

# مدل آماری برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌هایی از تراورتن‌ها در چرخه‌های یخبندان

امین جمشیدی<sup>۱</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۲</sup> و ماشاله خامه‌چیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۱۷

## چکیده

در مناطق سردسیر، چرخه‌های یخبندان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار روی ویژگی‌های مکانیکی و در نتیجه دوام سنگ‌ها هستند. مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P از ویژگی‌های مکانیکی مهم به کار برده شده در ارزیابی دوام سنگ‌ها در این مناطق هستند. از آنجایی که تعیین این ویژگی‌ها در طی آزمایش یخبندان بسیار وقت‌گیر و طاقت‌فرساست می‌توان از روابط آماری برای برآورد آنها استفاده کرد. در پژوهش حاضر یک مدل آماری چندمتغیره برای ۱۵ نمونه تراورتن معرفی شده است که می‌تواند مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P را در هر چرخه از آزمایش یخبندان برآورد کند. در این مدل ویژگی‌های مکانیکی پس از چرخه‌های یخبندان به عنوان متغیر وابسته و همان ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر، جذب آب و تعداد چرخه آزمایش یخبندان به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. نتایج آزمون‌های آماری و استفاده از داده‌های دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد که مدل ارائه شده دقت و درستی قابل قبولی در برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P در چرخه‌های یخبندان و در نتیجه دوام نمونه‌ها دارد.

**کلیدواژه‌ها:** چرخه‌های یخبندان، مدل آماری، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، سرعت موج P.

\*نویسنده مسئول: محمدرضا نیکودل

E-mail: Nikudelm@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

دوام سنگ‌ها در شرایط اقلیمی متغیر و شدید مانند مناطق با احتمال یخبندان یک عامل تعیین‌کننده برای پایداری سنگ‌های به کار برده شده در نمای بیرونی ساختمان‌هاست. تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P از ویژگی‌های مکانیکی مهم در ارزیابی دوام سنگ‌های استفاده شده در این مناطق است.

با توجه شرایط اقلیمی مناطق زیادی از ایران با احتمال یخبندان مانند اردبیل، تبریز، ارومیه و همدان می‌توان گفت چرخه‌های یخبندان از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های مکانیکی و در نتیجه دوام سنگ‌های استفاده شده در نمای بیرونی ساختمان‌ها هستند. برای نمونه شکل ۱ تأثیر یخبندان روی تراورتن سرخ آذرشهر در یکی از مناطق شهر تهران را نشان می‌دهد که سبب زوال‌پذیری و پوسته پوسته شدن و در نتیجه کاهش دوام آن شده است. بنابراین ضروری است پیش از انتخاب یک سنگ برای استفاده در نمای بیرونی ساختمان‌ها توجه ویژه‌ای به چرخه‌های یخبندان شود و سنگ‌هایی با مقاومت و دوام مناسب پیشنهاد شوند.

در مطالعات گذشته پژوهشگران به جنبه‌های مختلف یخبندان روی دامنه‌ای از سنگ‌ها با منشأهای متفاوت پرداخته‌اند (نیکودل و جمشیدی، ۱۳۸۸؛ Nicholson, 2001؛ Topal & Sozmen, 2000؛ Topal & Doyuran, 1998؛ Chen et al., 2004؛ Ruedrich & Siegesmund, 2007؛ Takarli et al., 2008؛ Karaca et al., 2010).

Topal & Sozmen (2000) تغییرات چگالی خشک، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج P نمونه‌هایی از توف‌ها را پس از چرخه‌های یخبندان بررسی کردند. Chen et al. (2004) تأثیر درجه اشباع (صفر تا ۹۵ درصد) روی زوال‌پذیری توف‌ها در چرخه‌های یخبندان را مطالعه کردند. این پژوهشگران نشان دادند هنگامی که درجه اشباع کمتر از ۶۰٪ است هیچ تغییری در ویژگی‌های مکانیکی این سنگ‌ها مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، سرعت موج P و تخلخل در اثر اعمال چرخه‌های یخبندان رخ نمی‌دهد ولی هنگامی که درجه اشباع به بالاتر از ۷۰٪ می‌رسد کاهش قابل توجهی در مقادیر این ویژگی‌ها رخ می‌دهد. Mutluturk et al. (2004) یک مدل ریاضی برای توصیف فرایند کاهش سختی

شور (shore hardness) برای سنگ‌های کربناتی هنگامی که در معرض چرخه‌های یخبندان و چرخه‌های گرمایی قرار می‌گیرند ارائه دادند. این پژوهشگران یک مدل ریاضی مرتبه اول را در ارتباط با کاهش سختی شور تحت چرخه‌های یخبندان و چرخه‌های حرارتی ارائه کردند که با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. نیکودل و جمشیدی (۱۳۸۸) ویژگی‌های مهندسی (مقاومت کششی برزیلی، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P) نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی (سنگ‌آهک، مرمر، گرانیت، ایگنمبریت، آمفیبولیت و ...) در چرخه‌های یخبندان را بررسی کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که با افزایش چرخه‌های آزمایش، مقادیر این ویژگی‌های کاهش پیدا کرده است. افزون بر این، نمونه‌هایی که تخلخل مؤثر بالاتر از ۱ درصد داشته‌اند کاهش بیشتری در مقاومت کششی برزیلی، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P آنها رخ داده است.

تاکنون جنبه‌های مختلف چرخه‌های یخبندان روی انواع سنگ‌ها بررسی شده است ولی مدل‌های آماری برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی هنوز ضعیف است و نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد (Altindag et al., 2004; Mutluturk et al., 2004; Tan et al., 2011; Bayram, 2012; Jamshidi et al., 2013).

در پژوهش حاضر، یک مدل آماری چندمتغیره بر پایه ویژگی‌های مکانیکی تراورتن‌ها در شرایط بکر (مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P)، جذب آب و شمار چرخه‌های یخبندان به عنوان متغیرهای مستقل و میزان کاهش همان ویژگی‌های مکانیکی در چرخه‌های یخبندان به عنوان متغیر وابسته معرفی شده است که در برآورد این ویژگی‌ها در هر چرخه از آزمایش یخبندان دارای دقت و درستی قابل قبولی است.

## ۲- مواد و روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، طی بازدید از معادن آذرشهر، محلات و فیروزکوه بلوک‌هایی با ابعاد تقریبی (۳۰×۴۰×۴۰ سانتیمتر) از ۱۵ نمونه تراورتن تهیه شد. نمونه‌ها از سینه‌کار معادن در حال فعالیت و در یک شعاع ۷۰ تا ۱۰۰ متری تهیه شدند. در طی نمونه‌برداری سعی شد بلوک‌هایی انتخاب شوند که از دید ماکروسکوپی

کدام از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P (۵ نمونه برای شرایط بکر و ۵ نمونه پس از آزمایش چرخه‌های یخبندان) بر پایه استاندارد (ISRM (1981) تهیه شد.

