

# تابع مدل های ریاضی برای ارزیابی دوام طولانی مدت و مقایسه تاثیر چرخه های یخبندان و تبلور نمک روی خصوصیات مکانیکی تراورتن طوسی آذرشهر، آذربایجان شرقی

امین جمشیدی

استادیار زمین شناسی مهندسی، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

محمد رضا نیکودل

دانشیار زمین شناسی مهندسی، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

ماشالله خامه چیان

استاد زمین شناسی مهندسی، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۲۷

jamshidi.geo85@yahoo.com

## چکیده

در تحقیق حاضر، دو تابع مدل ریاضی نمایی و خطی بر اساس تغییرات خصوصیات مکانیکی تراورتن طوسی آذرشهر در چرخه های یخبندان و تبلور نمک ارائه شده است. از این توابع، پارامترهای ثابت زوال پذیری و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی تعیین شده است که در ارزیابی دوام طولانی مدت و مقایسه تاثیر چرخه های یخبندان و تبلور نمک مفید و کارآمد می باشند. برای رسیدن به این اهداف، تراورتن طوسی از معادن آذرشهر تهیه و آزمایش های یخبندان و تبلور نمک تا ۶۰ چرخه انجام شد. بعد از هر ۱۰ چرخه یخبندان و ۵ چرخه تبلور نمک خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوری، کششی برزیلین، بار نقطه ای و سرعت موج P اندازه گیری شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می دهد پارامترهای ثابت زوال پذیری و نیمه عمر که از تابع مدل های نمایی و خطی تعیین می شوند دارای دقت مناسب برای ارزیابی دوام و مقایسه تاثیر چرخه های یخبندان و تبلور نمک هستند. در نهایت با استفاده از این پارامترها می توان از انجام آزمایش های زمانبر، طاقت فرسا و هزینه بر چرخه های یخبندان و تبلور نمک که نیاز به تهیه تعداد زیادی نمونه دارد صرف نظر کرد.

**کلمات کلیدی:** یخبندان، تبلور نمک، مدل نمایی و خطی، ثابت زوال پذیری، نیمه عمر

## مقدمه

تراورتن سنگ آهکی است که در اثر فعالیت چشمه های آب گرم تشکیل می شود. بطور کلی در طی فرآیند تشکیل ذخایر تراورتن، آب های گرم از بین طبقات سنگ های کربناتی به ویژه سنگ آهک عبور می کنند و به دلیل اسیدی بودن، کربنات کلسیم موجود در این سنگ ها را حل کرده و به صورت محلول کربناتی و بی کربناتی با خود به سطح زمین منتقل می کنند. امروزه تراورتن ها به دلیل شرایط استخراج ساده، مقاومت قابل قبول، زیبایی ظاهری و قیمت مناسب دارای کاربرد فراوانی در نمای بیرونی ساختمان ها هستند.

با توجه به شرایط اقلیمی متنوع ایران شامل مناطق با احتمال یخبندان مانند اردبیل، همدان، تبریز و مناطق گرم و خشک مانند سمنان، یزد و قم با احتمال حضور نمک های متبلور، می توان گفت چرخه های یخبندان و تبلور نمک از مهمترین عوامل تاثیر گذار روی خصوصیات مکانیکی و نتیجه دوام طولانی مدت سنگ های استفاده شده در نمای بیرونی ساختمان ها در این مناطق هستند. در نتیجه ضروری است قبل از انتخاب یک سنگ برای استفاده در نمای بیرونی ساختمان ها توجه ویژه ای به چرخه های یخبندان و تبلور نمک شود و سنگ هایی با مقاومت و دوام مناسب پیشنهاد شوند.

تاکنون تعدادی از محققین به جنبه های مختلف یخبندان (Topal and Doyuran, 1998; Topal and Sozmen, 2000; Nicholson, 2001; Chen et al., 2004; Yavuz, 2006; Ruedrich and Siegesmund, 2007; Takarli et al., 2008; Karaca et al., 2010; Akin and Ozsan, 2011; Yavuz, 2012; Jamshidi et al., 2013a; Martinez et al., 2013) و تبلور نمک (ذلولی

و همکاران، ۱۳۹۳; Rodriguez-Navarro et al., 2000; Benavente et al., 2001; Tsui et al., 2003; Cardell et al., 2003; Benavente et al., 2004; Yavuz, 2006; Ulusoy, 2007; Zedef et al., 2007; Benavante et al., 2007a, b; Yavuz and Topal, 2007; Angeli et al., 2007; Molina et al., 2011; Cultrone et al., 2012; Yavuz 2012; Jamshidi et al., 2013b) روی انواع مختلف سنگ ها پرداخته اند. به هر حال استفاده از روش های عددی و پارامترهای مناسب به منظور ارزیابی تغییرات خصوصیات مکانیکی و نتیجه دوام طولانی مدت و همچنین مقایسه تاثیر چرخه های یخبندان و تبلور نمک در تحقیقات گذشته خیلی کم صورت گرفته است (Altindag et al., 2004; Angeli et al., 2007; Akin and Ozsan, 2011; Bayram, 2012). در نتیجه ضروری است این موضوع در تحقیقات آینده بررسی شود که بتوان ارزیابی دقیق تر و مناسبتری از دوام طولانی مدت سنگ ها برای کاربرد در مناطق با احتمال چرخه های یخبندان و تبلور نمک داشت.

در تحقیق حاضر دو تابع مدل نمایی و خطی در ارتباط با تغییرات خصوصیات مکانیکی یک نمونه تراورتن در چرخه های یخبندان و تبلور نمک ارائه شده است. سپس از توابع نمایی و خطی ارائه شده، پارامترهای ثابت زوال پذیری و نیمه عمر برای رسیدن به اهداف زیر تعیین شده اند:

