

## اثر حباب‌های هوا در پدیده پوسته‌پوسته شدن بتن‌های حاوی سیمان‌های مرکب در مجاورت نمک و در سرما

علی‌اکبر رمضانیاپور\*<sup>۱</sup>، محسن جعفری ندوشن<sup>۲</sup> و منصور پیدایش<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر و رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>۳</sup> مربی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

روسازی‌های بتنی علاوه بر تحمل مداوم بارهای ترافیکی سبک و سنگین، در شرایط آب و هوایی مختلف نیز قرار دارند. پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک، یکی از مسائل مرتبط با دوام بتن و روسازی‌های بتنی است به همین دلیل تلاش‌های زیادی برای تحقیق در این زمینه در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک، یک خرابی سطحی است که در اثر یخ‌زدن یک محلول حاوی نمک روی سطوح سیمانی ایجاد می‌شود. این خرابی پیشرونده بوده و شامل جدا شدن پولک‌ها و ذرات کوچک از سطح بتن است. در این تحقیق به بررسی عملکرد بتن‌های ساخته شده از سیمان تپ ۲ و مرکب با حباب‌های هوا وارد شده و بدون حباب هوا در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک پرداخته و روی مکانیزم‌های پیشنهاد شده، بحث شده است. نتایج بازرسی چشمی و میزان افت وزن در واحد سطح ناشی از آزمایش پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک، برای هر ۵ سیکل ذوب و انجماد در مقاله نشان داده شده است. از مطالعات و کارهای انجام شده در این تحقیق نتیجه می‌شود که مقاومت لایه سطحی بتن در مقابل پوسته‌پوسته شدن نقش مهمی را ایفا می‌کند. حباب‌های هوا وارد شده در بتن باعث کاهش آب‌انداختگی و در نتیجه افزایش مقاومت سطح می‌شود. بنابراین حباب هوا در بتن، مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک را بهبود می‌بخشد. نتایج نشان می‌دهد که در طرح‌های بدون حباب هوا، عملکرد سیمان پرتلند نوع ۲ از سیمان مرکب، در آزمایش پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک مناسب‌تر بوده و بهترین عملکرد، مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان مرکب دارای حباب هوا است. نتایج حاصل از آزمایش پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک برای تمامی طرح‌ها می‌تواند بصورت برازش خطی مدل شود.

**واژگان کلیدی:** پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک، حباب‌های وارد شده، سیکل ذوب و انجماد، روسازی بتنی.

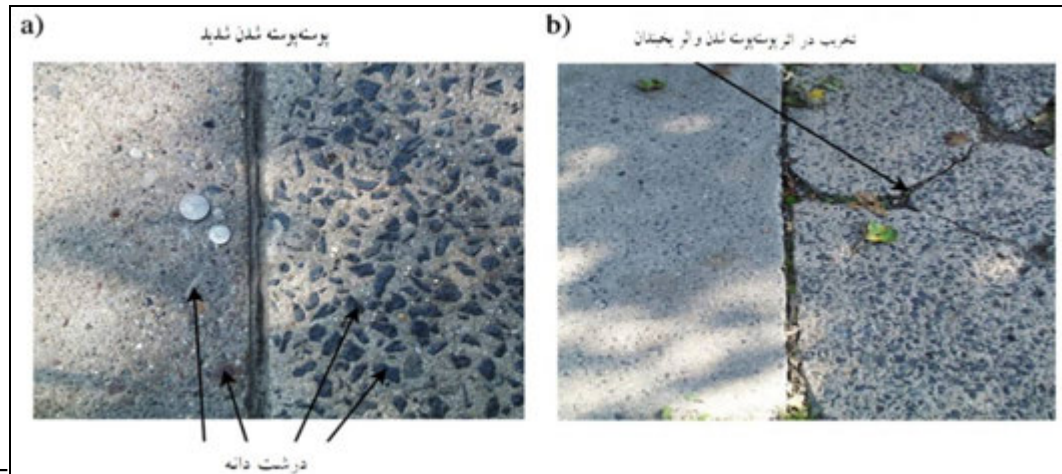
### ۱- مقدمه

در آب و هوای سرد، از نمک‌های  $\text{CaCl}_2$  و  $\text{NaCl}$  بطور منظم و مکرر برای یخ‌زدایی روسازی‌ها و پیاده‌روهای بتنی استفاده می‌شود. این عمل به پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک، که یکی از مسائل اصلی دوام بتن در این شرایط آب و هوایی است، منجر می‌گردد.

پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک یک خرابی سطحی است که به علت یخ‌زدن یک محلول نمک روی سطوح سیمانی است (شکل (۱)). این خرابی پیشرونده است و شامل جدا شدن پولک‌ها و ذرات کوچک از سطح بتن است. این مشخصات برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ توسط کارهای آزمایشگاهی [۲] و [۳] نشان داده شد و پس از آن از طریق آزمایش‌های کارگاهی تأیید شد [۴]. این خرابی با نمایان شدن درشت‌دانه‌ها به حداکثر شدت می‌رسد.

در بررسی‌های بعمل آمده نشان داده شد که بیشترین میزان خرابی با یک میزان متوسط از غلظت نمک رخ می‌دهد.

بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. مواد اولیه تولید بتن تقریباً در همه جای دنیا وجود دارد بنابراین نسبتاً ارزان قیمت است. اما بتن در معرض جنبه‌های متعدد خرابی قرار دارد که این مسئله باعث تحمیل هزینه‌های نگهداری زیادی می‌شود. بعنوان مثال تعمیر زیرساخت‌های بتنی در ایالات متحده، هزینه تقریبی پنجاه بلیون دلار در سال را به همراه دارد. علاوه بر هزینه ساخت جاده‌ها، پل‌ها و ترمینال‌های جدید با بتن، سالانه ۱۰۰ بلیون دلار تخمین زده می‌شود [۱]. واضح است که بهبود دوام بتن اثرات اقتصادی و اجتماعی مهمی را بدنبال دارد. در طول ۵ دهه گذشته، استفاده از مواد پوزولانی افزایش چشمگیری داشته است. استفاده از انواع پوزولان‌ها بعنوان ماده جایگزین سیمان در بتن، علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱- (a) پوسته پوسیده شدن پیاده روی بتنی در مجاورت نمک. (b) از بین رفتن پیوستگی مکانیکی در اثر پوسته پوسیده شدن [۲۶]

شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند نوع ۲ بکار رفته برای ساخت نمونه‌ها با استاندارد شماره ۳۸۹ ملی ایران انطباق دارد.