پیش از شروع آزمایش چرخه‌های یخبندان، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در استخر آب برای اشباع شدن قرار داده شدند و در بازه‌های زمانی ۱۲ ساعت با تکان دادن استخر آب به خروج حباب‌های هوا از نمونه‌ها کمک شد. در ادامه آزمایش تا ۶۰ چرخه انجام شد که هر چرخه از ۱۲ ساعت قرار دادن نمونه‌های اشباع در فریزر با دمای  $12 \pm 1$  - درجه سانتی‌گراد (مرحله یخ بستن آب) و به مدت ۱۲ ساعت در استخر آب با دمای  $12 \pm 1$  (مرحله ذوب شدن یخ) تشکیل شده است. شکل ۴ منحنی دمایی یک چرخه یخبندان را نشان می‌دهد. پس از پایان آزمایش یخبندان، مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P نمونه‌ها مطابق استاندارد (ISRM (1981) تعیین شد. در جدول ۴ نتایج تعیین ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها در شرایط بکر و پس از چرخه‌های یخبندان ارائه شده است.

### ۶- تجزیه و تحلیل نتایج

پژوهش‌های گذشته نشان داده که میزان کاهش در ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها در اثر اعمال چرخه‌های یخبندان به متغیرهای مختلفی مانند مقدار ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر و جذب آب بستگی دارد (جمشیدی و نیکودل، ۱۳۸۸؛ نیکودل و جمشیدی، ۱۳۸۸؛ Hale & Shakoore, 2003؛ Nicholson & Nicholson, 2000؛ Bayram, 2012؛ Chen et al., 2004؛ Tugrul, 2004). آبی که درون حفرات و ریز ترک‌های سنگ وجود دارد پس از انجماد حدود ۹ درصد افزایش حجم خواهد داشت که سبب اعمال فشار به حفرات و ریز ترک‌ها می‌شود (Bell, 2000). فشار حاصل از یخ با کاهش دما به سرعت افزایش می‌یابد؛ به طوری که در دمای  $22 -$  درجه سانتی‌گراد، فشاری در حدود ۲۰۰ مگاپاسکال در حفرات و ریز ترک‌های سنگ ایجاد می‌شود (Bell, 2004). بر پایه این تئوری (Matsuoka & Murton (2008 بیان کردند که این فشار برای ایجاد گسیختگی در سنگ به دلیل اینکه مقاومت کششی همه انواع سنگ‌ها کمتر از این مقدار است کافی است. در نتیجه می‌توان گفت تغییرات ویژگی‌های مکانیکی یک نمونه سنگ در چرخه‌های یخبندان به جذب آب و مقدار همان ویژگی‌ها در شرایط بکر بستگی دارد.

در این پژوهش، از تحلیل رگرسیون چندمتغیره برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها پس از چرخه‌های یخبندان استفاده شده است. در این تحلیل، ویژگی‌های مکانیکی پس از چرخه‌های یخبندان به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر و جذب آب به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. فرم کلی معادله حاضر به صورت زیر است:

$$M_N = \beta_0 + \beta_1 M_0 + \beta_2 W_a \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن  $M_N$  مقدار ویژگی برآورد شده پس از ۶۰ چرخه یخبندان (مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P)،  $M_0$  مقدار همان ویژگی در شرایط بکر،  $W_a$  میزان جذب آب نمونه‌ها،  $\beta_0$  یک ثابت و  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب رگرسیون هستند.

با استفاده از نرم افزار SPSS® v.16 code داده‌های حاصل از جدول‌های ۲ و ۴ تجزیه و تحلیل و مدل برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P ارائه شده است (جدول ۵).

همان‌گونه که در جدول ۵ دیده می‌شود در هر ۳ مدل مقدار ضریب تعیین بیشتر از ۰/۹۴ است که نشان‌دهنده همبستگی بالا میان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است. بیشترین و کمترین ضریب تعیین برای مدل‌های ارائه شده بر پایه سرعت موج P و مقاومت کششی برزیلی به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۹۴۳ و ۰/۹۸۹ است.

یکی از مهم‌ترین آزمون‌های آماری برای ارزیابی میزان برازش یک مدل، آزمون

تا جایی که ممکن است مشابه بلوک‌های دیگر بخش‌های معدن باشند. همچنین نمونه‌ها پیش از تهیه، از دید ماکروسکوپی به منظور نداشتن سطوح ناپوستگی عمده مانند درزه و سطوح هوازدگی بررسی شدند. سپس از بلوک‌های تهیه شده نمونه‌ها و مغزه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه شد. در جدول ۱ نام تجاری، زمین‌شناسی و محل نمونه‌برداری و در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی شماری از این معادن نشان داده شده است.

در ادامه ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی، تخلخل، جذب آب و ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P نمونه‌های مورد مطالعه تعیین شد. در پایان، آزمایش یخبندان تا ۶۰ چرخه انجام و ویژگی‌های مکانیکی یادشده پس از پایان آزمایش تعیین شد. بر پایه تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش‌های مختلف، یک مدل آماری چند متغیره برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P در هر چرخه یخبندان معرفی شده است.

### ۳- مطالعات کانی‌شناسی

ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها با تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی و تحلیل تجزیه شیمیایی (XRD) بررسی شد. تحلیل تجزیه شیمیایی به عنوان مکملی برای مقاطع نازک میکروسکوپی به منظور بررسی دقیق‌تر ترکیب کانی‌شناسی است. افزون بر این، یک سری کانی‌های ویژه مانند کانی‌های کلدِر که به وسیله مقاطع نازک میکروسکوپی نمی‌توان آنها را شناسایی کرد با تجزیه شیمیایی به آسانی قابل شناسایی و تشخیص هستند. شکل ۳ تصویری از مقاطع نازک میکروسکوپی و تجزیه شیمیایی برای تراورتن‌های گردویی، کرم عباس‌آباد و کرم فیروزکوه را نشان می‌دهد.

نتایج مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد کلسیت کانی اصلی سازنده تراورتن‌های مورد مطالعه است و در برخی نمونه‌ها مانند تراورتن گردویی، کرم عباس‌آباد، سفید عباس‌آباد، کرم آتشکوه، کرم دره‌بخاری و کرم فیروزکوه به همراه کلسیت، کانی کوارتز هم وجود دارد. در نمونه‌های سرخ دستجرد و سفید دستجرد، کلسیت و آراگونیت کانی‌های سازنده هستند.

### ۴- ویژگی‌های فیزیکی

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه شامل چگالی خشک و اشباع، تخلخل مؤثر و جذب آب از روش استاندارد (ISRM, 1981) استفاده شده است. نتایج میانگین مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که روی هر کدام از نمونه‌ها ۵ آزمایش انجام شد و نتایج ارائه شده در این جدول میانگین مقادیر این آزمایش‌ها هستند. بر پایه رده‌بندی (Anon (1979) برای چگالی خشک و تخلخل، تراورتن‌های انیکس در رده سنگ‌های با چگالی بالا ( $2/55 - 2/75 \text{ g/cm}^3$ ) و دیگر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با چگالی متوسط ( $2/2 - 2/55 \text{ g/cm}^3$ ) قرار می‌گیرند. بر پایه تخلخل، تراورتن‌های انیکس سبز دستجرد در رده سنگ‌های با تخلخل خیلی پایین ( $> 1\%$ ) و دیگر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با تخلخل پایین ( $1 - 5\%$ ) و متوسط ( $5 - 15\%$ ) قرار می‌گیرند.