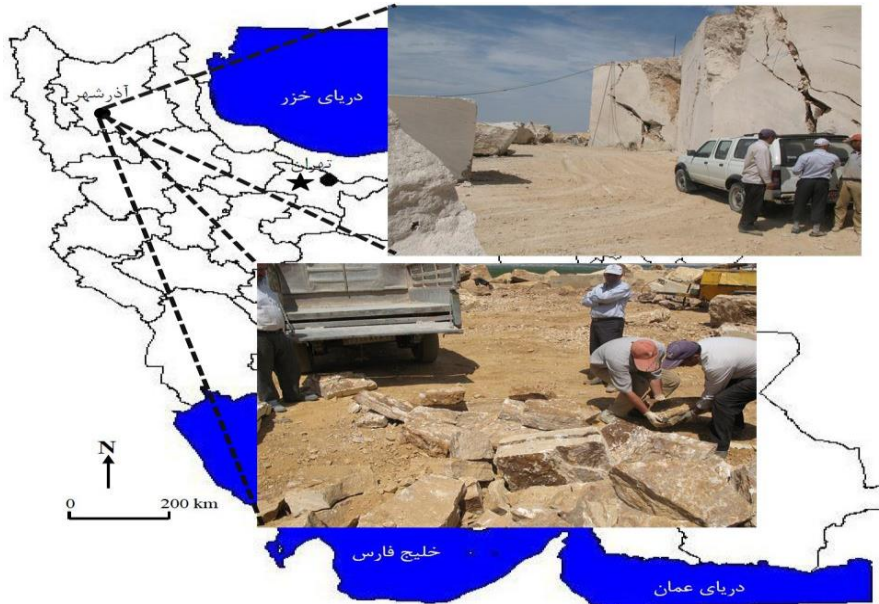
(۱) ارزیابی تغییرات خصوصیات مکانیکی و نتیجه دوام طولانی مدت نمونه مورد مطالعه

(۲) مقایسه تاثیر چرخه های یخبندان و تبلور نمک روی نمونه مورد مطالعه

### مواد و روش پژوهش

معادن تراورتن آذرشهر در استان آذربایجان شرقی سهم عمده‌ای در صنعت سنگ نمای ایران دارند. همچنین تراورتن‌های این معادن به دلیل زیبایی خاص و تنوع رنگی زیاد به خارج از کشور نیز صادر می‌شوند. به این منظور تراورتن طوسی که یکی از پرکاربردترین سنگ‌های استفاده شده در نمای بیرونی ساختمان‌ها است از معادن آذرشهر تهیه شد. برای این منظور طی بازدید از معادن آذرشهر واقع در ۵ کیلومتری جنوب باختری آذرشهر با موقعیت جغرافیایی ۱۱۸ ۷۲ ۴۱ - ۰۸۶ ۷۵ ۰۵، بلوک‌هایی تهیه شد و از آن‌ها نمونه‌ها

و مغزه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه گردید. شکل (۱) معدن تراورتن طوسی و تعدادی از بلوک‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. در ادامه خصوصیات پتروگرافی، شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی نمونه مورد مطالعه بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) تعیین شدند. در پایان، آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک تا ۶۰ چرخه انجام شد و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P بعد از ۱۰ چرخه یخبندان و ۵ چرخه تبلور نمک تعیین شد. در ادامه با توجه به داده‌های بدست آمده از انجام آزمایش‌ها، نتایج تجزیه و تحلیل شده است.

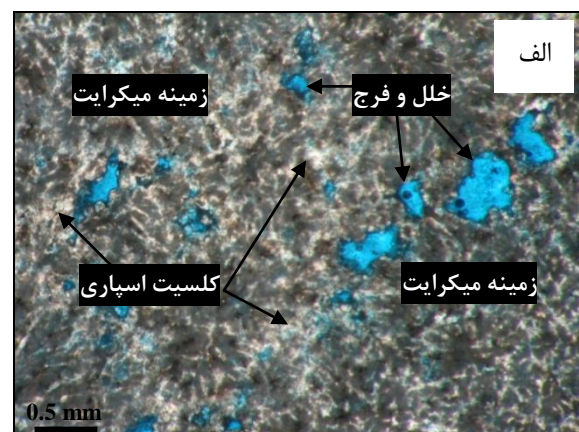
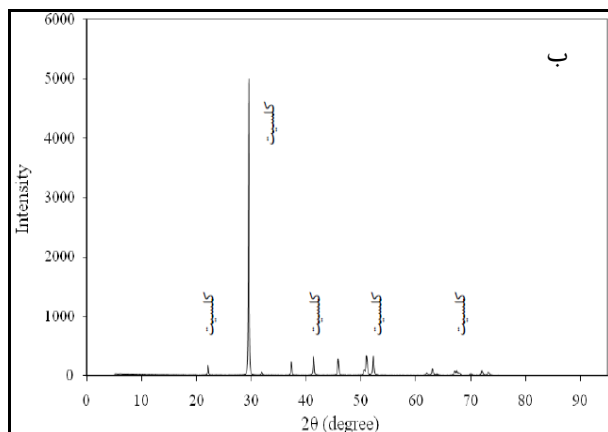


شکل ۱. معدن تراورتن طوسی واقع در آذرشهر و تعدادی از بلوک‌های تهیه شده

### خصوصیات پتروگرافی

خصوصیات پتروگرافی نمونه تراورتن با تهیه مقطع نازک و آنالیز تجزیه شیمیایی (XRD) و (XRF) بررسی شد. (شکل ۲-الف) تصویر میکروسکوپی و نتایج آنالیز تجزیه شیمیایی (شکل ۲-ب) را نشان می‌دهد. بر اساس مطالعه مقاطع نازک و نتایج XRD نمونه مورد مطالعه به طور کامل از کانی کلسیت به صورت کلسیت اسپاری با زمینه میکرایت تشکیل شده است. نحوه قرار

گیری کلسیت اسپاری در زمینه میکرایت بافت بادبزی (Fan share) در نمونه را ایجاد کرده است. نتایج XRF نشان می‌دهد نمونه از ۵۵ درصد اکسید کلسیم، ۰/۳۳ درصد اکسید منیزیم، ۰/۱۵ درصد اکسید آلومینیوم، ۰/۱۴ درصد اکسید سیلیسیم و ۴۴/۳ اکسیدهای غیر قابل شناسایی تشکیل شده است.



شکل ۲. الف) تصویر میکروسکوپی نمونه مورد مطالعه (ب) نتایج آنالیز تجزیه شیمیایی (XRD)

**خصوصیات فیزیکی**

برای تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه مورد مطالعه شامل چگالی خشک و اشباع، تخلخل موثر و جذب آب از روش استاندارد (ISRM, 1981) استفاده شده است. لازم به یادآوری است که برای تعیین هر ویژگی ۵ آزمایش انجام

شد. نتایج به دست آمده از انجام این آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. با توجه به رده‌بندی سنگ‌ها (Anon, 1979) بر اساس چگالی و تخلخل، نمونه در رده سنگ‌های با چگالی متوسط ( $2/20-2/55 \text{ g/cm}^3$ ) و تخلخل پایین (۵-۱٪) قرار گرفته است.

