

# ارزیابی مقاومت پوزولان طبیعی فعال شده در برابر چرخه‌های (انجماد- ذوب) و حمله (نمک- یخ)

علی الهوردی<sup>\*</sup>، سمیه زین‌ساز

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات سیمان

پیام نگار: ali.allahverdi@iust.ac.ir

## چکیده

تحقیق جاری مقاومت پوزولان طبیعی فعال شده با یک فعال‌کننده جامد مرکب را در برابر چرخه‌های (انجماد- ذوب) و حمله (نمک- یخ) ارزیابی می‌کند. شدت تخریب با اندازه‌گیری مقاومت فشاری، حجم کل تخلخل باز و میزان جذب آب آزمونه‌های ملات مطابق استانداردهای ASTM C666 و ASTM C672 ارزیابی شد. مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات این چسباننده پس از اعمال ۷۵ چرخه (انجماد- ذوب)، تا ۱۰۰٪ کاهش یافت، در حالی که آزمونه‌های ملات سیمان پرتلند پس از اعمال ۲۰۰ چرخه، تنها ۱۷/۳۸٪ افت مقاومت فشاری نشان دادند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری حجم کل تخلخل باز و میزان جذب آب نیز تأییدکننده شدت بیشتر تخریب در آزمونه‌های ملات پوزولان طبیعی فعال شده است. بعد از اعمال ۵۰ چرخه تهاجم (نمک- یخ) در حضور محلول کلرید کلسیم ۱/۵، ۳ و ۴/۵٪، میزان پوسته شدن ملات پوزولان فعال شده حدوداً ۴ برابر ملات سیمان پرتلند اندازه‌گیری شد.

کلمات کلیدی: (انجماد- ذوب)، (نمک- یخ)، پوسته شدن، مقاومت فشاری

## ۱- مقدمه

جسم در تمام حجم آن را باعث می‌شود و لذا مدول کشسانی جسم بشدت کاهش می‌یابد. در موارد حاد، این نوع تخریب به‌صورت ترک‌های متعدد در سطح جسم ظاهر می‌شود. از این نوع تخریب غالباً به‌عنوان حمله داخلی انجماد یاد می‌شود. هلموت<sup>۱</sup> [۱] فشار بلوری شدن را به‌عنوان دلیل مهم تخریب ناشی از انجماد پیشنهاد کرد. برتری فشار بلوری شدن به وسیله این حقیقت بیان می‌شود که هنگامی که مایع منجمد شده حجم مخصوصی کمتر از جامد متناظر داشته باشد، بدنه حفره‌ها تخریب می‌گردد. هنگامی که یخ در حفره‌های کوچک ( $r_p \leq 50 \text{ nm}$ ) شکل می‌گیرد، نقطه ذوب کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که در ابتدا وقتی یخ روی سطح

چرخه‌های (انجماد- ذوب)<sup>۱</sup> یکی از دلایل عمده خرابی‌های بتن و مواد پایه سیمانی است. این نوع خرابی در مناطق سردسیر رایج است. در این رابطه، به منظور اعمال ضوابط فنی و رعایت اصول طراحی دوام سازه‌های بتنی، نیاز مبرمی به مدل‌های ساده و کارآمد احساس می‌شود. چنین پدیده‌ای می‌تواند در مورد کلیه موادی که توانایی جذب رطوبت (چه در داخل ترک‌های ریز نظیر سنگ و صخره و چه در داخل خلل و فرج ریز و میکرونی نظیر محصولات پایه سیمانی) داشته باشند، رخ دهد، اگرچه ساز و کار دقیق تخریب ممکن است تاحدی متفاوت باشد. این نوع تخریب، آسیب‌دیدگی

2. Helmuth

1. Freeze-Thaw Cycles

روی سطح بتن ایجاد می‌شود و سپس یخ در اثر کاهش دما منقبض می‌گردد. چنانچه در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، این انقباض منجر به تشکیل ترک در یخ می‌گردد و در امتداد شکاف ایجاد شده، تنش کششی قابل ملاحظه‌ای در لایه سطحی بتن به وجود می‌آید که می‌تواند پوسته شدن نواحی سطحی بتن را به دنبال داشته باشد [۳].