### ۵- تغییرات دمایی اقلیم مناطق نمونه‌برداری و آزمایش چرخه‌های یخبندان

مناطق نمونه‌برداری در پژوهش حاضر (آذرشهر، محلات و فیروزکوه) از جمله مناطقی هستند که با توجه به اقلیم حاکم بر آنها، احتمال چرخه‌های یخبندان در فصل‌های سرد در آنها وجود دارد. در جدول ۳ اطلاعات مربوط به تغییرات دمایی اقلیم مناطق نمونه‌برداری ارائه شده است.

پیش از انجام آزمایش چرخه‌های یخبندان از هر تراورتن، ۱۰ نمونه برای هر

یخبندان،  $\beta_0$  یک ثابت و  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب رگرسیون است. با استفاده از مدل ارائه شده در معادله ۴ می‌توان مقدار ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها را در هر چرخه‌ای از آزمایش یخبندان برآورد کرد.

#### ۶-۲. درستی سنجی مدل ارائه شده با استفاده از داده‌های دیگر پژوهشگران

در این بخش از پژوهش به منظور درستی سنجی مدل پایانی ارائه شده در معادله ۴ از داده‌های آزمایش‌های مشابه دیگر پژوهشگران استفاده شده است. برای این هدف مقادیر ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر و جذب آب در مدل پایانی وارد می‌شوند و مقدار همان ویژگی‌های مکانیکی در چرخه مشخصی از یخبندان برآورد می‌شوند. سپس مقادیر برآورد شده از مدل با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده توسط پژوهشگران مقایسه و درستی و دقت مدل ارزیابی می‌شود.

با مطالعه پژوهش‌های گذشته، از داده‌های نیکودل و جمشیدی (۱۳۸۸)، (2006) Yavuz et al.، (2011) Akin & Ozsan، (2012) Cobanoglu & Celik و (2012) Bayram برای درستی سنجی مدل ارائه شده استفاده شد. در جدول ۶ مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P اندازه‌گیری شده توسط این پژوهشگران، مقادیر برآورد شده همین ویژگی‌ها از مدل ارائه شده در معادله ۴ و درصد خطا در برآورد هر یک از این ویژگی‌های ارائه شده است. درصد خطا (PE) از معادله ۵ به دست می‌آید:

$$PE(\%) = \left( \frac{E - A}{A} \right) \times 100 \quad \text{معادله ۵}$$

که در آن E مقدار ویژگی برآورد شده از معادله ۴ (مقاومت مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P) و A مقدار واقعی اندازه‌گیری شده همان ویژگی پس از آزمایش یخبندان است.

همان‌گونه که در جدول ۶ دیده می‌شود مدل ارائه شده توانایی برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P با میانگین خطای به ترتیب برابر ۱۰/۳، ۷/۴ و ۶ درصد را دارد. گفتنی است که میانگین خطای مقاومت کششی برزیلی بدون در نظر گرفتن دو نمونه‌ای که سبب ایجاد بی‌هنجاری شده‌اند (درصد خطای ۵۵/۲ و ۹۱) محاسبه شده است. به هر حال اگر این دو نمونه در محاسبه میانگین خطای مقاومت کششی برزیلی در نظر گرفته شوند مقدار خطا برابر با ۲۴/۴ درصد خواهد بود.

به منظور نمایش بهتر داده‌های جدول ۶، در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقادیر واقعی ویژگی‌های مکانیکی اندازه‌گیری شده از پژوهش‌های نیکودل و جمشیدی (۱۳۸۸)، (2006) Yavuz et al.، (2011) Akin & Ozsan، (2012) Cobanoglu & Celik در برابر مقادیر برآورد شده همین ویژگی‌ها با استفاده از مدل ارائه شده در معادله ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ دیده می‌شود برای مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P نقاط تقریباً در پیرامون خط قطری (۱:۱) توزیع شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده دقت و درستی مناسب مدل پایانی ارائه شده در این پژوهش برای برآورد این ویژگی‌ها پس از آزمایش یخبندان است. افزون بر این، ضرایب تعیین بالاتر از ۰/۹۵ میان مقادیر ویژگی‌های مکانیکی واقعی با مقادیر برآورد شده همان ویژگی‌های توسط مدل ارائه شده دلیلی دیگری بر درستی مدل در برآورد این ویژگی‌ها پس از هر چرخه‌ای از یخبندان است (شکل‌های ۸ تا ۱۰).

#### ۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک مدل آماری با استفاده از تحلیل رگرسیون چندمتغیره برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P در هر چرخه از آزمایش یخبندان ارائه شد. در این مدل ویژگی‌های مکانیکی پس از چرخه‌های یخبندان به عنوان متغیر وابسته و همان ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر، جذب آب و شمار چرخه آزمایش یخبندان به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده‌اند.

F فیشر است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا متغیرهای مستقل می‌توانند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهند یا خیر. اگر F به دست آمده از مدل بیشتر از F موجود در جدول باشد نشان‌دهنده کارایی و مناسب بودن مدل در برآورد متغیر وابسته است. F موجود در جدول برای درجه‌های آزادی مختلف متغیرها در کتاب‌های آماری محاسبه شده است (مهدوی و طاهرخانی، ۱۳۸۳). همان‌گونه که در جدول ۵ دیده می‌شود مقدار F به دست آمده از هر ۳ مدل به مراتب بزرگ‌تر از F موجود در جدول (با درجه آزادی ۲ در صورت و ۱۲ در مخرج) است. این موضوع نشان‌دهنده توانایی مناسب مدل‌های ارائه شده در برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P پس از ۶۰ چرخه آزمایش یخبندان برای نمونه‌های مورد مطالعه است.

هر چند ضرایب تعیین بالایی (بیشتر از ۰/۹۴) برای مدل‌های ارائه شده وجود دارد ولی باید گفت ضریب تعیین به تنهایی نمی‌تواند دلیلی بر برآورد دقیق ویژگی‌های مکانیکی باشد. بدین منظور برای بررسی این موضوع خط قطری (۱:۱) برای ویژگی‌های مکانیکی رسم شد. این خط از جانیامی مقادیر واقعی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در چرخه ۶۰ یخبندان در برابر مقادیر برآورد شده همین ویژگی‌ها از مدل‌های ارائه شده در جدول ۵ به دست می‌آید.

مقادیر واقعی ویژگی‌های مکانیکی و برآورد شده از مدل‌ها در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده‌اند. هر چه توزیع نقاط به خط قطری نزدیک‌تر باشند یا روی آن قرار گیرند نشان‌دهنده برآوردی دقیق‌تر از ویژگی‌های مکانیکی با استفاده از مدل‌های ارائه شده است.