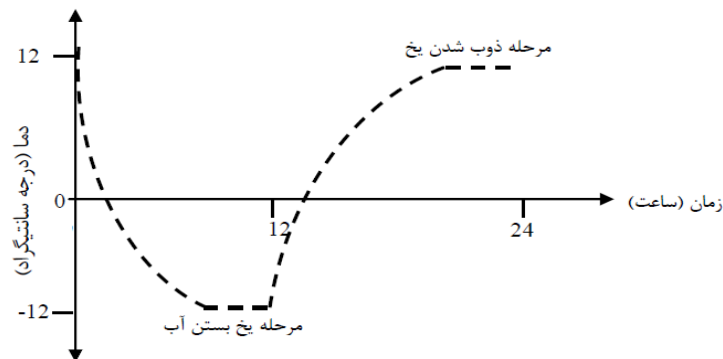
جدول ۱. نتایج تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه مورد مطالعه

خصوصیات دامنه تغییرات	چگالی خشک ( $\text{g/cm}^3$ )	چگالی اشباع ( $\text{g/cm}^3$ )	تخلخل مؤثر (%)	جذب آب (%)
حداقل	۲/۴۰	۲/۴۷	۳/۰۳	۱/۱۶
حداکثر	۲/۴۹	۲/۵۲	۳/۲۷	۱/۸۱
میانگین	۲/۴۸	۲/۴۹	۳/۱۷	۱/۴۳

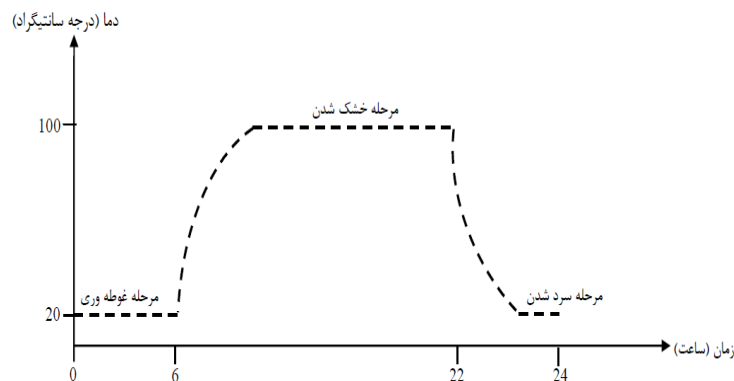
**آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک**

در این تحقیق آزمایش یخبندان تا ۶۰ چرخه انجام شد و بعد از هر ۱۰ چرخه، خصوصیات مکانیکی نمونه شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه تعیین شد. هر چرخه آزمایش از قرار دادن نمونه‌های اشباع در فریزر با دمای  $12 \pm 2$  - درجه سانتیگراد (مرحله یخ بستن آب) و به مدت ۱۲ ساعت در استخر آب با دمای  $12 \pm 2$  (مرحله ذوب شدن یخ) تشکیل شده است. قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در استخر آب برای اشباع شدن قرار داده شدند و در بازه‌های زمانی ۶ ساعت با تکان دادن استخر آب به خروج حباب‌های هوا از نمونه‌ها کمک شد. شکل (۳-الف) منحنی دمایی یک چرخه یخبندان را نشان می‌دهد. برای تعیین هر کدام از خصوصیات مکانیکی ۱۸ نمونه تهیه شد و بعد از هر ۱۰ چرخه ۳ نمونه در شرایط اشباع مطابق استاندارد (ISRM, 1981) مورد آزمایش قرار گرفت (۶۰ چرخه انجماد و آب شدن معادل ۱۸ نمونه).

آزمایش چرخه‌های تبلور نمک به عنوان بخش دیگری از تحقیق در یک محلول ۱۴ درصد وزنی محلول سولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) مطابق با استاندارد (EN, 12370, 1999) تا ۶۰ چرخه انجام و بعد از هر ۵ چرخه خصوصیات مکانیکی مطابق استاندارد (ISRM, 1981) اندازه‌گیری شد. برای هر چرخه آزمایش تبلور نمک، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در استخر محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات سدیم قرار گرفتند (مرحله غوطه‌ورسازی)، سپس نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در گرم خانه با دمای  $100 \pm 5$  درجه سانتیگراد قرار داده شدند (مرحله خشک شدن). بعد از این مرحله، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند تا به طور کامل سرد شوند (مرحله سرد شدن). شکل (۳-ب) منحنی دمایی یک چرخه تبلور نمک را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه مورد مطالعه در چرخه‌های مختلف آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک در جدول (۲) ارائه شده‌اند.



الف



ب

شکل ۳. الف) منحنی دمایی یک چرخه یخبندان ب) منحنی دمایی یک چرخه تبلور نمک

جدول ۲. نتایج تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه مورد مطالعه در چرخه‌های مختلف آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک

V <sub>p</sub> (m/s)		I <sub>S(50)</sub> (MPa)		BTS (MPa)		UCS (MPa)		خصوصیات مکانیکی تعداد چرخه
SC	FT	SC	FT	SC	FT	SC	FT	
۴۹۳۰	۴۹۳۰	۴/۷۳	۴/۷۳	۵/۷۱	۵/۷۱	۵۵/۵	۵۵/۵	شرایط بکر
۵۰۰۰	-	۴/۵۹	-	۵/۵۴	-	۵۴/۳	-	۵
۵۰۲۶	۴۷۸۲	۴/۳۶	۴/۴۰	۵/۴۴	۵/۶۲	۵۴/۰	۵۵/۰	۱۰
۴۸۳۶	-	۴/۱۴	-	۵/۲۳	-	۵۳/۷	-	۱۵
۴۶۵۶	۴۷۱۷	۴/۱۸	۴/۵۱	۵/۰۰	۵/۴۶	۵۱/۰	۵۳/۲	۲۰
۴۵۸۶	-	۳/۸۳	-	۴/۹۶	-	۵۰/۲	-	۲۵
۴۳۲۶	۴۵۸۰	۳/۸۶	۴/۱۲	۴/۸	۵/۴۰	۴۷/۹	۵۲/۴	۳۰
۴۱۷۶	-	۳/۵۳	-	۴/۷۳	-	۴۷/۴	-	۳۵
۴۱۳۶	۴۵۲۸	۳/۳۹	۴/۰۳	۴/۵۰	۵/۱۲	۴۶/۱	۵۰/۰	۴۰
۳۹۵۶	-	۳/۱۲	-	۴/۳۸	-	۴۵/۴	-	۴۵
۳۷۳۶	۴۴۳۲	۳/۱۶	۳/۷۰	۴/۲۰	۴/۷۰	۴۲/۱	۴۷/۳	۵۰
۳۶۸۰	-	۲/۸۴	-	۴/۱۰	-	۴۱/۴	-	۵۵
۳۵۹۹	۴۳۳۸	۲/۷۱	۳/۵۰	۴/۰۰	۴/۴۴	۴۰/۰	۴۶/۰	۶۰
۲۷/۰	۱۲/۰	۴۲/۷	۲۶/۰	۲۹/۹	۲۲/۲	۲۷/۹	۱۷/۱	درصد کاهش

UCS: مقاومت فشاری تک محوری، BTS: مقاومت کششی برزیلین، I<sub>S(50)</sub>: مقاومت بار نقطه ای، V<sub>p</sub>: سرعت موج P، FT: چرخه‌های یخبندان، SC: چرخه‌های تبلور نمک

## تجزیه و تحلیل نتایج

### تابع مدل‌های ریاضی و تعیین نیمه عمر خصوصیات مکانیکی

در شکل‌های (۴) تا (۷) تغییرات خصوصیات مکانیکی نمونه مورد مطالعه در مقابل چرخه‌های یخبندان و تبلور نمک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات خصوصیات مکانیکی به دو صورت است: ۱- تابع مدل نمایی ۲- تابع مدل خطی.