سیمان مرکب مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها از طریق مخلوط کردن و آسیاب کردن ۸۰ درصد کلینکر سیمان پرتلند همراه با مجموعاً ۱۸ درصد پوزولان توف و سنگ آهک ویژه و حدود ۲ درصد سنگ گچ تولید شده است. پوزولان توف و سنگ آهک ویژه همراه با کلینکر سیمان در کارخانه آسیاب شده است. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی سیمان مرکب مصرفی با استاندارد شماره ۱-۱۱۵۷۱ ملی ایران (سیمان پرتلند مرکب-ویژگی‌ها) انطباق دارد.

در جدول (۱) مشاهده می‌شود که سطح مخصوص سیمان مرکب از سطح مخصوص سیمان پرتلند نوع ۲ بیشتر است. بیشتر بودن سطح مخصوص سیمان مرکب حکایت از آن دارد که پوزولان توف و سنگ آهک ویژه باعث تسهیل عمل آسیاب کردن کلینکر می‌شود و علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید سیمان، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان می‌گردد. گیرش اولیه و نهایی این دو نوع سیمان نزدیک بهم بوده و تفاوت چندانی ندارند. همانطور که انتظار می‌رود، گیرش سیمان مرکب بدلیل وجود پوزولان توف و سنگ آهک ویژه کمی به تأخیر می‌افتد. در شکل (۲) مقاومت فشاری نمونه‌های ملات استاندارد، حاوی سیمان‌های پرتلند نوع ۲ و مرکب در سنین مختلف مقایسه شده است.

این غلظت متوسط تقریباً برابر با ۳٪ وزنی است (محلول ۳٪ وزنی نمک).

پوسته پوسیده شدن بتن در مجاورت نمک به تنهایی باعث تخریب یک سازه نمی‌شود. این خرابی باعث تسریع ورود مواد مهاجم مانند یون کلرید و افزایش درجه اشباع بتن می‌گردد. ورود یون کلرید باعث خوردگی آرماتور می‌شود [۷-۵]، در حالی که افزایش درجه اشباع باعث کاهش مقاومت به دلیل اثر یخندان داخلی می‌گردد [۱۰-۸]. این دو اثر باعث کاهش عمر مفید بتن می‌شوند. صدها مطالعه آزمایشگاهی و کارگاهی مشخصه‌های پوسته پوسیده شدن بتن در مجاورت نمک را شناسایی کرده‌اند، اما علت این خرابی بیان نشده است.

در این تحقیق به بررسی عملکرد بتن‌های ساخته شده با سیمان تپ ۲ و مرکب با حباب هوای وارد شده و بدون حباب هوا در برابر پوسته پوسیده شدن بتن در مجاورت نمک پرداخته و روی مکانیزم‌های پیشنهاد شده، بحث شده است. در ادامه مشخصات مصالح و طرح‌های اختلاط بتن و روش‌های آزمایش بیان شده و سپس نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آنها ارائه می‌گردد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد مصرفی

#### ۲-۱-۱- مواد سیمانی

مواد سیمانی بکار رفته در ساخت نمونه‌ها شامل سیمان پرتلند نوع ۲ و مرکب می‌باشد. در جداول (۱) و (۲) مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد سیمانی مصرفی در این پروژه، براساس آزمایش‌های انجام شده روی آنها بیان شده است. مشخصات

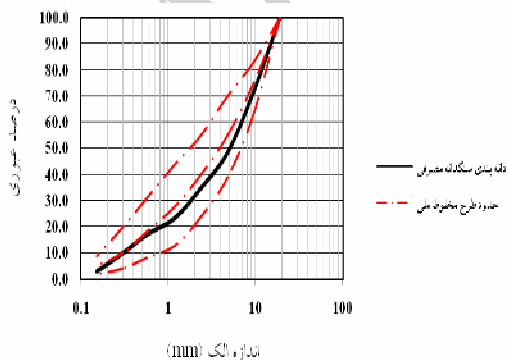
جدول ۱- مشخصات شیمیایی مواد سیمانی مصرفی

اجزاء و ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی		اجزاء و ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی	
	سیمان نوع ۲	سیمان مرکب		سیمان نوع ۲	سیمان مرکب
C <sub>۲</sub> S	۴۹/۴۱	-	CaO	۶۲/۴	۵۹/۲۳
C <sub>۳</sub> S	۲۲/۸۳	-	SiO <sub>۲</sub>	۲۱/۰۷	۲۴/۴۷
C <sub>۲</sub> A	۷/۰۷	-	MgO	۲/۸۹	۲/۱۳
C <sub>۳</sub> AF	۱۱/۰۸	-	Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۴/۹۹	۵/۵۴
LOI (کسر وزن در اثر سرخ شدن)	۲/۰۲	۶/۲	Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۳/۶۴	۳/۲۸
نامحلول در اسید	۰/۴۷	-	SO <sub>۳</sub>	۲/۳۱	۱/۶۷
آهک آزاد	۱/۰۵	۰/۹۸	K <sub>۲</sub> O	۰/۶۵	۰/۸

طبیعی شسته با مدول نرمی ۳/۱ و شن مصرفی، شن شکسته با حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلیمتر می‌باشد. مخلوط سنگدانه حاوی ۵۵ درصد ریزدانه، ۱۸ درصد نخودی و ۲۷ درصد بادامی می‌باشد که دانه بندی آن در شکل (۳) آمده است. همانگونه که در این نمودار ملاحظه می‌شود، دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در ناحیه روش طرح مخلوط ملی ایران برای دانه‌بندی با حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلیمتر می‌باشد. مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی در جدول (۳) ارائه شده است.