همان‌گونه که از این شکل‌ها دیده می‌شود نقاط خیلی نزدیک به خط قطری هستند که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل‌ها برای برآورد دقیق ویژگی‌های مکانیکی در چرخه‌های یخبندان است.

#### ۶-۱. برآورد ویژگی‌های مکانیکی در هر چرخه‌ای از آزمایش یخبندان

۳ مدل ارائه شده در این پژوهش برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P در ۶۰ چرخه آزمایش یخبندان مناسب هستند. برای ارائه یک مدل آماری که بتواند هر یک از این ویژگی‌های را در هر چرخه‌ای از آزمایش یخبندان برآورد کند از ترکیب مدل‌های ارائه شده در این پژوهش و مدل‌نمایی ارائه شده توسط Mutluturk et al. (2004) استفاده شده است.

Mutluturk et al. (2004) یک مدل‌نمایی برای کاهش ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌هایی از سنگ‌ها در چرخه‌های یخبندان و گرمایی ارائه دادند که فرم کلی آن به صورت معادله زیر است:

$$M_N = M_0 e^{-\lambda N} \quad \text{معادله ۲}$$

که در آن N شمار چرخه آزمایش یخبندان،  $\lambda$  ثابت زوال‌پذیری و ویژگی مکانیکی،  $M_N$  ویژگی مکانیکی در چرخه Nم آزمایش یخبندان و  $M_0$  مقدار ویژگی مکانیکی در شرایط بکر است.

برای ۶۰ چرخه آزمایش یخبندان، مقدار  $M_N$  در معادله ۱ برابر با  $M_N$  در معادله ۲ است. در نتیجه با ترکیب کردن دو معادله یادشده و قرار دادن  $N=60$  مقدار  $\lambda$  برابر با معادله زیر خواهد بود:

$$\lambda = -0.01667 \ln \left( \frac{\beta_0 + \beta_1 M_0 + \beta_2 W_a}{M_0} \right) \quad \text{معادله ۳}$$

با قرار دادن سمت راست معادله ۳ به جای مقدار  $\lambda$  در معادله ۲، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$M_N = M_0 \left( \frac{\beta_0 + \beta_1 M_0 + \beta_2 W_a}{M_0} \right)^{0.01667 N} \quad \text{معادله ۴}$$

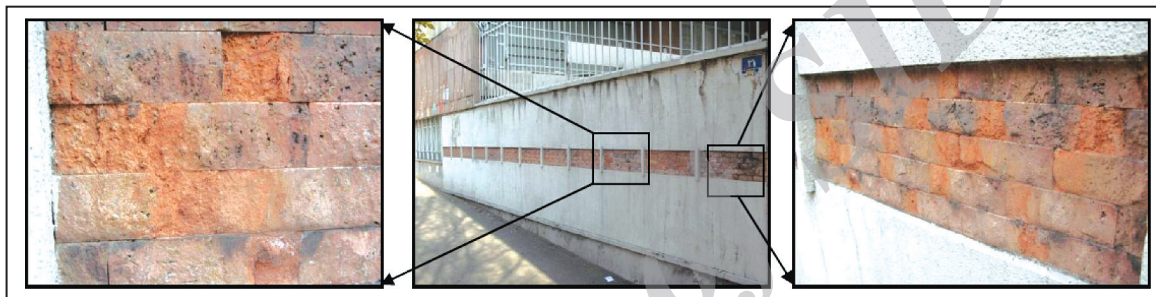
که در آن  $M_N$  مقدار ویژگی برآورد شده در هر چرخه از آزمایش یخبندان (مقاومت مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P)،  $M_0$  مقدار همان ویژگی در شرایط بکر،  $W_a$  میزان جذب آب نمونه‌ها، N شمار چرخه آزمایش

### سپاسگزاری

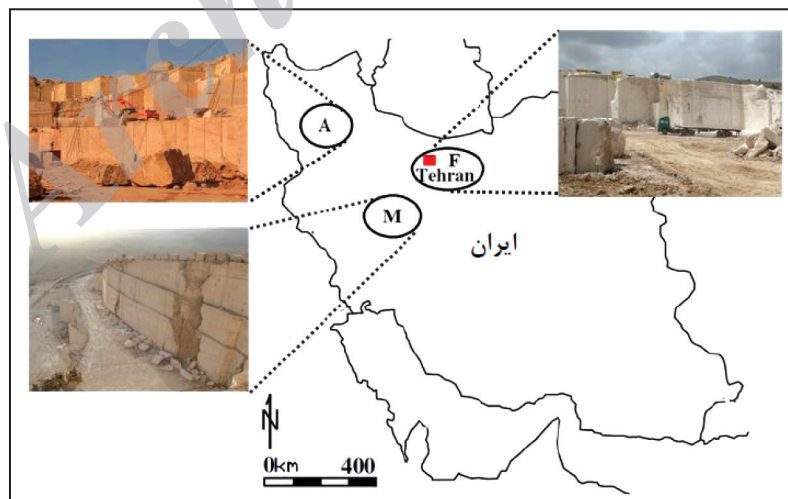
نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقایان احمد ذلولی برای همکاری در بازدیدهای صحرائی از معادن برای نمونه‌برداری و دکتر محسن رنجبران عضو هیئت علمی دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران برای مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی سپاسگزاری کنند. همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس برای حمایت مالی و از مدیریت و پرسنل معادن تراورتن‌های شهرستان‌های آذرشهر، محلات و فیروزکوه سپاسگزاری می‌شود.

با استفاده از آزمون‌های آماری و همچنین استفاده از مقادیر واقعی ویژگی‌های مشابه اندازه‌گیری از پژوهش‌های دیگر پژوهشگران در مدل ارائه شده، دقت و درستی این مدل مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده کارایی و دقت مناسب آن در برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P در چرخه‌های مختلف یخبندان است.

