخل سنگ پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌های ساختمانی را تخمین زد.

$n > 6.89:$
 $n > 8.54; \lambda = 0.0095$
 $n \leq 8.54; \lambda = 0.0081$
 $n \leq 6.89:$
 $n \leq 1.055; \lambda = 0.0062$
 $n > 1.055:$
 $n > 5.195; \lambda = 0.0057$
 $n \leq 5.195:$
 $n \leq 3.915; \lambda = 0.0048$
 $n > 3.915; \lambda = 0.0044$
 $n \leq 1.22; \lambda = 0.0051$
 $n > 1.22:$
 $n \leq 1.285; \lambda = 0.0046$
 $n > 1.285; \lambda = 0.0050$



شکل ۶. ساختار مدل درختی توسعه داده شده برای پیش‌بینی ثابت تخریب با استفاده از الگوریتم CART.



شکل ۷. ساختار مدل درختی توسعه داده شده برای پیش‌بینی شاخص نیمه عمر با استفاده از الگوریتم CART.

۵. دقت مدل‌های درختی

در این بخش دقت مدل‌های درختی توسعه داده شده در بخش‌های قبلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر برای سنگ‌های مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، هر دو مدل قادر هستند ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر را با خطای قابل قبولی تخمین بزنند. مشخص کردن ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی، شاخصی مناسب برای کنترل دقت هر مدل پیش‌بینی کننده است. شکل‌های ۸ و ۹ ارتباط بین مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر را همراه با ضریب تعیین نشان می‌دهند. مقادیر ضرایب تعیین برای هر دو مدل درختی نشان می‌دهد که مدل‌های توسعه داده شده توانایی پیش‌بینی قابل ملاحظه‌ای دارند. همچنین در مقایسه با روابط توسعه داده شده (روابط ۴ و ۵)، مدل‌های درختی از دقت بسیار بالاتر برخوردارند. به منظور بررسی دقیق‌تر و ارزیابی بهتر مدل‌ها، شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) و

واریانس خطا (VAF) برای دو مدل محاسبه شدند. این شاخص‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند (Bayram, 2012; Yurdakul and Akdas, 2013):

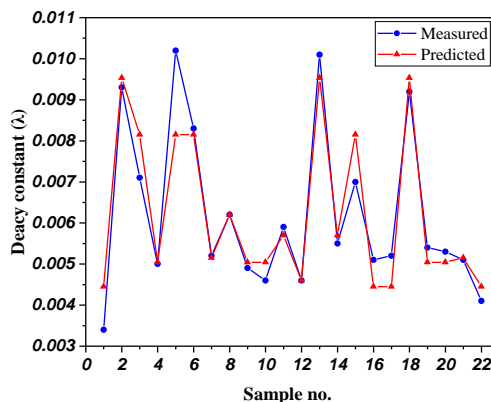
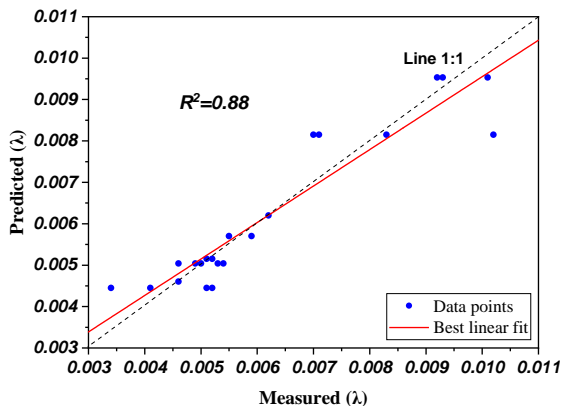
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}}{A_{avg}} \quad (6)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{var(A_i - P_i)}{var(A_i)} \right] \times 100 \quad (7)$$