در این تحقیق عملکرد پوزولان طبیعی فعال شده با یک فعال کننده شیمیایی جامد و مرکب در برابر چرخه‌های (انجماد-ذوب) و حمله (نمک-یخ) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای چرخه‌های (انجماد-ذوب) از آزمون‌های ملات استفاده شد و شدت تخریب با اندازه‌گیری تغییرات مقاومت فشاری، حجم کل تخلخل باز، و میزان جذب آب آزمون‌ها بررسی گردید. برای تهاجم (نمک-یخ) از آزمون‌های بتن استفاده شد و شدت تخریب با اندازه‌گیری جرم پوسته شده از سطح آزمون‌ها ارزیابی گردید.

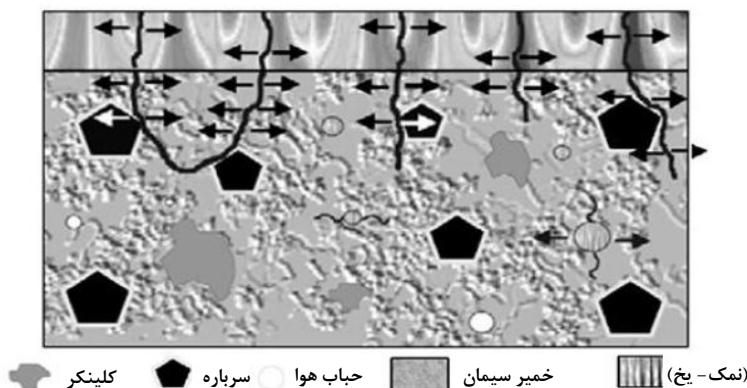
## ۲- مواد مصرفی

برای انجام تحقیق از پوزولان طبیعی فعال شده با یک فعال کننده مرکب و همچنین سیمان پرتلند نوع ۲ به عنوان مرجع استفاده شد. برخی از مشخصات مهم سیمان پرتلند مرجع در جدول (۱) آورده شده است. ترکیب شیمیایی ارائه شده نتیجه آنالیز شیمیایی به کمک فلوئورسانس پرتوهای ایکس است. ترکیب فازی پتانسیلی سیمان مورد استفاده با فرمول‌های بوگ<sup>۱</sup> محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است.

خارجی تشکیل می‌شود، تا زمانی که دما تا ۱۷- درجه سلسیوس کاهش یابد، باعث انقباض بتن می‌شود. این دمای نفوذ یخ به درون حفره ای با شعاع  $r_p = 4 \text{ nm}$  است. این حفره‌های بسیار نازک درون خمیر سخت شده سیمان در بتن پخش شده اند. زمانی که یخ به درون حفره نفوذ می‌کند، به ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان حمله کرده و انبساط آغاز می‌شود [۲].

نیروی دافعه بین بلور و دیواره حفره خیلی زیاد است و فشاری که بلور به نقطه تماس وارد می‌کند، بزرگتر از مقاومت کششی خمیر سیمان است. بنابراین بلور تلاش می‌کند به طرف دیوار رشد کند و دیوار به طرف بیرون فشار داده می‌شود. این همان ساز و کار تورم ناشی از انجماد است. این فشار بلوری شدن تنش کششی زیادی را در دیواره حفره به وجود می‌آورد. مقاومت کششی خمیر سخت شده سیمان عموماً در حدود ۳MPa می‌باشد، بنابراین هنگامی که یخ در حفره‌ها شکل می‌گیرد، تخریب ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان آغاز می‌شود.