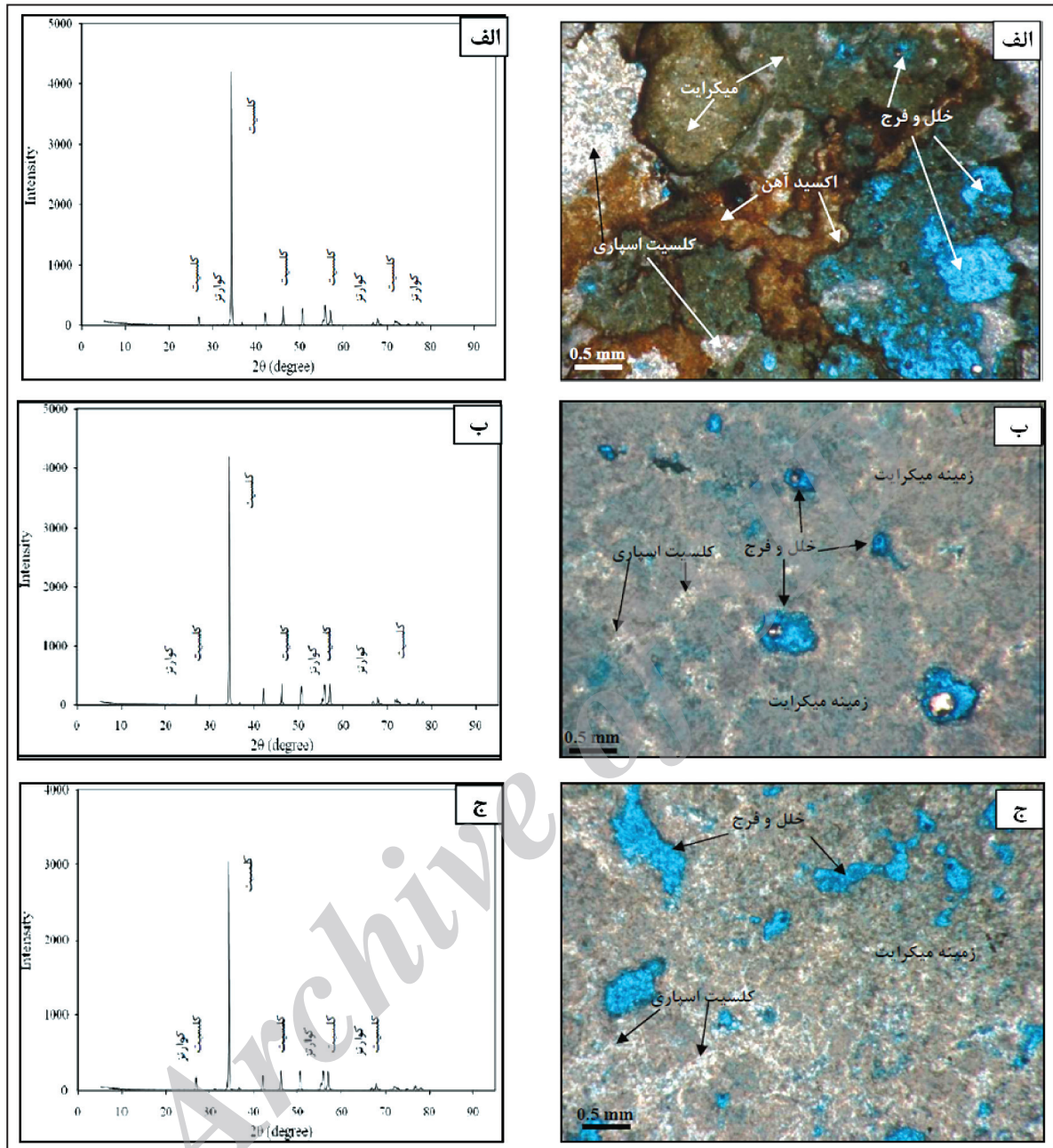
در پایان مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند برای برآورد این ویژگی‌های و همین‌طور دوام سنگ‌های مشابه در هر چرخه از آزمایش یخبندان مورد استفاده قرار گیرد که سبب کاهش هزینه و زمان برای انجام آزمایش یخبندان می‌شود.



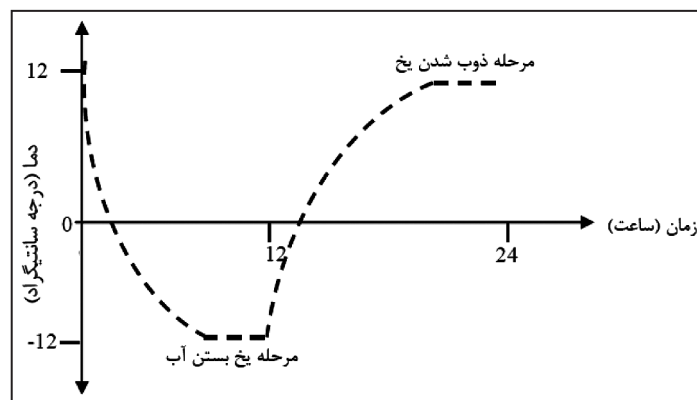
شکل ۱- تأثیر چرخه‌های یخبندان روی دوام و زوال‌پذیری تراورتن سرخ آذرشهر در یکی از مناطق شهر تهران.



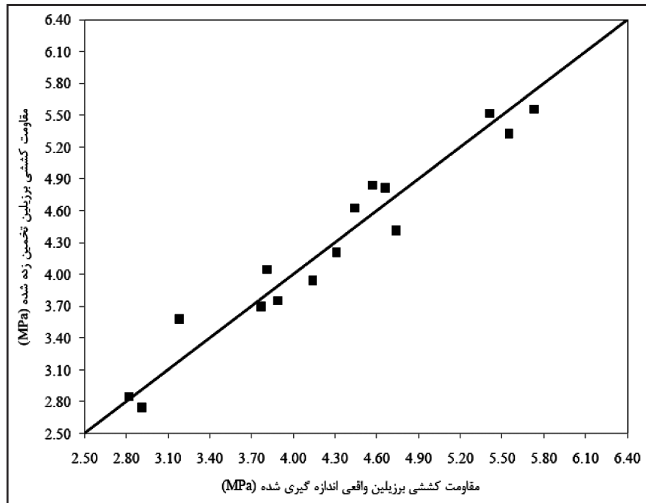
شکل ۲- موقعیت جغرافیایی معادن تهیه نمونه‌ها و تعدادی از معادن (A: نمونه‌های آذرشهر؛ M: نمونه‌های محلات؛ F: نمونه‌های فیروزکوه).



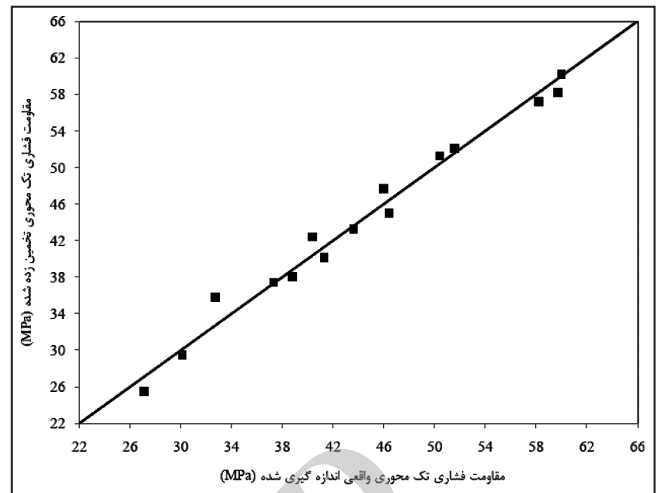
شکل ۳- تصویر مقطع نازک میکروسکوپی و تجزیه شیمیایی (XRD) شماری از نمونه‌ها. الف) تراورتن گردویی؛ ب) تراورتن کرم عباس آباد؛ ج) تراورتن کرم فیروزکوه.