۲-۱-۳- آب

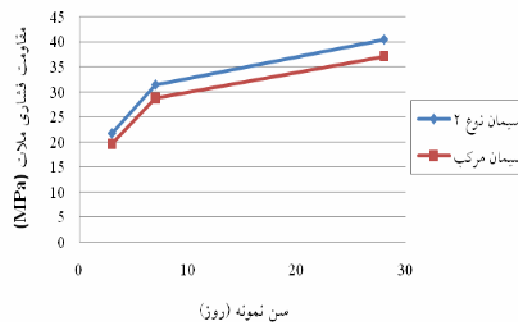
آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی، آب شرب شهر تهران است، که برای ساخت بتن، کیفیت مطلوبی را داراست.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی و محدوده‌های طرح مخلوط ملی برای سنگدانه با حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلیمتر

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مواد سیمانی مصرفی

مشخصات فیزیکی	سیمان تیپ ۲	سیمان مرکب
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۳/۱۳	۲/۹۹
سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)	۳۰۷۸	۳۲۴۰
گیرش اولیه (min)	۱۳۵	۱۴۰
گیرش نهایی (min)	۱۸۷	۱۹۵
مقاومت فشاری ۳ روزه (Kg/cm <sup>2</sup> )	۲۱۷	۱۹۶
مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm <sup>2</sup> )	۳۱۴	۲۸۷
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm <sup>2</sup> )	۴۰۴	۳۷۰
انقباض اتوکلاو (%)	۰/۱۶	۰/۱۴



شکل ۲- مقایسه مقاومت فشاری ملات حاوی سیمان‌های نوع ۲ و مرکب

۲-۱-۲- سنگدانه

سنگدانه مصرفی در این پروژه آزمایشگاهی، از یکی از معادن مصالح سنگی در شهریار کرج تأمین گردید. ماسه مصرفی، ماسه

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی

سنگدانه	چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )	جذب آب (%)	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی مخلوط سنگدانه
ماسه	۲/۵۷	۲/۳	۱۹ میلی‌متر	۴/۹
شن	۲/۵۶	۱/۷۵		

روسازی بتنی با قالب ثابت به بتنی با اسلامپ ۵۰ تا ۹۰ میلی‌متر نیاز است. همچنین نسبت آب به سیمان بسته به شرایط آب و هوایی مختلف متغیر و کمتر از ۰/۴۵ پیشنهاد شده است. مقدار حباب هوای موجود در بتن برای شرایط آب و هوایی مختلف متفاوت است. براساس استاندارد ACI2012r-01 درصد حباب هوای موردنیاز در بتن برای شرایط شدید در معرض سیکل‌های ذوب و انجماد (روسازی‌های بتنی، عرشه پل‌ها، مخازن آب و ...) برای بتن ساخته شده با ماکزیمم اندازه سنگدانه برابر با ۱۹ میلی‌متر، ۶ درصد در نظر گرفته می‌شود.

براساس پارامترهای در نظر گرفته شده اولیه و روش گام به گام ارائه شده در راهنمای طرح مخلوط ملی و پس از ساختن مخلوط‌های آزمایشی اولیه جهت دستیابی به مقدار حباب هوا، اسلامپ و مقاومت فشاری مناسب و مصرف حداقل مقدار سیمان جهت کاهش هزینه‌های طرح اختلاط، نهایتاً پارامترهای ارائه شده در جدول (۴) برای طرح‌های اختلاط بتن بدون حباب هوا و با حباب هوا در این پروژه برگزیده شد.

### ۳-۲- ساخت نمونه‌ها و روش آزمایش

#### ۳-۳-۱- ساخت نمونه‌ها

همانطور که بیان شد، در این پروژه ۴ طرح اختلاط شامل بتن با حباب هوا و بدون حباب هوا به ترتیب با نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۳۷، ۰/۴) و با دو نوع سیمان مختلف (سیمان تیپ ۲ و مرکب) ساخته شد. برای ساخت نمونه‌ها از مخلوط کن ۶۰ لیتری پره‌ای استفاده شد. پس از اختلاط کامل بتن و بدست آوردن مخلوط یکنواخت، آزمایش اسلامپ بر روی تمام مخلوط‌های ساخته شده طبق استاندارد ASTM C143 انجام می‌گرفت. پس از انجام آزمایش اسلامپ، آزمایش تعیین درصد حباب هوای موجود در بتن تازه مطابق با استاندارد ASTM C231، روی طرح‌های با حباب هوا، انجام شد. در صورت مناسب بودن کارایی (اسلامپ بین ۵۰ تا ۹۰ میلی‌متر)، بتن در قالب‌های آماده شده ریخته می‌شد. تراکم بتن در قالب‌ها با استفاده از ویبره صفحاتی انجام می‌شد. پس از قالب‌گیری و تراکم بتن تازه، روی نمونه‌ها گونی خیس و نایلون کشیده می‌شد تا شرایط اشباع برای شروع عمل‌آوری تأمین گردد.

### ۴-۱-۲- مواد افزودنی شیمیایی

مواد افزودنی شیمیایی مصرفی در این پروژه شامل مواد هواساز و فوق روان کننده می‌باشند.

#### ۴-۱-۲-۱- مواد حباب هواساز

مواد حباب هواساز، متداول‌ترین مواد افزودنی هستند که در بتن‌های در معرض یخ زدن و آب شدن مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماده حباب هواساز استفاده شده در ساخت مخلوط‌های با حباب هوا در این پروژه، محلول آبی اسیدهای صابونی می‌باشد. این مایع به رنگ قهوه‌ای کم رنگ بوده و یون کلرید در آن موجود نیست. محدوده مصرف میکروایر ۲۱۰، توسط تولیدکننده ۰/۰۶ تا ۰/۲ درصد وزن سیمان مصرفی عنوان شده است.

#### ۴-۱-۲-۲- فوق روان کننده

در ساخت تمامی مخلوط‌ها از فوق روان کننده نسل سوم با پایه کربوکسیلیک اثر استفاده گردید. این ماده کدر و به رنگ ابری بوده و چگالی آن در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  برابر ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد و مقدار یون کلرید موجود در آن کمتر از ۰/۱ درصد است. علاوه، این فوق روان‌کننده غیر از خاصیت روان‌کنندگی، خاصیت دیگری ندارد و جزو فوق روان‌کننده‌های خنثی محسوب می‌شود.

#### ۴-۲- طرح اختلاط

جهت ارائه طرح اختلاط در این پروژه از روش ملی طرح مخلوط بتن استفاده شد. معیارهای مورد نظر در ارائه طرح اختلاط بتن عبارتند از:

- مقاومت مشخصه (استوانه‌ای  $30\text{ MPa}$ ).