از اوائل دهه ۱۹۳۰ و همزمان با شیوع مصرف عوامل ضد یخ برای زدودن یخ از سطوح جاده‌ها و معابر بتنی، بمرور معلوم گردید که حضور عوامل شیمیایی ضد یخ و بروز پدیده انجماد می‌تواند تخریب سازه‌ها و محصولات بتنی را از سطح باعث گردد. بر اساس تحقیقات انجام شده، تخریب سطحی در غلظت‌های متوسط از عامل ضد یخ در محلول خارجی به حداکثر ممکن افزایش می‌یابد. چنانچه محلول خارجی وجود نداشته باشد، در اینصورت پوسته شدن اتفاق نخواهد افتاد. ساز و کار تخریب ناشی از حمله (نمک-یخ) توسط نظریه پوسته شدن چسبی بیان می‌شود. بر اساس این نظریه ابتدا لایه یخ



شکل ۱- خمیر سیمان تحت تنش کششی و داخل شدن ترک‌ها به وسیله شکاف لایه یخ [۳]

1. Bogu's Formula

جدول ۱- مشخصات سیمان پرتلند نوع ۲

سطح ویژه (cm <sup>2</sup> /g)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ترکیب شیمیایی										
		CaO free	LOI	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	اکسید
۳۱۲۵	۳۱۱۲	۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۲۵	۰/۶۶	۲/۰۰	۳/۵۰	۶۲/۹۹	۳/۲۷	۴/۶۴	۲۲/۷۰	درصد وزنی

طبیعی تفتان که به روش شیمی تر و بر اساس استاندارد ASTM C۳۱۱ بدست آمده، ارائه شده است. باقیمانده روی الک ۹۰ میکرون آن معادل ۱٪ وزنی و باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون آن نیز برابر ۱۲/۶٪ وزنی بوده است. برای ایجاد خواص هیدرولیکی و تقویت فعالیت پوزولانی از یک فعال کننده مرکب<sup>۱</sup> بر پایه سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان تهران و مخلوط بهینه‌ای از فعال کننده‌های شیمیایی استفاده شده است. در شکل (۲) الگوی پراش سنجی اشعه ایکس پوزولان تفتان آورده شده است [۴ و ۵].

جدول ۲- ترکیب فازی پتانسیلی بوگ (درصد وزنی)

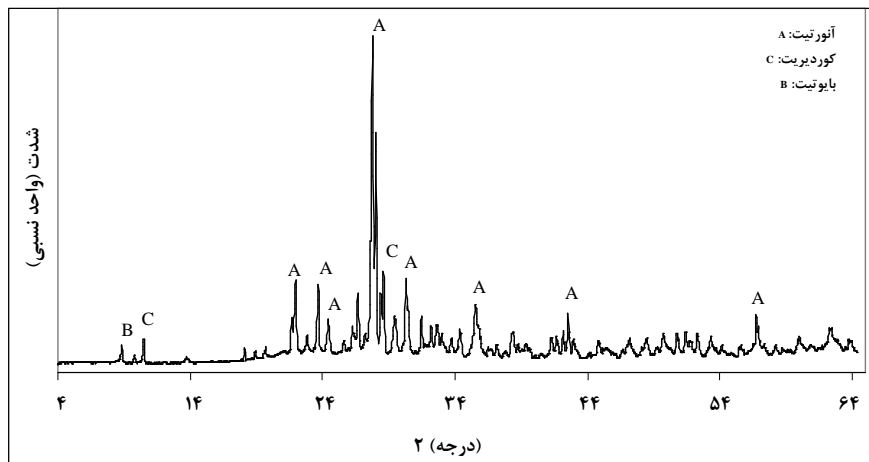
سیمان پرتلند نوع ۲

فاز	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
درصد وزنی	۴۸/۰۲	۲۸/۹۳	۶/۷۶	۹/۹۵

پوزولان استفاده شده در این تحقیق، پوزولان تفتان است که از کوه‌های تفتان واقع در جنوب شرقی ایران تأمین و در آسیاب صنعتی خرد شده بود. در جدول (۳) ترکیب شیمیایی پوزولان

جدول ۳- خواص پوزولان طبیعی تفتان

سطح ویژه (cm <sup>2</sup> /g)	ترکیب شیمیایی										
	Cl	LOI	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	اکسید
۳۰۹۰	۰/۰۴	۲/۱۵	۱/۶۵	۱/۹۵	۰/۱۰	۲/۶۳	۶/۶۹	۴/۹۳	۱۸/۰۰	۶۱/۵۷	درصد وزنی