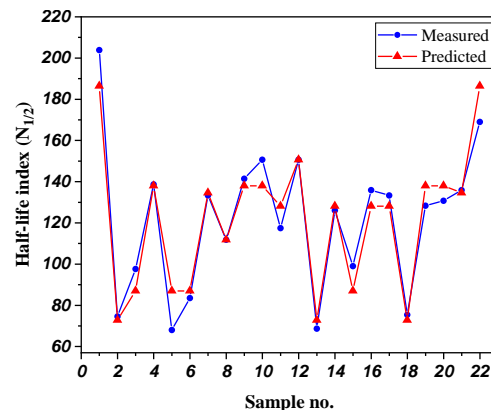
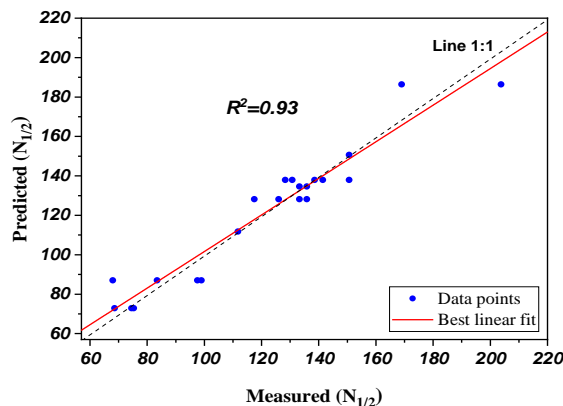
که در این روابط A_i و P_i به ترتیب برابر با مقدار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده پارامتر خروجی (ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر)، A_{avg} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده پارامتر خروجی و n تعداد نمونه‌ها می‌باشند که در این مطالعه برابر با ۲۲ است. از نظر تئوری هرچه مقدار NRMSE نزدیک به صفر و مقدار VAF به ۱۰۰ نزدیک باشد، مدل توسعه یافته ایده‌آل‌تر است. مقادیر محاسبه شده NRMSE و VAF برای دو مدل درختی توسعه داده شده در جدول ۶ ارائه شده‌اند. این مقادیر نشان می‌دهند که دو مدل درختی توسعه داده ابزار خوبی برای پیش‌بینی ثابت تخریب و شاخص نیمه

عمر می‌باشند و تخمین قابل اعتمادی از این پارامترها را ارائه

می‌دهند.



شکل ۸. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ثابت تخریب با استفاده از درخت رگرسیونی CART.



شکل ۹. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده شاخص نیمه عمر با استفاده از درخت رگرسیونی CART.

جدول ۵. مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر با استفاده از درخت رگرسیونی CART.

No.	Rock code	Decay constant (λ)			Half-life index ($N_{1/2}$)		
		Measured	Predicted by CART	Error (%)	Measured	Predicted by CART	Error (%)
1	T1	0.0043	0.0044	30.88	203.82	186.42	8.54
2	T2	0.0050	0.0050	0.80	138.60	137.95	0.47
3	T3	0.0059	0.0057	3.39	117.46	128.15	9.10
4	T4	0.0055	0.0057	3.64	126.00	128.15	1.71
5	T5	0.0051	0.0044	12.74	135.88	128.15	5.69
6	T6	0.0052	0.0044	14.42	133.27	128.15	3.84
7	T7	0.0041	0.0044	8.54	169.02	186.42	10.29
8	T8	0.0093	0.0095	2.50	74.52	72.82	2.28
9	T9	0.0071	0.0081	14.79	97.60	87.01	10.86
10	T10	0.0102	0.0081	20.10	97.94	87.01	28.07
11	T11	0.0083	0.0081	1.81	83.49	87.01	4.22
12	T12	0.0070	0.0081	1.63	99.00	87.01	12.11
13	L1	0.0049	0.0050	2.86	141.43	137.95	2.46
14	L2	0.0101	0.0095	5.61	68.61	72.82	6.14
15	L3	0.0092	0.0095	3.62	75.32	72.82	3.33
16	M1	0.0062	0.0062	0.00	111.77	111.77	0.00
17	M2	0.0052	0.0051	0.96	133.27	134.58	0.98
18	M3	0.0046	0.0050	9.56	150.65	137.95	8.43
19	M4	0.0046	0.0046	0.00	140.36	150.65	0.00
20	M5	0.0054	0.0050	6.67	128.33	137.95	7.50
21	M6	0.0053	0.0050	4.90	130.75	137.95	5.51
22	M7	0.0051	0.0051	0.98	135.88	134.57	0.96

جدول ۶. شاخص‌های آماری برای مدل‌های درختی ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر.