- اسلامپ ۵۰ تا ۹۰ میلی‌متر.

- نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵.

- درصد حباب هوا در بتن سخت شده، در طرح‌های با حباب هوا  $1 \pm 6\%$ .

لازم به ذکر است که مقاومت مشخصه  $30\text{ MPa}$  در اکثر استانداردهای موجود در دنیا برای روسازیهای بتنی به عنوان حداقل مقاومت ۲۸ روزه در نظر گرفته می‌شود. برای اجرای

جدول ۴- طرح‌های اختلاط بتن

نام طرح	مقدار - نوع سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار آب (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار سنگدانه (kg/m <sup>3</sup> ) ssd	کل حباب هوای بتن (%)	نسبت آب به سیمان	نسبت سنگدانه به سیمان	درصد وزن ماده هوازا به وزن سیمان (%)	درصد وزن ماده کاهنده آب به وزن سیمان (%)
A-40-0	375 Type II	۱۵۰	۱۸۰۶	۱/۵	۰/۴	۴/۸	-	۰/۲
B-40-0	375 Composite	۱۵۰	۱۸۰۶	۱/۵	۰/۴	۴/۸	-	۰/۲
A-37-6	375 Type II	۱۳۸	۱۷۲۱	۶	۰/۳۷	۴/۶	۰/۱۳۵	۰/۳
B-37-6	375 Composite	۱۳۸	۱۷۲۱	۶	۰/۳۷	۴/۶	۰/۱۳۵	۰/۳

گذاشته شده و به کمک پارافین درزگیری شده و فضای بوجود آمده توسط

کلرید کلسیم ۴ درصد، به عمق ۶ میلیمتر پر شد. نمونه‌ها به مدت ۱۶ تا ۱۸ ساعت در محیط یخبندان (دمای  $18 \pm 3$  - درجه سانتیگراد) قرار داده می‌شدند و ۶ تا ۸ ساعت در دمای  $21 \pm 3$  درجه سانتیگراد ذوب می‌شدند. مطابق با استاندارد، پس از هر سیکل، بازرسی چشمی انجام می‌شود. پس از هر ۵ سیکل، محلول آزمایش با محلول جدید تعویض می‌شد و تا ۵۰ سیکل این آزمایش ادامه یافت. درجات خرابی بازرسی چشمی براساس استاندارد ASTM C672 بدین قرار است:

۰: هیچگونه پوسته‌پوسته شدن مشاهده نمی‌شود.

۱: پوسته‌پوسته شدن به مقدار بسیار ناچیز مشاهده می‌شود (عمق پوسته‌پوسته شدن حداکثر ۳ میلیمتر و سنگدانه نمایان نیست).

۲: پوسته‌پوسته شدن به مقدار کم تا متوسط مشاهده می‌شود.

۳: پوسته‌پوسته شدن به مقدار متوسط مشاهده می‌شود (مقداری از درشت دانه نمایان است).

۴: پوسته‌پوسته شدن به مقدار متوسط تا شدید مشاهده می‌شود.

۵: پوسته‌پوسته شدن شدید مشاهده می‌شود (درشت دانه در تمام سطح نمایان است).

بتن‌های با درجه خرابی ۳ یا کمتر رضایت بخش در نظر گرفته می‌شوند. افت وزن نمونه‌ها نیز بعد از هر ۵ سیکل اندازه‌گیری شده و بایستی مقدار افت پس از ۵۰ سیکل کمتر از  $0.3 \text{ lb/ft}^2$  ( $1/47 \text{ kg/m}^2$ ) باشد. این آزمایش نیز روش شدیدی محسوب می‌شود و نمونه‌های رد شده در این آزمایش، ممکن است عملکرد مناسبی در شرایط واقعی داشته باشند.

قالب نمونه‌های بتنی، پس از حدود ۲۴ ساعت باز می‌شدند. پس از بازکردن قالب نمونه‌های بتنی و نامگذاری، نمونه‌ها تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع در دمای آزمایشگاه ( $21 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد) عمل‌آوری می‌شدند.

### ۲-۳-۲- روش آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری، متداول‌ترین آزمایش برای ارزیابی نمونه‌های بتنی است. مقاومت فشاری نمونه بتنی می‌تواند شمای کلی از کیفیت بتن را به دست دهد و نمایانگر روند فعالیت‌های سیمانی شدن، کیفیت ماتریس سیمانی بتن و پیوستگی آن با سنگدانه‌ها باشد. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی تمامی نمونه‌های بتنی انجام شد. به منظور بررسی این پارامتر، نمونه‌های بتن مکعبی با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتیمتر ساخته شد که این نمونه‌ها تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند. در هر دوره آزمایش، نمونه‌ها طبق استاندارد ۳۲۰۶ ملی ایران و با استفاده از دستگاه پرس، مورد آزمایش قرار می‌گرفتند.

مقاومت در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک با استفاده از ASTM C672 تعیین می‌شود. براساس استاندارد ASTM C672 نمونه‌های بتنی جهت انجام این آزمایش، باید دارای سطحی بزرگتر از ۴۵۰ سانتیمتر مربع در معرض محلول و سیکل‌های ذوب و انجماد داشته باشند. همچنین حداقل ارتفاع نمونه‌ها در استاندارد، ۷/۵ سانتیمتر عنوان شده است. به همین منظور نمونه‌های بتنی  $7/5 \times 20 \times 30$  سانتیمتر با استفاده از قالب‌های ساخته شده تهیه شد. نمونه‌ها ۱۴ روز در محلول آب آهک اشباع، عمل‌آوری مرطوب و ۱۴ روز در هوای آزاد، عمل‌آوری خشک شدند. سپس برای ایجاد یک حوضچه در سطح بالایی نمونه، یک مانع از جنس یونولیت اطراف این سطح