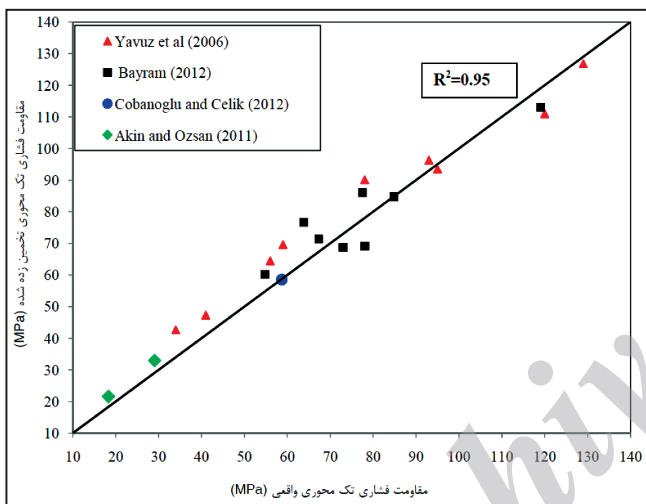
شکل ۴- منحنی دمایی یک چرخه یخبندان.



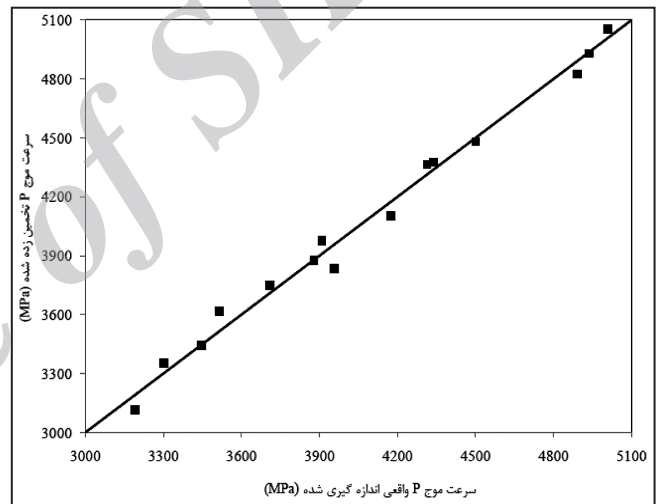
شکل ۶- مقادیر واقعی مقاومت کششی برزیلی در برابر مقادیر برآورد شده از مدل شماره ۲.



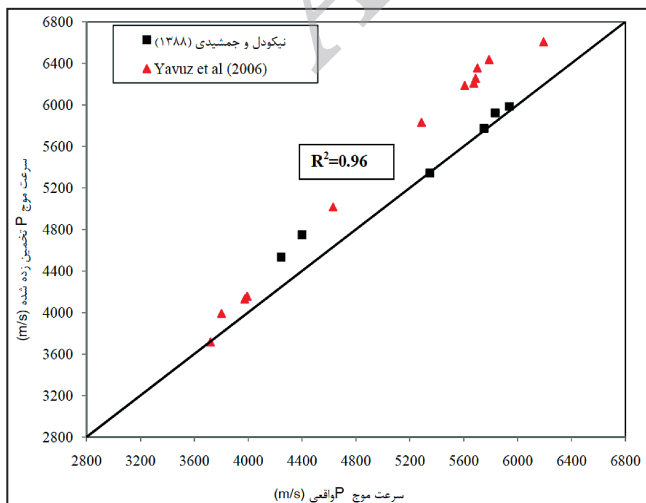
شکل ۵- مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک محوری در برابر مقادیر برآورد شده از مدل شماره ۱.



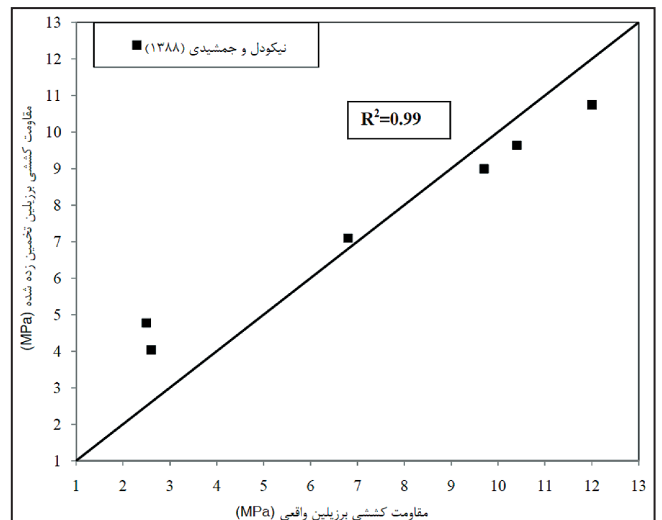
شکل ۸- مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک محوری در پژوهش Yavuz et al. (2006)، Akin & Ozsan (2011)، Bayram (2012) و Cobanoglu & Celik (2012) در برابر مقادیر برآورد شده آن از مدل ارائه شده در معادله ۴.



شکل ۷- مقادیر واقعی سرعت موج P در برابر مقادیر برآورد شده از مدل شماره ۳.



شکل ۱۰- مقادیر واقعی سرعت موج P در پژوهش Yavuz et al. (2006) و Nikoudol و Jamshidi (۱۳۸۸) در برابر مقادیر برآورد شده آن از مدل ارائه شده در معادله ۴.



شکل ۹- مقادیر واقعی مقاومت کششی برزیلی در پژوهش Nikoudol و Jamshidi (۱۳۸۸) در برابر مقادیر برآورد شده آن از مدل ارائه شده در معادله ۴.

جدول ۱- نام تجاری، زمین شناسی و محل نمونه برداری ها.

نام تجاری	نام زمین شناسی	محل نمونه برداری
تراورتن سرخ موج دار	تراورتن	آذرشهر
تراورتن گردویی	تراورتن	آذرشهر
تراورتن لیمویی	تراورتن	آذرشهر
تراورتن طوسی	تراورتن	آذرشهر
سرخ دستجرد	تراورتن انیکس	آذرشهر
سبز دستجرد	تراورتن انیکس	آذرشهر
سفید دستجرد	تراورتن انیکس	آذرشهر
سفید آتشکوه	تراورتن	محلات
کرم روشن عباس آباد	تراورتن	محلات
سفید عباس آباد	تراورتن	محلات
سفید آبیار	تراورتن	محلات
کرم دره بخاری	تراورتن	محلات
کرم آتشکوه	تراورتن	محلات
شکلانی فیروز کوه	تراورتن	فیروز کوه
کرم فیروز کوه	تراورتن	فیروز کوه

جدول ۲- نتایج آزمایش های تعیین ویژگی های فیزیکی نمونه ها.