Model	NRMSE	VAF
Decay constant (λ) tree model	0.11	88.09
Half-life index ($N_{1/2}$) tree model	0.07	92.81

۶. بحث و نتیجه‌گیری

یکی از ویژگی‌های اثرگذار بر انتخاب سنگ‌های ساختمانی خصوصاً در مناطق سردسیر، دوام طولانی مدت آن‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد است. چرخه‌های ذوب و انجماد می‌تواند باعث از دست رفتن یکپارچگی سنگ و نهایتاً تخریب آن شوند. دو پارامتر اساسی در ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد، ثابت تخریب (λ) و شاخص نیمه عمر ($N_{1/2}$) می‌باشند که تعیین آنها مستلزم انجام آزمایش زمان‌بر و هزینه‌بر ذوب و انجماد است. هدف اصلی این مقاله توسعه مدل‌هایی بود که بتوان با استفاده از آنها مقادیر λ و $N_{1/2}$ را بدون انجام آزمایش ذوب و انجماد بر اساس ویژگی‌های اولیه سنگ پیش‌بینی کرد. برای این منظور مطالعات آزمایشگاهی وسیعی بر روی ۲۲ نوع سنگ ساختمانی کربناته شامل ۱۲ نوع تراورتن، ۳ نوع سنگ آهک و ۷ نوع سنگ مرمریت انجام شد و با بررسی تغییرات سرعت موج فشاری (V_p) طی فرآیند ذوب و انجماد، مقادیر λ و $N_{1/2}$ برای تمامی سنگ‌ها تعیین شدند. در نهایت بر اساس پایگاه داده حاصل شده و با استفاده از تکنیک‌های تحلیل رگرسیون و CART، روابط و مدل‌های درختی برای پیش‌بینی مقادیر λ و $N_{1/2}$ توسعه یافت. مهمترین نتایج بدست آمده از این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

۱- بررسی‌ها نشان داد که از میان سه ویژگی فیزیکی- مکانیکی اولیه سنگ‌ها یعنی تخلخل (n)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و سرعت موج فشاری (V_p)، تخلخل اثرگذارترین پارامتر بر تخریب ناشی از ذوب و انجماد بوده و به عنوان پارامتر ورودی برای توسعه مدل‌ها در نظر گرفته شد.

۲- نتایج نشان داد با افزایش تخلخل سنگ، ثابت تخریب افزایش (شاخص نیمه عمر کاهش) می‌یابد که این بیانگر آن است که سنگ‌های متخلخل سریع‌تر طی چرخه‌های ذوب و

انجماد تخریب می‌شوند. همانگونه که اشاره شد در این مقاله سه دسته سنگ ساختمانی کربناته شامل مرمریت‌ها، تراورتن‌ها و سنگ‌های آهک مورد بررسی قرار گرفتند که متوسط مقدار تخلخل برای آنها به ترتیب برابر با ۱/۲۳، ۶/۰۳ و ۷/۹۴ درصد بود. همانگونه که انتظار می‌رود، مرمریت‌ها با داشتن کمترین مقدار متوسط ثابت تخریب (۰/۰۰۵۰) و سنگ‌های آهک با داشتن بیشترین مقدار متوسط ثابت تخریب (۰/۰۰۸۱) به ترتیب مقاوم‌ترین و آسیب‌پذیرترین سنگ‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد می‌باشند. البته باید ذکر شود که با بررسی جزئی تمامی سنگ‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود که این روند گاهاً صادق نیست به طور مثال سنگ T1 (تراورتن بوکان) با وجود تخلخل بالاتر نسبت به سنگ‌های مرمریت، مقاوم‌ترین سنگ شناسایی شده و یا سنگ T10 (تراورتن دودی تکاب) با وجود تخلخل کمتر نسبت به سنگ‌های آهک L2 و L3، آسیب‌پذیرترین سنگ می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به شبکه، ساختار و ابعاد منافذ (خلل و فرج) موجود در سنگ نسبت داد. بررسی ریخت‌شناسی منافذ (شبکه، ساختار و ابعاد منافذ) بر تخریب سنگ موضوع بحث این مقاله نبوده و نیازمند مطالعات بیشتر در این زمینه است.