شکل ۲- الگوی پراش سنجی پرتوهای ایکس پوزولان تفتان

### ۳- روش آزمایش

برای چرخه‌های (انجماد- ذوب) از نمونه‌های ملات پوزولان طبیعی فعال شده با یک فعال‌کننده مرکب و همچنین از نمونه‌های سیمان پرتلند نوع ۲ به عنوان مرجع استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های ملات سیمان پرتلند، مطابق استاندارد ASTM C109 نسبت سنگدانه به سیمان برابر  $2/75$  و نسبت آب به سیمان برابر  $0/485$  در نظر گرفته شد. جهت ساخت نمونه‌های ملات پوزولان فعال شده، نسبت سنگدانه به چسباننده خشک برابر با ۲ و نسبت آب به چسباننده خشک معادل  $0/41$  در نظر گرفته شد. چسباننده خشک پایه پوزولان تفتان شامل  $70\%$  پوزولان طبیعی تفتان و  $30\%$  فعال‌کننده مرکب می‌باشد. برای تهیه نمونه‌های ملات از قالب‌های فولادی با ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  سانتیمتر استفاده شد و سپس نمونه‌ها به صورت مرطوب<sup>۱</sup> عمل آوری گردیدند. پس از اتمام عملیات قالب‌گیری، قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل اتاق مرطوب نگهداری شدند. اتاق مرطوب دارای دمای نسبی ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت اشباع می‌باشد. بعد از ۲۴ ساعت قالب‌ها را از اتاق رطوبت خارج کرده و نمونه‌ها را از آن‌ها بیرون آوردیم. نمونه‌های ملات مرجع را به مدت ۲۷ شبانه روز در داخل ظرف آب آهک با دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس و نمونه‌های پوزولان فعال شده را نیز به مدت ۵۹ شبانه روز در داخل ظرف آب آهک با دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس قرار دادیم. بدین ترتیب نمونه‌ها برای قرار گرفتن در برابر چرخه‌های (انجماد- ذوب) آماده شدند.

چرخه‌های (انجماد- ذوب) طبق استاندارد ASTM C666 روی نمونه‌های ملات انجام گرفت. بنا بر توصیه‌های این استاندارد، تمام سطوح نمونه‌ها را حداقل یک میلی‌متر آب در همه زمان‌ها چه در حالت انجماد و چه در حالت ذوب فرا گرفته بود. هر چرخه (انجماد- ذوب) ۵ ساعت به طول انجامید که در  $20\%$  این زمان، نمونه‌ها در حالت ذوب (در دمای ۴ درجه سلسیوس) و در  $80\%$  زمان فوق، نمونه‌ها در حالت انجماد (در دمای  $-20$  درجه سلسیوس) قرار گرفتند. به دلیل انجام چرخه‌ها به طور دستی و نیز به دلیل محدودیت زمانی در هر شبانه روز تنها انجام سه چرخه (انجماد- ذوب) امکان پذیر بود، به همین خاطر در ساعات غیر اداری بنا به توصیه استاندارد نمونه‌ها در حالت انجماد قرار گرفتند.

1. Moist Curing

مقاومت فشاری نمونه‌ها در پایان چرخه‌های معین اندازه‌گیری شد. همچنین میزان جذب آب و حجم کل تخلخل باز نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM C90-642 اندازه‌گیری شدند.