تابع مدل نمایی به این مفهوم است که در چرخه‌های اولیه آزمایش یخبندان و تبلور نمک، تغییرات خصوصیات مکانیکی شدیدتر و با بیشتر شدن چرخه‌های آزمایش میزان شدت تغییرات کمتر می‌شود. در صورتی که تابع مدل خطی نشان دهنده این می‌باشد که شدت تغییرات خصوصیات مکانیکی در چرخه‌های آغازین و انتهایی آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک تقریباً مشابه و از یک الگوی خطی تبعیت می‌کند.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود فرم مدل نمایی و مدل خطی به ترتیب به صورت معادله‌های (۱) و (۲) خواهد بود:

$$M_N = M_0 e^{-\lambda N} \quad (1)$$

$$M_N = -\lambda N + M_0 \quad (2)$$

که در آن N تعداد چرخه آزمایش یخبندان (یا تبلور نمک)، λ ثابت زوال-پذیری خصوصیات مکانیکی نمونه مورد مطالعه، M<sub>N</sub> خصوصیات مکانیکی در چرخه Nام آزمایش یخبندان (یا تبلور نمک) و M<sub>0</sub> خصوصیات مکانیکی در شرایط بکر است. علامت منفی در مدل‌های ارائه شده نشان دهنده کاهش خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک می‌باشند.

در مدل‌های (۱) و (۲) پارامتر ثابت زوال‌پذیری با علامت اختصاری λ معرفی شده است که یک پارامتر مهم برای ارزیابی تغییرات خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک است. پارامتر ثابت زوال‌پذیری، مقدار میانگین تغییرات خصوصیات مکانیکی در یک چرخه آزمایش یخبندان و تبلور نمک را نشان می‌دهد.

علاوه بر پارامتر ثابت زوال‌پذیری (λ)، می‌توان پارامتر دیگری به نام نیمه عمر (N<sub>1/2</sub>) را از مدل‌های نمایی و خطی تعیین کرد. نیمه عمر به عنوان

تعداد چرخه‌ای که لازم است مقدار یک خصوصیت مکانیکی به نصف مقدارش در شرایط بکر در طی انجام آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک برسد، تعریف می‌شود. با استفاده از مدل‌هایی که از انجام آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک به دست می‌آید می‌توان نیمه عمر را تعیین کرد. بر اساس اینکه مدل نمایی یا خطی باشد محاسبه نیمه عمر متفاوت خواهد بود. اگر مدل نمایی باشد (معادله (۱)) با قرار دادن M<sub>0</sub>/2 به جای M<sub>N</sub> معادله (۳) حاصل می‌شود:

$$M_0/2 = M_0 e^{-\lambda N_{1/2}} \quad (3)$$

با ساده کردن معادله (۳)، معادله (۴) حاصل می‌شود:

$$M_0/2M_0 = e^{-\lambda N_{1/2}} \quad (4)$$

که با Ln گرفتن از دو طرف معادله (۴)، پارامتر نیمه عمر (N<sub>1/2</sub>) طبق معادله (۵) به دست می‌آید:

$$N_{1/2} \approx 0.693/\lambda \quad (5)$$

در صورتی که مدل خطی باشد (معادله (۲)) با قرار دادن M<sub>0</sub>/2 به جای

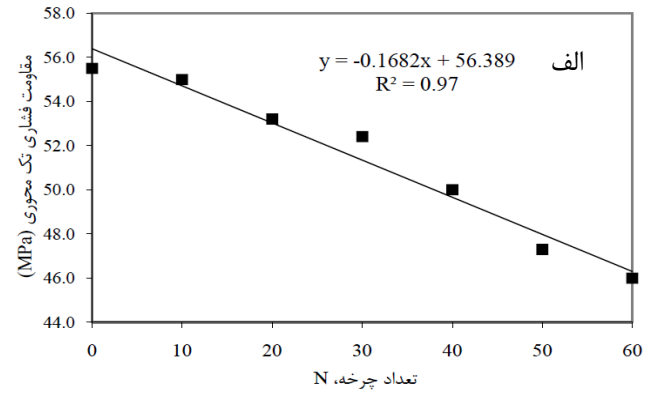
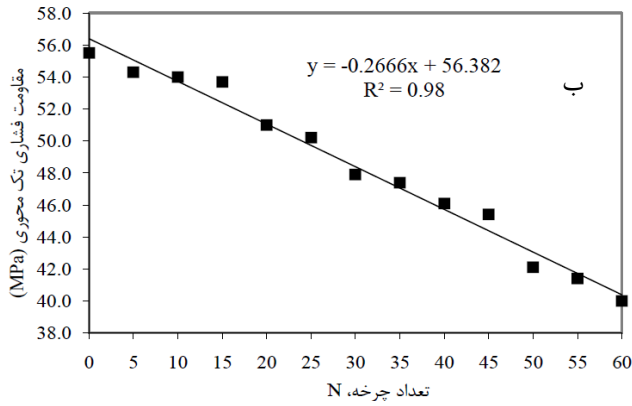
M<sub>N</sub> معادله (۶) حاصل می‌شود:

$$M_0/2 = -\lambda N_{1/2} + M_0 \quad (6)$$

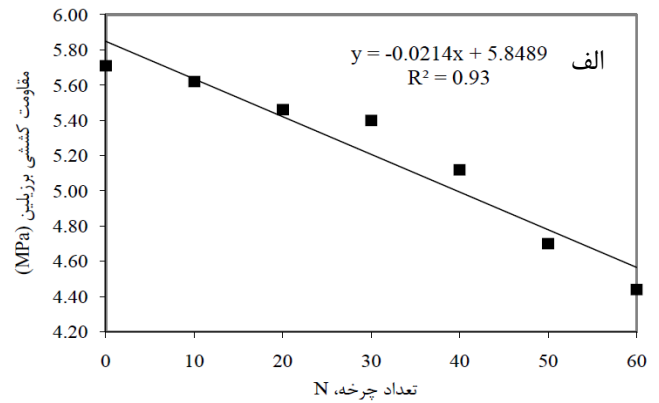
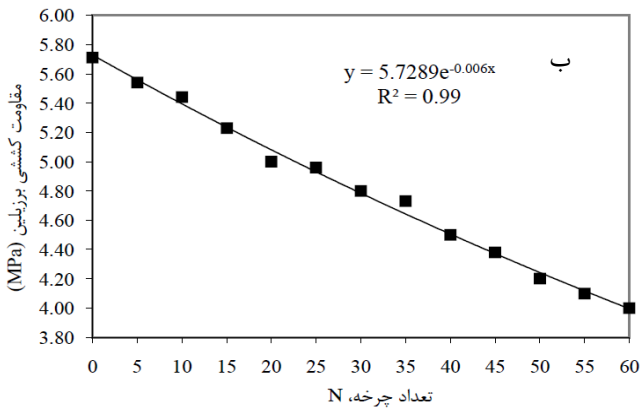
با حل کردن معادله (۶)، پارامتر نیمه عمر از معادله (۷) به دست می‌آید:

$$N_{1/2} = M_0 / 2\lambda \quad (7)$$

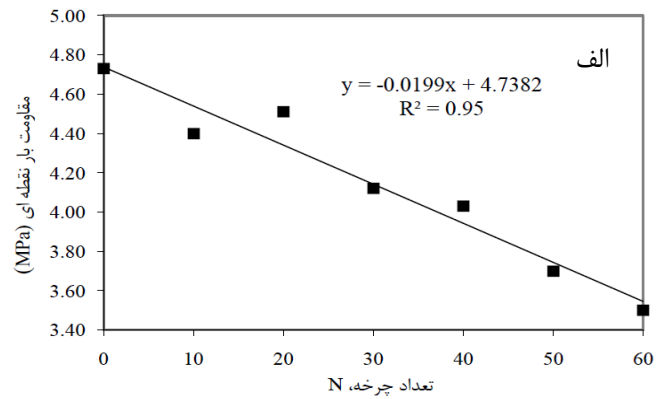
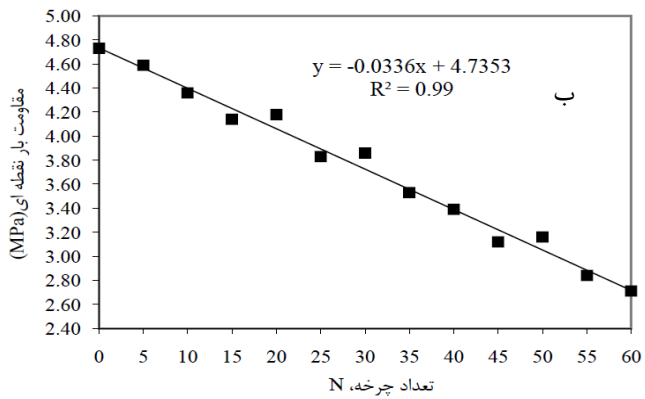
با توجه به معرفی پارامترهای ثابت زوال‌پذیری (λ) و نیمه عمر (N<sub>1/2</sub>)، مقادیر این پارامترها برای مقاومت فشاری تک محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P در آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک تعیین شدند. برای رسیدن به این هدف، با انجام آنالیزهای رگرسیون دو متغیره تغییرات خصوصیات مکانیکی در مقابل تعداد چرخه‌های یخبندان و تبلور نمک بررسی شد (شکل‌های ۴ تا ۷). به این منظور مناسب ترین مدل (نمایی یا خطی) بر داده‌ها برازش شد و مدلی که دارای ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) بیشتری بود به عنوان مدل نهایی معرفی شد. نتایج آنالیزهای انجام شده و همچنین پارامترهای حاصل از آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌اند.



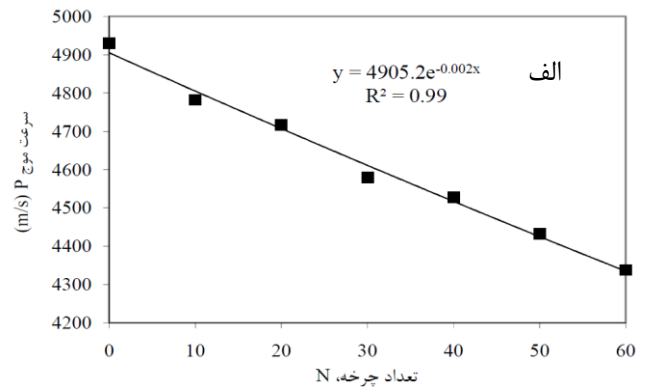
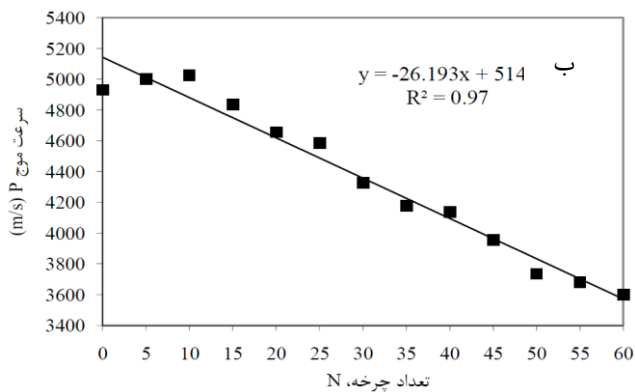
شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در مقابل چرخه‌های: الف) یخبندان، ب) تبلور نمک



شکل ۵. تغییرات مقاومت کششی برزیلین در مقابل چرخه‌های: الف) یخبندان، ب) تبلور نمک



شکل ۶. تغییرات مقاومت بار نقطه‌ای در مقابل چرخه‌های: الف) یخبندان، ب) تبلور نمک



شکل ۷. تغییرات سرعت موج P در مقابل چرخه‌های: الف) یخبندان، ب) تبلور نمک

جدول ۳. نوع مدل، ضریب تعیین، پارامترهای ثابت زوال پذیری ( $\lambda$ ) و نیمه عمر ( $N_{1/2}$ ) خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک

ضریب تعیین ( $R^2$ )	نیمه عمر ( $N_{1/2}$ )	ثابت زوال پذیری ( $\lambda$ )	معادله	نوع مدل	نوع آزمایش	خصوصیات مکانیکی
۰/۹۷	۱۶۵	-۰/۱۶۸	$UCS_N = -0.168N + 56.4$	خطی	یخبندان	UCS
۰/۹۸	۱۰۴	-۰/۲۶۷	$UCS_N = -0.267N + 56.4$	خطی	تبلور نمک	UCS
۰/۹۳	۱۳۳	-۰/۰۲۱۴	$BTS_N = -0.0214N + 5.8$	خطی	یخبندان	BTS
۰/۹۹	۱۱۶	-۰/۰۰۶	$BTS_N = 5.73e^{-0.006N}$	نمایی	تبلور نمک	BTS
۰/۹۵	۱۱۹	-۰/۰۱۹۹	$I_{S(50)N} = -0.0199N + 4.74$	خطی	یخبندان	$I_{S(50)}$
۰/۹۹	۷۰	-۰/۰۳۳۶	$I_{S(50)N} = -0.0336N + 4.74$	خطی	تبلور نمک	$I_{S(50)}$
۰/۹۹	۳۴۷	-۰/۰۰۲	$V_{PN} = 4905e^{-0.002N}$	نمایی	یخبندان	$V_p$
۰/۹۷	۹۴	-۲۶/۲	$V_{PN} = -26.2N + 5143$	خطی	تبلور نمک	$V_p$

P در خلل و فرج پر شده از نمک بیشتر از حالتی است که این فضاها از نمک خالی باشند، در نتیجه این شرایط باعث افزایش سرعت انتشار موج P در چرخه‌های ابتدایی آزمایش می‌شود. در طی آزمایش تبلور نمک اندرکنش بین تجمع بلورهای نمک در داخل خلل و فرج نمونه و تغییر در ساختار خلل و فرج به دلیل فشار تبلور نمک تعیین کننده افزایش یا کاهش سرعت موج P می‌باشد. به هر حال در چرخه‌های ابتدایی آزمایش میزان تجمع نمک به گونه‌ای است که بر تغییر ساختار خلل و فرج به دلیل فشار تبلور نمک برتری دارد که این موجب افزایش سرعت موج P نمونه شده است.

### مقایسه تاثیر آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک روی

#### خصوصیات مکانیکی

به منظور مقایسه تاثیر آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک روی خصوصیات مکانیکی و نتیجتاً دوام طولانی مدت نمونه مورد مطالعه از مقادیر ثابت زوال پذیری ( $\lambda$ ) و نیمه عمر ( $N_{1/2}$ ) استفاده شده است.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود مقدار ثابت زوال پذیری برای مقاومت فشاری تک محوری در آزمایش تبلور نمک  $-۰/۲۶۷$  و برای آزمایش یخبندان برابر  $-۰/۱۶۸$  می‌باشد. این نشان می‌دهد نرخ زوال پذیری مقاومت فشاری تک محوری در آزمایش تبلور نمک تقریباً  $۱/۵۹$  برابر آزمایش یخبندان است. به طور مشابه نرخ زوال پذیری مقاومت کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P برای آزمایش تبلور نمک به ترتیب  $۱/۵$ ،  $۱/۶۹$  و  $۳$  برابر آزمایش یخبندان است. نتیجه‌ای که از مقایسه ثابت زوال‌پذیری حاصل می‌شود این است که تاثیر آزمایش تبلور نمک روی خصوصیات مکانیکی و نتیجتاً دوام نمونه مورد مطالعه بیشتر از آزمایش یخبندان می‌باشد.

در جدول (۳) و به صورت شماتیک در شکل (۸) مقادیر نیمه عمر خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود مقادیر نیمه عمر خصوصیات مکانیکی در آزمایش تبلور نمک کمتر از آزمایش یخبندان است. مقدار نیمه عمر مقاومت فشاری تک محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P برای آزمایش تبلور نمک به ترتیب برابر  $۱۰۴$ ،  $۱۱۶$ ،  $۷۰$  و  $۹۴$  چرخه و مقادیر همین خصوصیات برای آزمایش یخبندان به ترتیب برابر با  $۱۳۳$ ،  $۱۱۹$  و  $۱۱۶$  چرخه می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد مقادیر خصوصیات مکانیکی در آزمایش تبلور نمک در مقایسه با آزمایش یخبندان در تعداد چرخه کمتری از آزمایش تبلور نمک به نصف مقدار اولیه‌شان (شرایط بکر) می‌رسند. در واقع دوام طولانی مدت نمونه مورد مطالعه در مقابل آزمایش تبلور نمک کمتر بوده است یا به عبارت دیگر تبلور نمک باعث زوال‌پذیری شدیدتر خصوصیات مکانیکی شده است.

### ارزیابی تغییرات خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های یخبندان

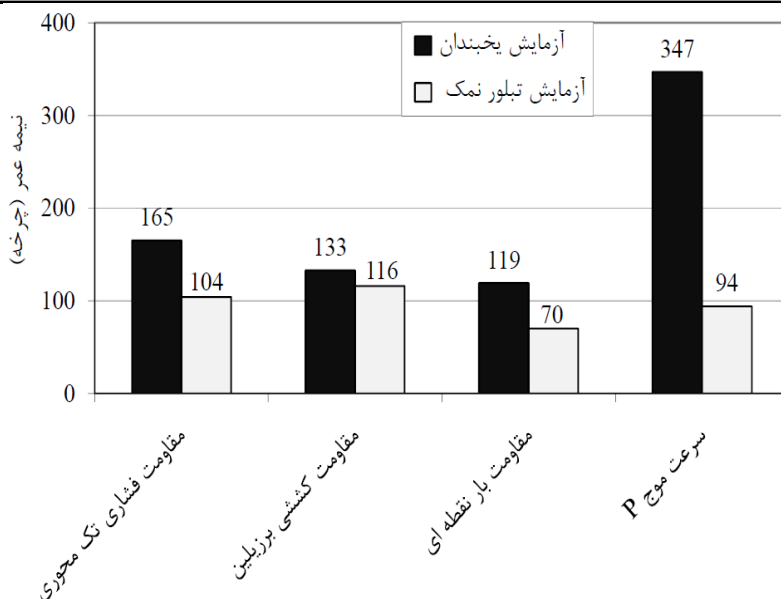
#### و تبلور نمک

همانطور که از شکل‌های (۴) تا (۷) مشاهده می‌شود مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش یخبندان و تبلور نمک یک روند کاهشی از خود نشان می‌دهند. درصد کاهش هر یک از خصوصیات مکانیکی در جدول (۲) برای آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک ارائه شده است. مشاهده می‌شود درصد کاهش خصوصیات مکانیکی برای آزمایش تبلور نمک بیشترین مقدار و برای آزمایش یخبندان دارای کمترین مقدار است. مقادیر درصد کاهش مقاومت فشاری تک محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P برای آزمایش تبلور نمک به ترتیب برابر  $۲۷/۹$ ،  $۲۷/۹$ ،  $۲۹/۹$  و  $۴۲/۷$  می‌باشد و برای آزمایش یخبندان به ترتیب برابر با  $۱۷/۱$ ،  $۲۲/۲$ ،  $۲۶/۰$  و  $۱۲/۰$  می‌باشد.

نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققین مطابقت دارد. (Yavuz and Topal, Akin and Ozsan, 2011) و (Altindang et al., 2004) و (2007) تک محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در آزمایش‌های چرخه‌های یخبندان و تبلور نمک به این نتیجه رسیدند که مقادیر این خصوصیات با افزایش چرخه‌های آزمایش یک روند کاهشی از خود نشان داده‌اند.

دلیل کاهش خصوصیات مکانیکی در آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک را می‌توان در تغییرات حجمی ناشی از تبدیل آب به یخ در آزمایش یخبندان (Bell, 2000) و تغییرات حجمی ناشی از تبدیل سولفات سدیم بدون آب ( $Na_2SO_4$ ) به سولفات سدیم آبدار ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) در آزمایش تبلور نمک جستجو کرد (Tsui et al., 2003). این تغییرات باعث ایجاد فشار در دیواره خلل و فرج و ریزترک‌های نمونه می‌شود. با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش، خلل و فرج و ریزترک‌های که از قبل وجود داشته‌اند بزرگتر و به یکدیگر متصل می‌شوند و علاوه بر این یکسری ریزترک‌های جدید در نمونه گسترش پیدا می‌کنند. افزایش تغییر در ساختار خلل و فرج و ریزترک‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش منجر به کاهش هر چه بیشتر خصوصیات مکانیکی و در نتیجه دوام نمونه مورد مطالعه می‌شود.

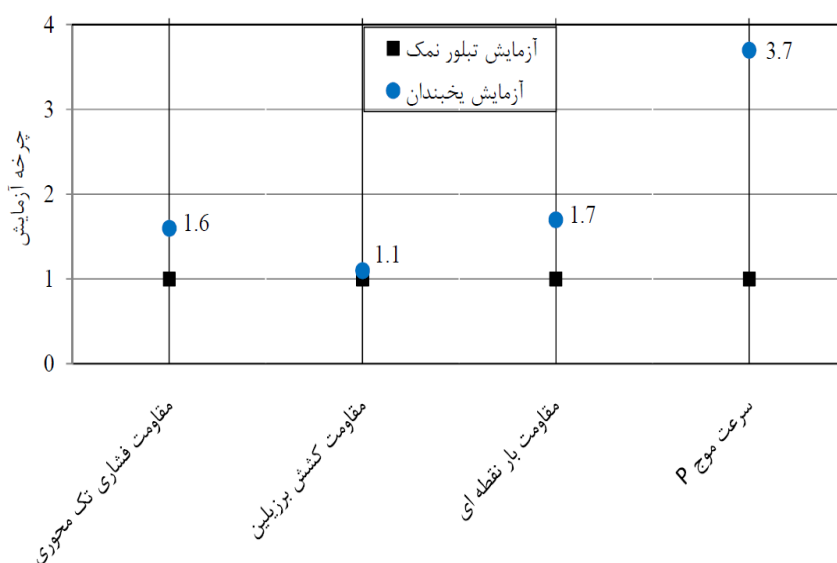
نکته‌ای که در مورد تغییرات سرعت موج P با افزایش چرخه‌های تبلور نمک (شکل ۷-ب) باید به آن توجه کرد این است که در چرخه‌های ابتدایی آزمایش مقدار سرعت موج P بر خلاف سایر خصوصیات مکانیکی اندازه‌گیری شده افزایش از خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم انجام شده است نفوذ محلول به درون خلل و فرج نمونه‌ها باعث تجمع و پر شدن آن‌ها می‌شود. از آنجایی که سرعت انتقال موج


 شکل ۸. مقادیر نیمه عمر  $(N_{1/2})$  خصوصیات مکانیکی نمونه مورد مطالعه در آزمایش یخبندان و تبلور نمک

یخبندان است، مقادیر نیمه عمر خصوصیات مکانیکی در آزمایش تبلور نمک واحد در نظر گرفته شده است. برای مثال در جدول (۳) مقدار نیمه عمر مقاومت فشاری تک محوری در آزمایش تبلور نمک و یخبندان را بر مقدار  $10^4$  تقسیم می‌کنیم با این کار مقدار واحد نیمه عمر در آزمایش تبلور نمک برابر ۱ چرخه و برای آزمایش یخبندان برابر  $1/6$  چرخه خواهد شد. در واقع این نشان می‌دهد میزان تأثیری که هر چرخه آزمایش تبلور نمک روی زوال پذیری مقاومت فشاری تک محوری دارد برابر با تأثیر  $1/6$  چرخه آزمایش یخبندان است. برای سایر خصوصیات مکانیکی میزان تأثیری که هر یک چرخه آزمایش تبلور نمک روی زوال پذیری مقاومت کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه دارد به ترتیب معادل  $1/1$ ،  $1/7$  و  $3/7$  چرخه آزمایش یخبندان است. در شکل (۹) مقادیر چرخه معادل خصوصیات مکانیکی در آزمایش یخبندان و تبلور نمک ارائه شده است.

با توجه به نتایج فوق می‌توان به بیشتر بودن تأثیر آزمایش تبلور نمک در زوال پذیری و کاهش دوام طولانی مدت نمونه که خود را به صورت کاهش در خصوصیات مکانیکی نشان می‌دهد پی برد. این نشان می‌دهد فشار تبلوری که در اثر افزایش حجم  $314$  درصدی ناشی از تبدیل شدن سولفات سدیم بدون آب به سولفات سدیم آبدار که در آزمایش تبلور نمک رخ می‌دهد (Tsui et al., 2003) تأثیر به مراتب مخربتری در مقایسه با فشار تبلور ناشی از تبدیل آب به یخ در آزمایش یخبندان که به دلیل افزایش حجم  $9$  درصدی رخ می‌دهد، داشته است (Bell, 2000).