۳- مقایسه دقت مدل‌ها نشان داد که مدل‌های درختی توسعه داده شده با استفاده از تکنیک CART به مراتب دقت بالاتری نسبت به روابط رگرسیونی دارند. از این‌رو این مدل‌ها می‌توانند ابزاری مفید به منظور ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌های ساختمانی کربناته در طی چرخه‌های ذوب و انجماد باشند. مهمترین مزیت این مدل‌ها راحتی استفاده از آنهاست به گونه‌ای که تنها با در دست داشتن تخلخل سنگ می‌توان تخمین قابل قبولی از ثابت تخریب و شاخص نیمه عمر به دست آورد.

در آخر باید ذکر شود که یکی از محدودیت‌های تحقیق حاضر تعداد نسبتاً کم داده‌هایی است که برای توسعه مدل‌ها به کار گرفته شده است. واضح است که با افزایش تعداد داده‌ها، عملکرد مدل‌های پیش‌بینی کننده بهبود می‌یابد لذا می‌توان

با در نظر گرفتن تعداد نمونه‌های سنگی بیشتر و جمع‌آوری داده‌های بیشتر در آینده عملکرد مدل‌ها را بهبود بخشید و مدل‌های جامع‌تری توسعه داد.

منابع

- جمشیدی، ا.، نیکودل، م.ر.، خامه‌چیان، م.، ۱۳۹۵. تابع مدل‌های ریاضی برای ارزیابی دوام طولانی مدت و مقایسه تأثیر چرخه‌های یخبندان و تبلور نمک روی خصوصیات مکانیکی تراورتن طوسی آذرشهر؛ آذربایجان شرقی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۹، بهار ۹۵، ۹-۱.
- قبادی، م. ح.، بابازاده، ر.، اسفندیاری، ر.، ۱۳۹۳. پیش‌بینی دوام طولانی مدت ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی در مقابل پدیده ذوب-انجماد و هوازگی نمک با استفاده از مدل تابع تخریب، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد هفتم، شماره ۳ و ۴، پاییز و زمستان، ۷۰-۵۷.
- قبادی، م. ح.، طالب‌بیدختی، ع.، نیکودل، م.ر.، ۱۳۹۴. اثر فرآیند ذوب و انجماد بر روی شاخص دوام وارفتگی و مقاومت کششی برزیلی توف‌های سازند کرج، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد هشتم، شماره ۱ و ۲، بهار و تابستان، ۳۵-۵۰.
- Abdelhamid, MMA., Li, D., Ren, G., Zhang, C., 2020. Estimating deterioration rate of some carbonate rocks used as building materials under repeated frost damage process, China, Adv Mater Sci Eng, 2020:3826128.
- Akin, M., Özsan, A., 2011. Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests, Bull Eng Geol Environ, 70:101-114.
- ASTM C170., 2017. Standard test method for compressive strength of dimension stone, ASTM International.
- Bayram, F., 2012. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions, Cold Reg Sci Technol, 83-84:98-102.
- Chen, TC., Yeung, MR., Mori, N., 2004. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, Cold Reg. Sci. Technol, 38:127-136.
- Eslami, J., Walbert, C., Beaucour, A.L., Bourges, A., Noumowe, A., 2018. Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles, Constr Build Mater, 162:420-429.
- Fan, L., Xu, C., Wu, Z., 2020. Effects of cyclic freezing and thawing on the mechanical behavior of dried and saturated sandstone, Bull Eng Geol Environ, 79:755-765.
- Ghasemi, E., Bakhshandeh, H., Bagherpour, R., 2016. Assessment of backbreak due to blasting operation in open pit mines: a case study, Environ Earth Sci, 75:552.
- Hasanipanah, M., Faradonbeh, R.S., Amnieh, H.B., Armaghani, D., Monjezi, M., 2017. Forecasting blast-induced ground vibration developing a CART model, Eng Comput, 33:307-316.
- ISRM, 1978. Suggested Method for Determining Sound Velocity, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15:53-58.
- ISRM, 1979. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 16:143-151.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khomehchian, M., 2013. Predicting the long-term durability of building stones against freeze - thaw using a decay function model, Cold Reg Sci Technol, 92:29-36.
- Jamshidi, A., Reza, M., Khomehchian, M., 2016. Evaluation of the durability of Gerdoee travertine after freeze - thaw cycles in fresh water and sodium sulfate solution by decay function models, Eng Geol, 202:36-43.
- Kalmegh, S., 2015. Analysis of WEKA Data Mining Algorithm REPTree , Simple Cart and RandomTree for Classification of Indian News, Int J Innov Sci Eng Technol, 2:438-446.
- 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, Bull Eng Geol Environ, 1287-1300.