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

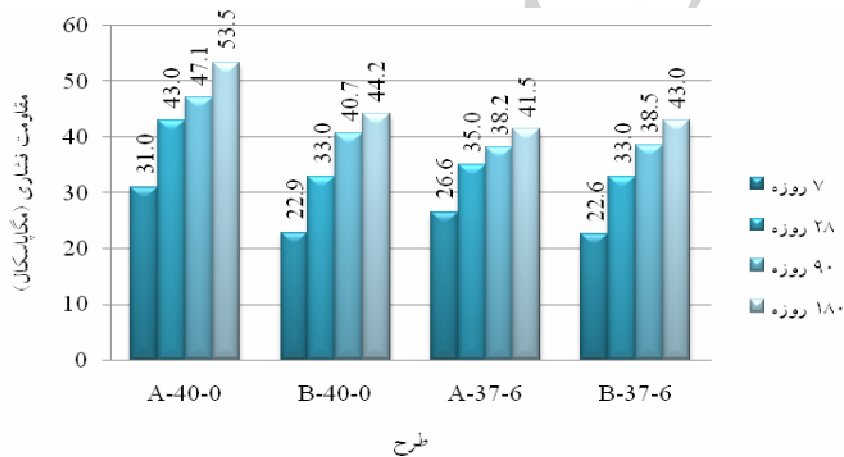
#### ۳-۱- مقاومت فشاری

آهک باشد. بنابراین حباب هوای وارد شده در نمونه‌های بتنی حاوی سیمان مرکب، اثر کمتری روی مقاومت فشاری دارد و این از مزایای سیمان مرکب به شمار می‌رود.

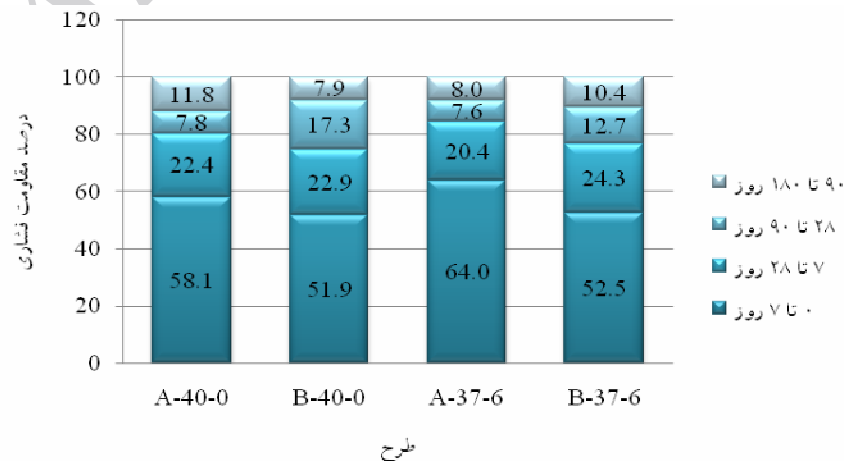
میزان رشد مقاومت فشاری طرح‌های مختلف، در بازه‌های زمانی مختلف، در شکل (۵) نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در بازه زمانی ۷ روز اول، در هر ۴ طرح، بیشترین میزان رشد مقاومت فشاری (در اثر پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون) رخ داده است. به دلیل کاهش سرعت هیدراتاسیون نمونه‌های بتنی حاوی سیمان مرکب، میزان رشد مقاومت فشاری در بازه زمانی ۷ روز اول، کمتر از نمونه‌های بتنی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ است. همچنین به دلیل کندگیر بودن سیمان پرتلند نوع ۲ میزان رشد مقاومت فشاری در بازه زمانی ۲۸ تا ۹۰ روز از میزان رشد مقاومت فشاری در بازه زمانی ۹۰ تا ۱۸۰ روز کمتر است.

شکل (۴) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با طرح‌های اختلاط مختلف این پروژه را در سنین مختلف نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی سیمان مرکب، در سنین ۷ و ۲۸ روز، کمتر از نمونه‌های بتنی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ می‌باشد. علت این پدیده آن است که استفاده از مواد جایگزین سیمان در تولید سیمان مرکب، باعث رقیق‌سازی کلینکر می‌شود و سرعت هیدراتاسیون کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج ارائه شده، ملاحظه می‌شود که کاهش مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی سیمان مرکب کمتر از نمونه‌های بتنی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ است. این پدیده می‌تواند بدلیل پرشدن خلل و فرج موجود در خمیر سیمان و ناحیه انتقال در بتن سخت شده توسط پوزولان توف و سنگ



شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی



شکل ۵- میزان رشد مقاومت فشاری طرح‌های مختلف، در بازه‌های زمانی مختلف

### ۲-۳- مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن در مجاورت نمک

نتایج بازرسی چشمی آزمایش پوسته پوسته شدن در مجاورت نمک، برای هر ۵ سیکل ذوب و انجماد در جدول (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پس از ۵۰ سیکل ذوب و انجماد نمونه حاوی سیمان مرکب با حباب هوای وارد شده کمترین و نمونه حاوی سیمان مرکب بدون حباب هوای وارد شده بیشترین نرخ خرابی را داشته است.

میزان افت وزن در واحد سطح ناشی از آزمایش پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک، برای طرح‌های مختلف، در شکل (۷) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج بازرسی چشمی و میزان افت وزن در واحد سطح با یکدیگر سازگار هستند و تناقضی ندارند.

نتایج بازرسی چشمی و میزان افت وزن نشان می‌دهد که در طرح‌های بدون حباب هوا، عملکرد سیمان پرتلند نوع ۲ از سیمان مرکب، در آزمایش پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک مناسب‌تر بوده است (شکل (۶)). در طرح‌های بدون حباب هوا، پوزولان توف و سنگ آهک، حفرات کوچک (مفید برای کنترل انبساط محلول یخ زده) موجود در بتن سخت شده را پر می‌کند. بنابراین در خمیر سیمان فضای مناسب برای کنترل انبساط محلول یخ زده وجود نداشته و در نتیجه در طرح‌های بدون حباب هوا، عملکرد سیمان مرکب ضعیف‌تر از سیمان پرتلند نوع ۲ بوده است. همچنین در صورت استفاده از مواد جایگزین سیمان، مقدار تقاضای آب کاهش می‌یابد بنابراین نسبت آب به سیمان واقعی برای نمونه‌های بتنی حاوی سیمان مرکب بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ بوده و در نتیجه میزان آب انداختگی افزایش یافته و گیرش اولیه نیز به تأخیر می‌افتد [۱۱]. یعنی مواد جایگزین سیمان در تولید سیمان