برای بررسی عملکرد حمله (نمک- یخ) از نمونه‌های بتن پوزولان طبیعی فعال شده و همچنین از نمونه‌های بتن سیمان پرتلند نوع ۲ به عنوان مرجع استفاده شد. ابتدا طرح اختلاط تعیین و سپس بر اساس آن برای آماده سازی نمونه‌های مکعبی بتن طبق استاندارد ASTM C192 اقدام شد. نسبت ماسه به سنگدانه برابر ۳ به ۲ ( $60\%$  ماسه و  $40\%$  سنگدانه) انتخاب گردید. از سنگدانه در اندازه زیر یک سانتی متر استفاده شد. عیار سیمان در بتن معادل  $350$  کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. برای تعیین نسبت آب به سیمان از آزمایش اسلامپ استفاده گردید. این نسبت برابر با  $0/5$  و بگونه‌ای تعیین شد که کلیه نمونه‌های بتنی از اسلامپی در حدود ۵ تا ۸ سانتیمتر برخوردار باشند. تهیه نمونه‌های بتنی پوزولان فعال شده شبیه نمونه‌های مرجع است با این تفاوت که عیار چسباننده معادل  $400$  کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. در این پروژه به منظور بررسی میزان پوسته شدن از سطح نمونه‌ها، از قالب‌های پلاستیکی با ابعاد  $20 \times 10 \times 5$  سانتیمتر مکعب استفاده گردید. بعد از قالب‌گیری، نمونه‌ها در داخل اتاق رطوبت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند. بعد از ۲۴ ساعت قالب‌ها را از اتاق رطوبت خارج کرده و نمونه‌ها را از آن‌ها بیرون آوردیم. نمونه‌های مرجع را به مدت ۲۷ شبانه روز در داخل ظرف آب آهک با دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس قرار دادیم. نمونه‌های پوزولان فعال شده را نیز به مدت ۵۹ شبانه روز در داخل ظرف آب آهک با دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس قرار دادیم. بدین ترتیب نمونه‌ها برای آزمایش حمله (نمک- یخ) آماده شدند.

آزمایش حمله (نمک- یخ) طبق استاندارد ASTM C672 روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. تمام سطوح نمونه بتنی جز یک سطح آن با شیشه و چسب سیلیکون ایزوله شد و سطح آزاد تا عمق ۶ میلی‌متر در مجاورت محلول کلرید کلسیم قرار گرفت. بنا بر توصیه‌های این استاندارد نمونه‌ها برای ۱۶ تا ۱۸ ساعت در فریزر در دمای  $-20$  درجه سلسیوس قرار گرفتند در پایان این زمان، از فریزر برداشته شدند و در محیطی با دمای ۴ درجه سلسیوس و رطوبت  $45\%$  قرار گرفتند. بعد از هر ۵ چرخه، سطح به‌طور کامل تمیز

می‌شد و پوسته‌های بدست آمده توزین می‌گردید و مجدداً محلول را جایگزین کرده آزمایش ادامه می‌یافت.

#### ۴- نتایج حاصل از تهاجم چرخه‌های (انجماد- ذوب)

در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ملات را که تحت چرخه‌های (انجماد- ذوب) قرار گرفتند، بررسی می‌کنیم.

#### ۴-۱ مقاومت فشاری

شدت تخریب با اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های ملات پوزولان فعال شده و نمونه‌های ملات مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۳) مقاومت فشاری نمونه‌ها را قبل و بعد از چرخه‌های (انجماد- ذوب) متوالی نشان می‌دهد. قابل ذکر است که مقاومت فشاری صفر در این نمودار معرف نمونه‌هایی است که کاملاً منهدم شده‌اند. با افزایش تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب) در نمونه‌های مرجع و نمونه‌های پوزولان فعال شده مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نمونه‌های ملات پوزولان فعال شده بعد از اعمال ۷۵ چرخه (انجماد- ذوب) به طور کامل تخریب شدند. نتایج مربوط به درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در برابر چرخه‌های (انجماد- ذوب) در جدول (۴) قابل مشاهده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد سیمان پرتلند نوع ۲ پس از اعمال ۲۰۰ چرخه (انجماد- ذوب)، ۱۷/۴٪ کاهش مقاومت نشان داده است، در حالی که این کاهش برای نمونه‌های پوزولان فعال شده پس از ۷۵ چرخه (انجماد- ذوب)، ۱۰۰٪ بوده است.