- Liping, W., Ning, L., Jilin, Q., Yanzhe, T., Shuanhai, X., 2019. A study on the physical index change and triaxial compression test of intact hard rock subjected to freeze-thaw cycles, *Cold Reg Sci Technol*, 160:39–47.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gomez-Heras, M., Marco-castaño, L., García-del-cura, M., 2013, Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes, *Constr Build Mater*, 38:443–454.
- Mutlutürk, M., Altindag, R., Türk, G., 2004 A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling, *Int J Rock Mech Min Sci*, 41:237–244.
- Özbek, A., 2014. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites, *Bull Eng Geol Environ*, 73:595–609.
- Park, J., Hyun, C.U., Park, H.D., 2015. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze–thaw action, *Bull Eng Geol Environ*, 74:555–565.
- Rutkowski, L., Jaworski, M., Pietruczuk, L., Duda, P., 2014. The CART Decision Tree for Mining Data Streams, *Inf Sci (Ny)*, 266:1–15.
- Salimi, A., Faradonbeh, R.S., Monjezi, M., Moormann, C., 2018. TBM performance estimation using a classification and regression tree (CART) technique, *Bull Eng Geol Environ*, 77:429–440.
- Takarli, M., Prince, W., Siddique, R., 2008. Damage in granite under heating / cooling cycles and water freeze – thaw condition, *Int J Rock Mech Min Sci*, 45:1164–1175.
- Tan, X., Chen Weizhong, W., Yang, J., Cao, J., 2011. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles, *Cold Reg Sci, Technol* 68:130–138.
- TSE 699 Methods of Testing for natural building stones, 1987. Institute of Turkish Standards, *Turk Standartları Enstitüsü (TSE)*. 82.
- Tuğrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey, *Eng Geol*, 75:215–227.
- Uğur, İ., Toklu, H.Ö., 2019. Effect of multi-cycle freeze-thaw tests on the physico-mechanical and thermal properties of some highly porous natural stones, *Bull Eng Geol Environ*, 1–13.
- Yavuz, H., 2011 Effect of freeze – thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone, *Bull Eng Geol Environ*, 70:187–192.
- 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, *Int J Rock Mech Min Sci*, 43:767–775.
- Yurdakul, M., Akdas, H., 2013. Modeling uniaxial compressive strength of building stones using non-destructive test results as neural networks input parameters, *Constr Build Mater*, 47:1010–1019.