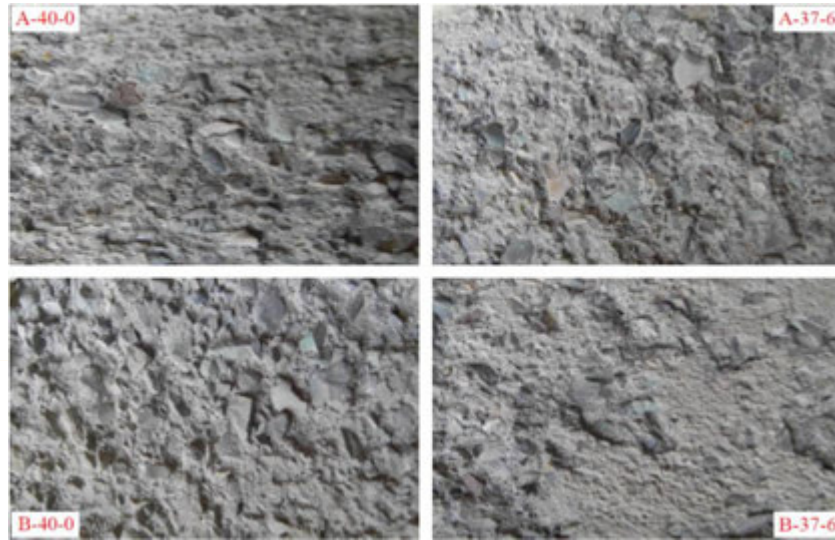
مرکب، بخصوص پودر سنگ آهک، در سنین کم بعنوان یک فیلر عمل کرده‌اند [۱۲]. افزایش میزان آب انداختگی باعث شکل‌گیری سطح بتنی ضعیف‌تر و در نتیجه افزایش میزان خرابی پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک می‌شود. بنابراین در صورت استفاده از مواد جایگزین سیمان، نسبت آب به سیمان باید برای جلوگیری از آب انداختگی بیش از حد محدود شود. کاهش سرعت هیدراتاسیون و کسب مقاومت کمتر نمونه‌های بتنی حاوی سیمان مرکب در سنین اولیه، دلیل دیگری برای عملکرد ضعیف‌تر طرح‌های اختلاط با سیمان مرکب و بدون حباب هوا می‌باشد.

مکانیزم‌های متعددی برای خرابی پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک پیشنهاد شده است. در ابتدا مکانیزم‌های فشار هیدرولیکی و فشار کریستاله شدن مطرح شد. هیچ یک از این دو مکانیزم نمی‌تواند دلیل اصلی پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک باشد و تمامی مشخصات این خرابی را توجیه کند. چندین مکانیزم در مورد نقش نمک در خرابی پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک پیشنهاد شده است. این مکانیزم‌ها شامل کاهش دمای ذوب یخ با وجود نمک و احتمال خرابی ناشی از رسوب نمک در سیستم حفرات و مکانیزم فشار اسمزی است. هیچیک از این مکانیزم‌ها نیز توجیه کننده تمامی مشخصات پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک نیستند [۱۱].

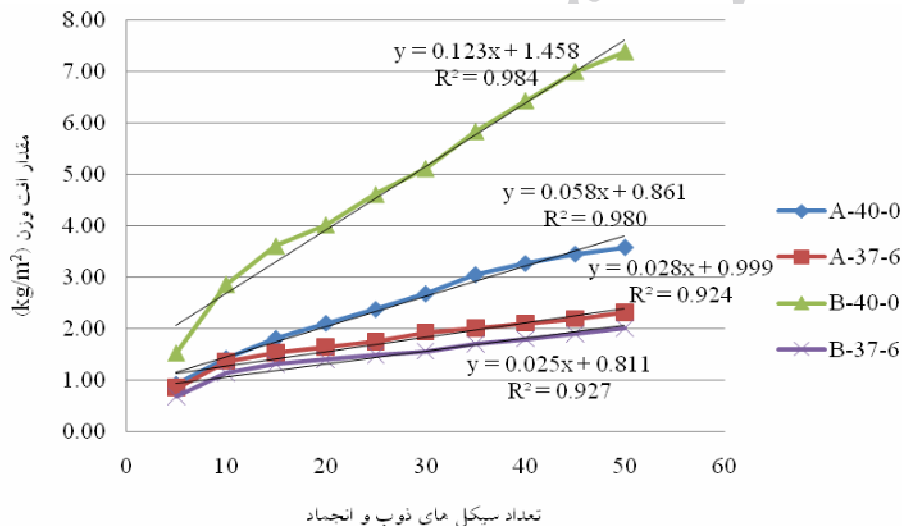
اخیراً، مکانیزم ورقه ورقه شدن ژلی بعنوان عامل اصلی پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک پیشنهاد شده است [۱۳-۱۵]. ورقه ورقه کردن ژلی، روشی برای تزئین سطح شیشه با شکل‌های حلزونی کم عمق است [۱۶ و ۱۷]. روند این کار شامل ماسه‌پاشی سطح شیشه، پخش کردن یک لایه اپوکسی روی سطح در درجه حرارت بالا و کاهش درجه حرارت ترکیب است (شکل (۸)).

جدول ۵- نرخ خرابی پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک برای طرح‌های مختلف براساس استاندارد ASTM C672

نام طرح	شماره نمونه	تعداد سیکل									
		۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
A-40-0	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳
	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
A-37-6	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳
	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
B-40-0	۱	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴
	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴
B-37-6	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲



شکل ۶- خرابی پوسته پوسته شدن نمونه‌های بتنی در مجاورت نمک پس از ۵۰ سیکل ذوب و انجماد