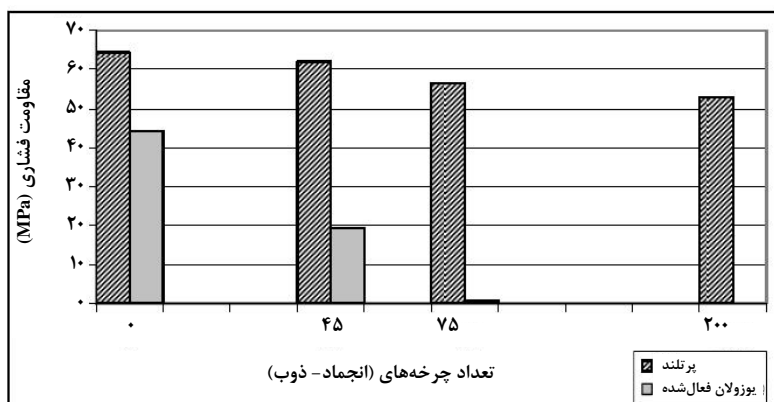
#### ۴-۲ حجم کل تخلخل باز

روند افزایش حجم کل تخلخل باز با افزایش چرخه‌های (انجماد- ذوب) در نمونه‌های پوزولان فعال شده و نمونه‌های مرجع در جدول (۵) قابل رؤیت است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود، درصد حجم کل تخلخل باز برای نمونه‌های پوزولان فعال شده قبل از اعمال چرخه‌های (انجماد- ذوب)، بیشتر از نمونه‌های مرجع است. این درصد تخلخل بالا برای نمونه‌های پوزولان فعال شده به این دلیل است که آب مصرفی در ساخت این نمونه‌ها تماماً در واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی وارد نمی‌شود و این آب واکنش نداده حجم تخلخل باز را بالا می‌برد. علاوه بر این در نمونه‌های مرجع، بخشی از هیدروکسید کلسیم کربناته می‌شود و در نواحی سطحی رسوب می‌کند که باعث کاهش نفوذ پذیری می‌شود. در حالی که در نمونه‌های ملات پوزولان فعال شده، هیدروکسید کلسیم بسیار کمتری حضور دارد که نمی‌تواند نماینده نمونه‌های مرجع با ترسیب کلسیت باعث کاهش نفوذپذیری گردد.

#### جدول ۴- کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در برابر

#### چرخه‌های (انجماد- ذوب)

تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب)	آزمونه‌های مرجع (درصد)	آزمونه‌های پوزولان فعال شده (درصد)
۴۵	۳/۳	۵۶/۳
۷۵	۱۲/۱	۱۰۰
۲۰۰	۱۷/۴	-



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های (انجماد- ذوب)

جدول ۵- روند تغییرات حجم کل تخلخل باز با افزایش چرخه‌های (انجماد- ذوب)

تعداد چرخه های (انجماد - ذوب)	آزمونه‌های مرجع (درصد حجمی)	آزمونه‌های پوزولان فعال شده (درصد حجمی)
۰	۱۴/۸	۲۱/۴
۴۵	۱۵/۰	۲۴/۴
۷۵	۱۵/۸	۲۴/۸
۲۰۰	۱۷/۶	-

#### ۵- نتایج حاصل از تهاجم (نمک- یخ)

برای بررسی عملکرد پوزولان طبیعی فعال شده و سیمان پرتلند مرجع در برابر تهاجم (نمک- یخ)، میزان پوسته شدن آزمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. جدول‌های (۷) و (۸) میانگین پوسته شدن آزمونه‌های مرجع و پوزولان فعال شده را بعد از اعمال ۵۰ چرخه (انجماد- ذوب) در برابر غلظت‌های متفاوت (۱/۵٪، ۳٪ و ۴/۵٪) محلول کلرید کلسیم را نشان می‌دهند. از نتایج فوق می‌توان استنباط کرد که در هر دو آزمون با افزایش تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب) میزان پوسته شدن می‌یابد، ولی میزان پوسته شدن برای آزمونه‌های پوزولان فعال شده به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از آزمونه‌های مرجع است.