نام تجاری	نام زمین شناسی	منطقه	چگالی خشک (g/cm <sup>3</sup> )	چگالی اشباع (g/cm <sup>3</sup> )	تخلخل مؤثر (%)	جذب آب (%)	درصد اشباع (%)
تراورتن سرخ موج دار	تراورتن	آذرشهر	۲/۴۸	۲/۵۵	۷/۴۱	۲/۹۹	۹۵
تراورتن گردویی	تراورتن	آذرشهر	۲/۵۵	۲/۵۸	۳/۱۰	۱/۲۱	۸۶
تراورتن لیمویی	تراورتن	آذرشهر	۲/۵۱	۲/۵۵	۴/۶۵	۱/۸۵	۹۰
تراورتن طوسی	تراورتن	آذرشهر	۲/۴۶	۲/۴۹	۳/۱۷	۱/۴۳	۸۴
سرخ دستجرد	تراورتن انیکس	آذرشهر	۲/۶۶	۲/۶۷	۱/۷۷	۰/۶۷	۹۵
سبز دستجرد	تراورتن انیکس	آذرشهر	۲/۶۹	۲/۷۰	۰/۵۴	۰/۲۰	۸۵
سفید دستجرد	تراورتن انیکس	آذرشهر	۲/۷۲	۲/۷۳	۱/۳۹	۰/۵۰	۹۲
سفید آتشکوه	تراورتن	محلات	۲/۴۷	۲/۵۲	۴/۲۰	۱/۷۰	۸۸
کرم روشن عباس آباد	تراورتن	محلات	۲/۴۳	۲/۴۸	۴/۸۶	۲/۰۰	۹۶
سفید عباس آباد	تراورتن	محلات	۲/۴۲	۲/۴۶	۴/۵۳	۱/۸۷	۹۰
سفید آبیار	تراورتن	محلات	۲/۴۱	۲/۴۵	۳/۵۸	۱/۴۷	۹۲
کرم دره بخاری	تراورتن	محلات	۲/۳۸	۲/۴۴	۶/۴۰	۲/۶۹	۹۲
کرم آتشکوه	تراورتن	محلات	۲/۴۶	۲/۵۰	۴/۲۰	۱/۷۲	۸۸
شکلانی فیروز کوه	تراورتن	فیروز کوه	۲/۳۸	۲/۴۱	۳/۰۰	۱/۲۷	۸۹
کرم فیروز کوه	تراورتن	فیروز کوه	۲/۳۴	۲/۴۰	۴/۱۰	۱/۷۰	۸۷

جدول ۳- تغییرات دمایی اقلیم مناطق نمونه برداری (سازمان هواشناسی کشور).

متنطقه نمونه برداری	امپاتگین کمترین دمای روزانه (درجه سانتی گراد)	امپاتگین بیشترین دمای روزانه (درجه سانتی گراد)	تعداد روزهای سال با کمترین دمای صفر درجه سانتی گراد یا کمتر از آن	تعداد روزهای سال با کمترین دمای ۴- درجه سانتی گراد یا کمتر از آن
آذرشهر	-۲/۴	۴/۷	۸۳	۴۵
محلات	-۲/۳	۹/۰	۸۷	۴۲
فیروزکوه	-۸/۳	۵/۰	۱۵۷	۹۹

<sup>۱</sup> مربوط به ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند.

جدول ۴- نتایج تعیین ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها در شرایط بکر و پس از چرخه‌های یخبندان.

نام تجاری	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)		مقاومت کششی برزیلی (MPa)		سرعت موج P (m/s)	
	شرایط بکر	پس از چرخه‌های یخبندان	شرایط بکر	پس از چرخه‌های یخبندان	شرایط بکر	پس از چرخه‌های یخبندان
تراورتن سرخ موج دار	۳۳/۶	۲۷/۱	۳/۸۹	۲/۹۱	۳۹۵۰	۳۱۹۰
تراورتن گردویی	۶۰/۷	۵۱/۶	۵/۸۷	۴/۵۷	۴۹۰۱	۴۳۱۳
تراورتن لیمویی	۴۲/۵	۳۷/۳	۴/۴۷	۳/۸۹	۴۲۹۰	۳۵۱۵
تراورتن طوسی	۵۵/۵	۴۶/۰	۵/۷۱	۴/۴۴	۴۹۳۰	۴۳۳۸
سرخ دستجرد	۶۵/۷	۵۹/۷	۶/۱۷	۵/۵۵	۵۲۶۰	۴۸۹۲
سبز دستجرد	۶۴/۵	۶۰/۰	۵/۹۵	۵/۴۱	۵۳۱۰	۴۹۳۸
سفید دستجرد	۶۲/۴	۵۸/۲	۶/۴۲	۵/۷۳	۵۴۵۰	۵۰۱۰
سفید آتشکوه	۴۹/۳	۴۰/۴	۴/۸۸	۳/۸۱	۴۶۰۰	۳۹۱۰
کرم روشن عباس آباد	۴۱/۳	۳۲/۷	۴/۳۲	۳/۱۸	۴۱۵۰	۳۴۴۵
سفید عباس آباد	۴۳/۷	۳۸/۸	۴/۳۹	۳/۷۷	۴۴۱۰	۳۷۰۹
سفید آبیار	۵۱/۴	۴۶/۴	۵/۳۳	۴/۷۴	۴۶۹۰	۴۱۷۴
کرم دره بخاری	۳۷/۴	۳۰/۱	۳/۷۱	۲/۸۲	۴۱۳۵	۳۳۰۰
کرم آتشکوه	۴۵/۷	۴۱/۳	۴/۶۹	۴/۱۴	۴۵۱۰	۳۸۷۹
شکلاتی فیروزکوه	۵۹/۹	۵۰/۴	۵/۹۰	۴/۶۶	۵۰۱۰	۴۵۰۰
کرم فیروزکوه	۵۰/۷	۳۶/۶	۵/۲۱	۴/۳۱	۴۴۷۰	۳۹۵۶

جدول ۵- نتایج تحلیل‌های رگرسیون و مدل‌های ارائه شده برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها.

شماره مدل	ویژگی مکانیکی	متغیرهای برآورد کننده	ضریب	F حاصل از جدول	F حاصل از مدل	ضریب تعیین (R <sup>2</sup> )
۱	UCS <sub>N</sub> (MPa)	عدد ثابت (β <sub>0</sub> )	۲۲/۴۴۶	۳/۸۹	۳۱۸/۱	۰/۹۸۱
		UCS <sub>0</sub> (MPa)	۰/۶۰۳			
		W <sub>a</sub> (%)	-۵/۷۴۶			
۲	BTS <sub>N</sub> (MPa)	عدد ثابت (β <sub>0</sub> )	۲/۷۲۱	۳/۸۹	۹۸/۷	۰/۹۴۳
		BTS <sub>0</sub> (MPa)	۰/۴۹۱			
		W <sub>a</sub> (%)	-۰/۶۳۰			
۳	Vp <sub>N</sub> (m/s)	عدد ثابت (β <sub>0</sub> )	-۹۶۲/۹۷۲	۳/۸۹	۵۱۸/۹	۰/۹۸۹
		Vp <sub>0</sub> (m/s)	۱/۱۱۴			
		W <sub>a</sub> (%)	-۱۰۷/۷۸۹			

 جذب آب: W<sub>a</sub>; سرعت موج P: Vp; مقاومت کششی برزیلی: BTS; مقاومت فشاری تک محوری: UCS.



جدول ۶- درستی سنجی مدل ارائه شده در معادله ۴ برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی پس از آزمایش یخبندان با استفاده از داده‌های دیگر پژوهشگران.