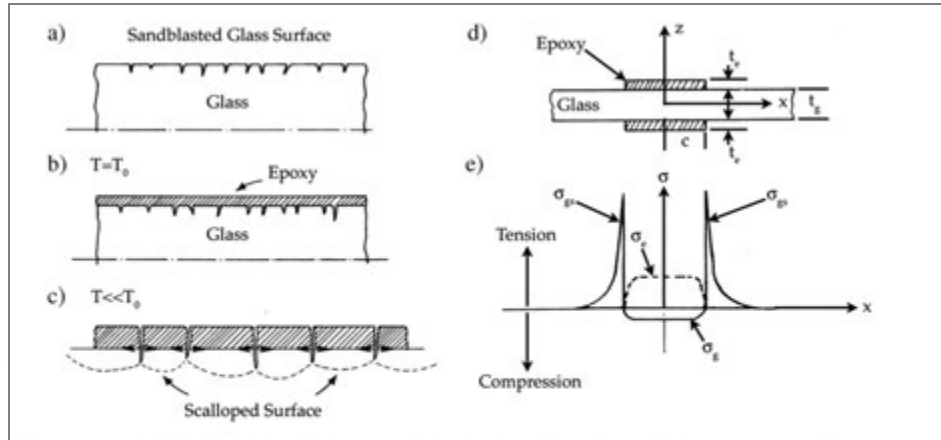
شکل ۷- افت وزن در واحد سطح ناشی از آزمایش پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک، برای طرح‌های اختلاط مختلف

لایه بتنی است [۱۹-۲۱] بنابراین یخ روی سطح بتن نقشی شبیه به اپوکسی دارد. بسته به غلظت محلول، لایه یخ متناظر، تحت اثر کشش وارد شده بر آن توسط لایه بتنی زیرین، ترک می‌خورد. ترک‌های لایه یخ تمایل به نفوذ به لایه سیمانی زیرین و در نتیجه انتشار به محل تماس دولایه و جد کردن ذرات پولکی از سطح بتن را دارند.

نتایج ارائه شده در جداول (۵) و (۶) و شکل (۷) نشان می‌دهد که حباب هوای وارد شده در بتن، مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک را بهبود می‌بخشد.

با کاهش دما تمایل اپوکسی به انقباض، بیش از شیشه است که این تمایل باعث ایجاد کشش در لایه شیشه می‌شود. سرانجام اپوکسی به قسمت‌های کوچکی شکسته می‌شود. تنش کششی در پیرامون این قسمت‌ها در شیشه بوجود می‌آید (شکل (۸- $\sigma_{gs}$ )). این تنش باعث ایجاد ترک‌هایی در سطح شیشه و جد شدن ذرات نازک شیشه از سطح می‌شود. هنگامی که محلول نمک روی سطح بتن یخ می‌زند، یک ترکیب دو ماده‌ای بتن/ یخ تشکیل می‌شود. هنگامیکه دمای ترکیب در زیر نقطه ذوب محلول کاهش می‌یابد، تمایل لایه یخ به انقباض، ۵ برابر تمایل





شکل ۸- (a تا c) شماتیکی از مکانیزم ورقه‌ورقه شدن ژلی: (a) ماسه‌پاشی سطح شیشه. (b) ترکیب شیشه- اپوکسی در دمای اولیه. (c) سطح مشترک ترکیب، نشان دهنده قسمت‌های جداگانه اپوکسی و حلزونی‌های کوچک جدا شده از شیشه در اثر کاهش دما. (d و e) تنش‌های بوجود آمده در ترکیب: (d) اندازه‌ها و نحوه قرارگیری ترکیب. (e) طرح شماتیکی از تنش‌ها، تنش در سطح شیشه ( $\sigma_g$ ) تنش در سطح اپوکسی ( $\sigma_s$ )، تنش ورقه‌ورقه شدن ژلی در اطراف اپوکسی ( $\sigma_{gs}$ )

جدول ۶- مقدار افت وزن نمونه‌های بتنی در واحد سطح در هر ۵ سیکل ذوب و انجماد

سیکل	مقدار افت وزن ( $kg/m^2$ )			
	A-40-0	A-37-6	B-40-0	B-37-6
۰ تا ۵	۰/۹۳	۰/۸۵	۱/۵۴	۰/۶۸
۵ تا ۱۰	۰/۵۰	۰/۵۲	۱/۳۳	۰/۴۶
۱۰ تا ۱۵	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۷۴	۰/۱۷
۱۵ تا ۲۰	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۴۱	۰/۰۸
۲۰ تا ۲۵	۰/۲۷	۰/۱۱	۰/۵۹	۰/۰۹
۲۵ تا ۳۰	۰/۳۰	۰/۱۸	۰/۵۰	۰/۰۸
۳۰ تا ۳۵	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۷۲	۰/۱۵
۳۵ تا ۴۰	۰/۲۲	۰/۱۰	۰/۶۰	۰/۰۹
۴۰ تا ۴۵	۰/۱۸	۰/۰۹	۰/۵۶	۰/۱۰
۴۵ تا ۵۰	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۱۱
میانگین سیکل‌های ۲۰ تا ۵۰	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۵۴	۰/۱۰
واریانس سیکل‌های ۲۰ تا ۵۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱

۳) حباب هوا، میزان نفوذ محلول نمک را به داخل بتن کاهش می‌دهد، زیرا در صورت استفاده از ماده هواساز، حفره‌های بهم پیوسته در بتن سخت شده، کاهش یافته و حفره‌ها بیشتر بصورت جدا از هم در خمیر سیمان شکل می‌گیرند.

حباب هوای وارد شده در بتن، از سه طریق برای مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک مفید است:  
 ۱) حباب هوای وارد شده آب‌انداختگی بتن را کاهش می‌دهد [۲۲].  
 ۲) حباب هوا، فضایی برای ورود یخ است و این یخ مایعات موجود در خلل و فرج ماتریس بتن را می‌مکد.

خواهد شد. همچنین مواد جایگزین سیمان، معمولاً با پرکردن خلل و فرج خمیر سیمان و ناحیه انتقال باعث کاهش تخلخل و افزایش چگالی بتن می‌شوند.

همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از آزمایش پوسته پوسته شدن در مجاورت نمک برای تمامی طرح‌ها، با برازش مناسبی خطی است.

همانگونه که در جدول (۷) نشان داده شده است، در سیکل‌های ذوب و انجماد اولیه بدلیل اثر نحوه آب انداختگی، پرداخت سطح و عمل‌آوری و عواملی از این دست، مقدار افت وزن نمونه‌های بتنی در واحد سطح متغیر است. مقدار افت وزن نمونه‌های بتنی در واحد سطح پس از ۱۵ سیکل اول برای سیکل‌های مختلف تقریباً برابر است و واریانس کمی دارد. آنالیزهای مکانیزم ورقه‌ورقه‌شدن نشان می‌دهد که نفوذ ترک‌ها و عمق آنها در سطح مشترک ترکیب بتن/ یخ، وارد می‌شود، به خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده بستگی دارد. بنابراین اگر خواص سطح بتن تغییر قابل توجهی نداشته باشد، هر سیکل ذوب و انجماد مقدار ثابتی از خرابی را به همراه خواهد داشت.