هنگامی که دمای آزمونه‌ها پایین می‌آید، یخبندان به تدریج آغاز می‌شود. بر اثر افزایش حجم یخ، خمیر سیمان در معرض فشار بلوری شدن قرار می‌گیرد. اگر این فشار آزاد نشود، باعث ایجاد تنش‌های کششی داخلی می‌شود. این امر سبب ایجاد گسیختگی‌های موضعی در آزمونه‌ها می‌گردد و به مرور افزایش حجم کل تخلخل باز آزمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب) را به دنبال خواهد داشت. در هنگام ذوب شدن، انبساطی که به وسیله یخ ایجاد شده است، در آزمونه باقی می‌ماند به طوری که در مرحله ذوب شدن فضای بیشتری برای جذب آب وجود خواهد داشت. در نتیجه در انجماد بعدی انبساط بیشتری رخ می‌دهد و تخریب، شدت می‌یابد. بنابراین تناوب یخ زدن و ذوب شدن آثار تجمعی به دنبال خواهند داشت.

جدول ۶- میزان جذب آب در چرخه‌های (انجماد- ذوب)

تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب)	آزمونه‌های سیمان مرجع (درصد وزنی)	آزمونه‌های پوزولان فعال شده (درصد وزنی)
۰	۷/۰	۱۰/۶
۴۵	۷/۹	۱۲/۵
۷۵	۷/۹	۱۳/۵
۲۰۰	۹/۹	-

#### ۳-۴ جذب آب

از دیگر پارامترهایی که می‌توان به وسیله آن دوام آزمونه‌های پوزولان فعال شده و مرجع را در برابر یخبندان بررسی کرد، درصد جذب آب آزمونه‌ها بعد از اعمال چرخه‌های (انجماد- ذوب) است. جدول (۶) نتایج آزمایش درصد جذب آب آزمونه‌های حاصل از میانگین سه آزمایش را بعد از اعمال چرخه‌های (انجماد- ذوب) متوالی نشان می‌دهد. جدول مذکور نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب)، میزان جذب آب آزمونه‌ها یا به عبارت دیگر تخریب آن‌ها افزایش می‌یابد. میزان جذب آب بیشترینز تاییدکننده شدت بیشتر تخریب در آزمونه‌های ملات پوزولان طبیعی فعال شده است.

مقایسه جدول‌های (۷) و (۸) گویای این است که برای آزمونه‌های مرجع و همچنین آزمونه‌های پوزولان فعال شده بیشترین پوسته شدن در غلظت ۳ درصد کلرید کلسیم اتفاق می‌افتد. مطالعات قبلی

چرخه‌های (انجماد- ذوب) از عملکرد بدتری برخوردار است. مقاومت فشاری آزمون‌های ملات پوزولان فعال شده پس از اعمال ۷۵ چرخه (انجماد- ذوب) تا ۱۰۰٪ کاهش یافت، در حالی که آزمون‌های ملات سیمان پرتلند معمولی پس از اعمال ۲۰۰ چرخه (انجماد- ذوب) تنها ۱۷/۳۸٪ افت مقاومت فشاری نشان دادند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری حجم تخلخل باز و میزان جذب آب نیز تأییدکننده شدت بیشتر تخریب در آزمون‌های ملات پوزولان طبیعی فعال شده است. اهمیت افزایش در جذب آب نیز کمتر از اهمیت کاهش مقاومت فشاری نیست، زیرا منشأ بسیاری تنش‌های ناشی از فشار بلوری شدن به دلیل افزایش تخلخل و جذب رطوبت از محیط اطراف است و این امر به معنای عملکرد بدتر پوزولان فعال شده است. همچنین پوسته شدن بیشتر آزمون بتن پوزولان فعال شده نیز گویای مقاومت کمتر این چسباننده در برابر تهاجم (نمک- یخ) در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی است. برای آزمون‌های مرجع و آزمون‌های پوزولان فعال شده بیشترین پوسته شدن در غلظت ۳ درصد کلرید کلسیم صورت می‌گیرد.