سرعت موج P (m/s)			مقاومت کششی برزیلی (MPa)			مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)			منبع و نوع سنگ
درصد خطا	برآورد شده	واقعی	درصد خطا	برآورد شده	واقعی	درصد خطا	برآورد شده	واقعی	
۱۰/۳	۶۱۸۷	۵۶۰۷	-----	-----	-----	۳/۵	۹۶/۲۲	۹۳	Yavuz et al. (2006) (تراورتن، سنگ آهک و مرمر) (برای ۲۰ چرخه آزمایش یخبندان)
۳/۹	۴۱۲۹	۳۹۷۵	-----	-----	-----	۱۸	۶۹/۶۱	۵۹	
۱۱/۵	۶۳۵۶	۵۷۰۲	-----	-----	-----	۱۵/۱	۶۴/۴۸	۵۶	
۸/۴	۵۰۱۷	۴۶۳۰	-----	-----	-----	۱/۶	۹۳/۴۴	۹۵	
۱۰/۳	۵۸۳۰	۵۲۸۶	-----	-----	-----	۱/۷	۱۲۶/۷۷	۱۲۹	
۹/۴	۶۲۰۸	۵۶۷۵	-----	-----	-----	۲۵/۴	۴۲/۶۲	۳۴	
۱۰	۶۲۵۵	۵۶۸۸	-----	-----	-----	۱۵/۳	۴۷/۲۸	۴۱	
۵	۳۹۹۱	۳۸۰۲	-----	-----	-----	۱۵/۵	۹۰/۱۲	۷۸	
۴/۱	۴۱۵۶	۳۹۹۲	-----	-----	-----	۷/۶	۱۱۰/۸۹	۱۲۰	
۰/۱۳	۳۷۱۵	۳۷۲۰	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
۱۱/۲	۶۴۳۵	۵۷۸۸	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
۶/۷	۶۶۰۶	۶۱۹۳	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
۰/۰۹	۵۳۴۳	۵۳۴۸	۷/۳	۹/۶	۱۰/۴	-----	-----	-----	Nikoudl & Jamshidi (1388) (تراورتن و سنگ آهک) (برای ۳۰ چرخه آزمایش یخبندان)
۰/۴	۵۷۷۵	۵۷۵۲	۴/۴	۷/۱	۶/۸	-----	-----	-----	
۰/۷۹	۵۹۸۶	۵۹۳۹	۷/۳	۹	۹/۷	-----	-----	-----	
۱/۵	۵۹۲۲	۵۸۳۴	۱۰/۵	۱۰/۷	۱۲/۰	-----	-----	-----	
۶/۸	۴۵۳۴	۴۲۴۵	۹۱	۴/۸	۲/۵	-----	-----	-----	
۷/۹	۴۷۴۶	۴۴۰۰	۵۵/۲	۴	۲/۶	-----	-----	-----	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۱۳/۶	۳۲/۹۹	۲۹/۰۴	Akin & Ozsan (2011) (تراورتن) (برای ۵۰ چرخه یخبندان)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۱۸/۱	۲۱/۶	۱۸/۲۹	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۱۱	۸۶/۰۲	۷۷/۵۲	Bayram (2012) (تراورتن و سنگ آهک) (برای ۲۵ چرخه آزمایش یخبندان)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۱۱/۴	۶۹/۰۹	۷۸	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۵/۱	۱۱۲/۹۹	۱۱۹	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۲۰/۱	۷۶/۶۱	۶۳/۸۱	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۱۰	۶۰/۲۵	۵۴/۷۷	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۶	۷۱/۳۶	۶۷/۳۱	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۵/۹	۶۸/۶۷	۷۳	Cobanoglu & Celik (2012) (تراورتن) (برای ۳۰ چرخه آزمایش یخبندان)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۰/۰۸	۸۴/۷۶	۸۴/۸۳	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	۰/۲	۵۸/۵۴	۵۸/۶۸	-----
۶	-----	-----	۷/۴*	-----	-----	۱۰/۳	-----	-----	میانگین درصد خطا

\* میانگین درصد خطا با حذف ۲ نمونه‌ای که دارای درصد خطای ۵۵/۲ و ۹۱ هستند.

## کتابنگاری

جمشیدی، ا. و نیکودل، م.ر.، ۱۳۸۸- تأثیر تخلخل مؤثر بر تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در چرخه‌های انجماد و ذوب آب. مجموعه مقالات بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

مهدوی، م. و طاهرخانی، م.، ۱۳۸۳- کاربرد آمار در جغرافیا. چاپ اول، ۴۲۰ صفحه، نشر قومس، تهران.

نیکودل، م.ر. و جمشیدی، ا.، ۱۳۸۸- بررسی ویژگی‌های مهندسی نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در چرخه‌های انجماد و ذوب آب. مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و پنجم، شماره ۴، صفحه ۴۳ تا ۵۲.

## References

- Akin, M. & Ozsan, A., 2011- Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. Bulletin Engineering Geology Environmental, 70, 101-114.
- Altindag, R., Alyildiz, I. S. & Onargan, T., 2004- Mechanical properties degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 1023-1028.

- Anon., 1979- Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. part 1: Rock and soil materials. Bulletin International Association Engineering Geology, 19,355–371.
- Bayram, F., 2012- Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions. Cold Regions Science and Technology, 83-84,98-102 .
- Bell, F. G., 2000 - Engineering Properties of Soils and Rocks. Blackwell Science. 482 p.
- Bell, F. G., 2004- Engineering Geology and Construction. Spon Press. 797 p.
- 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 ,127-136 .
- Çobanoğlu, I. & Çelik, S. B., 2012- Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey). Engineering Geology, 129-130, 38–47.
- Hale, P. A. & Shakoor, A., 2003- A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. Environmental and Engineering Geosciences, 9, 117-130.
- ISRM., 1981- Rock characterization, Testing and Monitoring. In: Brown ET. editor. ISRM suggested methods. Oxford, Pergamon Press., 211p.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R. & Khomehchiyan, M., 2013- Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model. Cold Regions Science and Technology, 92, 29-36.
- 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, 47, 1207-1211.
- Matsuoka, N. & Murton, J., 2008- Frost Weathering: Recent Advances and Future Directions. Permafrost and Periglacial Processes, 19, 195-210.
- Mutluturk, M., Altidag, R. & Turk, 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, 237-244.
- Nicholson, D. T. & Nicholson, F. H., 2000- Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze–thaw weathering. Earth Surface Landforms, 25, 1295–307.
- Nicholson, D., 2001- Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestone. Earth Surface Processes and Landforms, 26, 819–838.
- Ruedrich, J. & Siegesmund, S., 2007- Salt and ice crystallization in porous sandstones. Environmental Geology, 52, 225-249.
- 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, 1164-1175.
- Tan, X., Chen, W., Tian, H. & Cao, J., 2011- Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. Cold Regions Science and Technology,68 ,130-138 .
- Topal, T. & Doyuran, V., 1998- Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. Environmental Geology, 34(1), 5-20.
- Topal, T. & Sözmen, B., 2000- Freeze-thaw resistance of the Yazılıkaya tuffs. Proceeding of the 9th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Venice, Italy, Elsevier, Vol.1, 275-281.
- Tugrul, A., 2004 -The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. Engineering Geology, 75, 215–27.
- 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, 767-775.