با استفاده از مقادیر نیمه عمر برای خصوصیات مکانیکی که در جدول (۳) ارائه شده‌اند می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر یک چرخه مجزا در آزمایش تبلور نمک بیشتر از تأثیر یک چرخه مجزای آزمایش یخبندان است. برای تعیین اینکه یک چرخه در آزمایش تبلور نمک معادل چند چرخه در آزمایش



شکل ۹. مقادیر چرخه معادل خصوصیات مکانیکی در آزمایش یخبندان و تبلور نمک

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک تا ۶۰ چرخه روی تراورتن طوسی آذرشهر انجام شد و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوری، کششی برزیلین، بار نقطه‌ای و سرعت موج P بعد از ۱۰ چرخه یخبندان و ۵ چرخه تبلور نمک تعیین شد. با تجزیه و تحلیل نتایج دو تابع مدل ریاضی نمایشی و خطی با توجه به تغییرات خصوصیات مکانیکی در چرخه‌های مختلف آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک ارائه شد. از این مدل‌ها دو پارامتر ثابت زوال پذیری ( $\lambda$ ) و نیمه عمر ( $N_{1/2}$ ) برای ارزیابی تغییرات خصوصیات مکانیکی و در نتیجه دوام طولانی مدت تراورتن طوسی آذرشهر استخراج شد.

نتایج نشان می‌دهد پارامترهای ثابت زوال پذیری و نیمه عمر دارای دقت و صحت قابل قبولی در ارزیابی دوام طولانی مدت نمونه مورد مطالعه در مقابل آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک می‌باشند. در نهایت پارامترهای فوق باعث کاهش هزینه، صرفه جویی و یک ارزیابی سریع از دوام طولانی مدت در انجام آزمایش‌های یخبندان و تبلور نمک که انجام آن‌ها به هفته‌ها و حتی ماه‌ها زمان نیاز دارد می‌شوند.

## منابع

ذلولی، ا.، خامه چیان، م.، نیکودل، م.، ۱۳۹۳، دماسنجی و شرایط فیزیکی و شیمیایی محلول کانه‌دار بر مبنای کلریت و سیالات دیگر، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۲، ص ۱۴-۲۴.

- Akin.A., Ozsan.A., 2011, Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests, Bull Engineering Geology Environmental, Vol:70, p:101-114.
- Altindaga.R., Alyildizb.I.S., Onarganc.T., 2004, Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol:41, p:1023-1028.
- Angeli.M., Bigas. J.P., Benavente.D., Menendez.B., Hebert.R., David.C., 2007, Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage, Environmental Geology, Vol:52, p:205-213.
- Anon., 1979, Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part 1: Rock and soil materials. Bulletin Association Engineering Geology, Vol:19, p:355-371.
- Bayram.F., 2012, Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions, Cold Regions Science and Technology, Vol:83-84, p:98-102.
- Bell. F.G., 2000, Engineering Properties of Soils and Rocks, 2st Edition, Blackwell Science, London.
- Benavente.D., Garcia del Cura.M.A., Bernabeu.A., Ordonez.S., 2001, Quantification of salt weathering in porous stones using experimental continuous partial immersion method, Engineering Geology, Vol:59, p: 313-25.
- Benavente.D., García del Cura. M.A., Fort, R., Ordóñez, S., 2004, Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength, Engineering Geology, Vol:74, p:113-127.
- Benavente.D., Martinez.J., Cueto.N., Cura.M.A, 2007a, Salt weathering in dual-porosity building dolostones, Engineering Geology, Vol:94, p:215-226.
- Benavente.D., Martinez-Martinez.J., Garcia del Cura.M.A., Can averas.M.A., 2007b, The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks, Environmental Geology, Vol: 52, p:215-224.
- Cardell.C., Delalieuxa.F., Roumpopoulosb.K., Moropouloub.A., Augerc.F., Grieken.R.V., 2003, Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France, Construction and Building Materials, Vol:17, p:165-179.
- 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, vol:38, p:127-136.
- Cultrone.G., Luque.A., Sebastián.E., 2012, Petrophysical and durability tests on sedimentary stones to evaluate their quality as building materials, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol:45,p: 415-422.
- EN 12370., 1999, Natural stone test methods - Determination of resistance to salt crystallization, (FOREIGN STANDARD).
- ISRM., 1981, Rock characterization, Testing and Monitoring. In: Brown ET. editor. ISRM suggested methods. Oxford, Pergamon Press., 211p.
- Jamshidi.A., Nikudel.M.R., Khamehchiyan.M., 2013a, Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model, Cold Regions Science and Technology, Vol:92, p:29-36.
- Jamshidi.A., Nikudel.M.R., Khamehchiyan.M., 2013b, Estimating the durability of building stones against Salt crystallization: considering the physical properties and strength characteristics, Journal of Geopersia, Vol: 3, p:35-48.
- 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, v Vol:47, p:1207-1211.



- Martínez.M.J., Benavente.D., Gomez-Heras.M., Marco-Castaño.L., García-del-Cura.M.A., 2013, Non-linear decay of building stones during freeze–thaw weathering processes, *Construction and Building Materials*, vol:38, p:443–454.
- Molina.E., Cultrone.G., Sebastián.E., Alonso.F.J., Carrizo.L., Gisbert.J., Buj.O., 2011, The pore system of sedimentary rocks as a key factor in the durability of building materials, *Engineering Geology*, Vol:118, p: 110–121.
- Nicholson.D., 2001, Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestone, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol:26, p:819–838.
- Rodríguez-Navarro.C., Doehnea.E., Sebastianb.E., 2000, How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials, *Cement and Concrete Research*, Vol:30, p:1527- 1534.
- Ruedrich.J., Siegesmund.S., 2007, Salt and ice crystallisation in porous sandstones, *Environmental Geology*, Vol:52, p: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*, Vol:45, p:1164-1175.
- Topal.T., Doyuran.V., 1998, Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey, *Environmental Geology*, Vol:34, Research article.
- Topal.T., Sözmen.B., 2000, Freeze-thaw resistance of the Yazılıkaya tuffs, Proc. 9th Int. Cong. on the Deterioration and Conservation of Stone, Venice, Italy, Elsevier, Vol:1, p:275-281.
- Tsui.N., Flatt.R., Scherer.G., 2003, Crystallization damage by sodium sulfate, *Journal of Cultural Heritage*, Vol:4, p:109–115.
- Yavuz.A.B., 2006, Deterioration of the volcanic kerb and pavement stones in a humid environment in the city centre of Izmir, Turkey, *Environmental Geology*, Vol:51, p:211-227.
- Yavuz.A.B., 2012, Durability assessment of the Alacati tuff (Izmir) in western Turkey, *Environmental Earth Scinces*, Vol:67, p:1909-1925.
- Yavuz.A.B., Topal.T., 2007, Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: Examples from Western Anatolia, Turkey, *Engineering Geology*, Vol:90, p:30-40.
- Ulusoy.M., 2007, Different igneous masonry blocks and salt crystal weathering rates in the architecture of historical city of Konya, *Building and Environment*, Vol:42, p:3014-3024.
- Zedef.V., Kocak.K., Doyen.A., Ozsen.H., Kecec.B., 2007, Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey, *Building and Environment*, Vol:42, p:1453-1457.