نشان می‌دهند که هنگامی که لایه یخ روی سطح مواد ایجاد می‌شود، در اثر کاهش دما یخ منقبض می‌شود و ترک‌ها بر اثر کاهش دما به وجود می‌آیند. ترک‌های ایجاد شده در یخ باعث تشکیل تنش‌های برشی می‌شوند و این تنش‌ها در راستای ترک امتداد یافته و به نواحی سطحی بتن نیز اعمال می‌شوند. بر اثر این تنش‌ها بتن ترک می‌خورد و قطعات مواد از هم جدا می‌شوند. از آنجا که پوزولان فعال شده خمیر ضعیف تری دارد، در اثر تنش‌های برشی پوسته شدن پوزولان فعال شده بیشتر می‌شود. در غلظت‌های پایین تر از حد پسیمم (۱/۵٪) تنش تولید شده قادر به ایجاد ترک‌های کمی در یخ می‌باشد، زیرا مقاومت کششی یخ زیاد است. در غلظت‌های بالاتر از حد پسیمم (۳٪) نیز تنش‌هایی به وجود می‌آید که فقط برای ترک لایه یخ کافی است، زیرا در این غلظت‌ها استحکام لایه یخ کاهش می‌یابد و در نتیجه نیرویی که لایه یخ به مواد سیمانی وارد می‌کند نیز کاهش می‌یابد و مجدداً شدت تخریب کمتر می‌شود [۹-۶].

جدول ۷- میزان پوسته شدن آزمون‌های مرجع در برابر

محلول کلرید کلسیم

تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب)	محلول ۱/۵٪ (kg/m <sup>2</sup> )	محلول ۳٪ (kg/m <sup>2</sup> )	محلول ۴/۵٪ (kg/m <sup>2</sup> )
۵	۰/۳۶	۰/۶۴	۰/۴۲
۲۵	۰/۶۴	۱/۱۱	۰/۸۴
۵۰	۱/۲۶	۲/۷۹	۲/۱۱

مراجع

- [1] Scherer G.W., Valenza J.J., "Mechanisms of frost damage", Materials Science of Concrete, vol. VII, American Ceramic Society, 209-246, (2005).
- [2] Coussy O., Monteiro P.J.M., "Poroelastic model of concrete exposed to freezing temperatures", Cement and Concrete Research, 38(1), 40-48, (2008).
- [3] Schlangen E., Garboczi E.J., "Fracture simulations of concrete using lattice models: computational aspects", Engineering Fracture Mechanics, 57, 319-332, (1997).
- [4] Allahverdi A., Rahmani A., "Chemical Activation of natural pozzolan with a solid compound activator", Cement, Wapno, Beton, Vol. XIV/LXXVI(4), 205-213, (2009).
- [5] Allahverdi A., Ghorbani J., "Chemical activation and set acceleration of lime-natural pozzolan cement", Ceramics-Silikaty, 50, 193-199, (2006).
- [6] Çopuroğlu O., Schlangen E., "Modeling of frost salt scaling", Cement and Concrete Research, 38, 27-39, (2008).
- [7] Valenza J.J., Scherer G.W., "A review of slat scaling: I. Phenomenology", Cement and Concrete Research, 37(7), 1007-1021, (2007).
- [8] Valenza J.J., Scherer G.W., "A review of slat scaling: II. Mechanism", Cement and Concrete Research, 37(7), 1022-1034, (2007).
- [9] Persson B., "Internal front resistance and salt-frost scaling of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, 33(3), 373-379, (2003).

جدول ۸- میزان پوسته شدن آزمون‌های پوزولان فعال شده در

برابر محلول کلرید کلسیم

تعداد چرخه‌های (انجماد- ذوب)	محلول ۱/۵٪ (kg/m <sup>2</sup> )	محلول ۳٪ (kg/m <sup>2</sup> )	محلول ۴/۵٪ (kg/m <sup>2</sup> )
۵	۱/۱۳	۱/۹۱	۱/۳۴
۲۵	۵/۶۶	۸/۵۷	۶/۹۰
۵۰	۹/۶۰	۱۱/۷۰	۱۰/۵۵

۶- نتیجه‌گیری

پوزولان طبیعی فعال شده نسبت به سیمان پرتلند نوع ۲ در برابر