#### ۴- نتیجه‌گیری

از آنچه گفته شد نتیجه می‌شود که مقاومت لایه سطحی بتن در پوسته‌پوسته شدن آن نقش مهمی را ایفا می‌کند و آب انداختگی پدیده مهمی است که روی مقاومت لایه سطحی بتن تأثیرگذار است. حباب هوای وارد شده در بتن باعث کاهش آب انداختگی و در نتیجه افزایش مقاومت سطح می‌شود. بنابراین حباب هوا در بتن، مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک را بهبود می‌بخشد.

در آزمایش پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک نتایج بازرسی چشمی و میزان افت وزن در واحد سطح با یکدیگر سازگار بوده و تناقضی ندارند. نتایج نشان می‌دهد که در طرح‌های بدون حباب هوا، عملکرد سیمان پرتلند نوع ۲ از سیمان مرکب، در آزمایش پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک مناسب‌تر بوده و بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان مرکب دارای حباب هوا است.

مکانیزم ورقه‌ورقه‌شدن ژلی بعنوان عامل اصلی پوسته‌پوسته شدن بتن در مجاورت نمک، در حال حاضر توجیه کننده علت این خرابی است.

مواد هواساز مختلف باعث تولید سیستم حباب هوای متفاوت با اندازه ذرات حباب و ضریب فاصله متفاوت می‌شوند [۲۲] و رابطه متفاوتی بین آب انداختگی و میزان هوای موجود تولید می‌شود. در صورتی که برای دوری از اثر زیان‌آور آب انداختگی، دقت مناسب در نظر گرفته شود، در این حالت هم حباب هوای وارد شده باعث جلوگیری از پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک می‌شود [۲۳]. در این حالت، حباب هوای وارد شده انبساط یخ را در خود جا داده و کنترل می‌کند. Powers و Helmuth [۲۴] نشان دادند که بتن حاوی حباب هوای وارد شده، به دلیل شکل‌گیری یخ در حفرات آن و مکیدن مایعات موجود در خلل و فرج اطراف، منقبض می‌شود. حباب هوا باعث کاهش آب انداختگی و در نتیجه افزایش مقاومت سطح می‌شود [۲۵ و ۲۶]. بعلاوه در صورت استفاده از عامل حباب هواساز، یخ زدن اولیه در حباب هوا، مکشی را به مایع منفذی اعمال می‌کند که باعث فشرده شدن ساختار حفرات می‌شود. در واقع فشردگی ماتریس تخلخل به دلیل یخ‌زدن در حباب‌های هوا می‌تواند تنش مخرب را کاهش دهد. بنابراین سرد شدن نمونه بتنی حاوی حباب هوا تا دمای  $18^{\circ}\text{C}$  - معادل سرد شدن نمونه بتنی بدون حباب هوا تا دمای حدود  $12^{\circ}\text{C}$  - است.

نفوذ کمتر محلول به داخل بتن حاوی حباب هوا می‌تواند دلیلی برای بهبود خرابی پوسته پوسته شدن نمونه‌های حاوی سیمان مرکب در حضور حباب هوا، نسبت به سیمان پرتلند نوع ۲ باشد. زیرا از طرفی پوزولان توف و سنگ آهک، حفرات بهم پیوسته بتن سخت شده را پر کرده و فضاهای بهم پیوسته را کاهش می‌دهد و نفوذ محلول به داخل بتن کاهش یافته و در نتیجه میزان یخ موجود در داخل بتن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر حباب هوا نیز برای کنترل انبساط محلول یخ زده وجود دارد. در بتن‌های بدون مواد حباب ساز چنانچه از سیمان مرکب استفاده شود مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن کاهش می‌یابد، حال آنکه در بتن‌های با مواد حباب ساز، استفاده از سیمان مرکب منجر به نتایج مناسب‌تری نسبت به سیمان نوع ۲ می‌شود. در همین حال مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بتن‌های بدون مواد حباب‌ساز، اختلاف قابل توجهی دارند ولی در بتن‌های با مواد حباب‌ساز اختلاف مقاومت فشاری بسیار کم است. به همین دلیل می‌توان گفت که مقاومت فشاری پس از حباب هوای وارد شده عامل مهمی در مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در مجاورت نمک می‌باشد. بهبود تثبیت حباب‌های هوا در حضور سیمان مرکب نیز می‌تواند دلیلی برای خرابی کمتر نمونه‌های حاوی سیمان مرکب و حباب هوا باشد که در مقالات آتی بررسی

- ۵- مراجع
- [16] Gulati, S.T., Hagy, H.E., "Analysis and measurement of glue-spall stresses in glass-epoxy bonds", *J. Am. Ceram. Soc.*, 1982, vol 69.
- [17] Gulati, S.T. Hagy, H.E., "Theory of the narrow sandwich seal", *J. Am. Ceram. Soc.*, 1973, vol. 61.
- [18] Scherer, G.W., "Characterization of saturated porous bodies", *Concr. Sci. Eng.*, 2004, vol. 37.
- [19] Ciardullo, J.P. Sweeney, D.J. Scherer, G.W., "Thermal expansion kinetics: method to measure the permeability of cementitious materials: IV. Effect of thermal gradients", *J. Am. Ceram. Soc.*, 2005, vol. 88.
- [20] Pounder, E.R. "Physics of Ice", Pergamon Press, Oxford, 1965.
- [21] Gagnon, R.E. Jones, S.J., Elastic properties of ice, in: M. Levy, H. Bass, R. Stern (Eds.), *Elastic Properties of Solids: Biological and Organic Materials (Chapter 9)*, Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases, vol. III, Academic Press, New York, 2001.
- [22] Bruere, G.M., "Mechanisms by which air-entraining agents affect viscosities and bleeding properties of cement pastes", *Austr. J. Appl. Sci.*, 1958, vol. 9.
- [23] Tremblay, M.-H. Lory, F. Marchand, J. Scherer, G.W. Valenza, J.J., "Ability of the glue spall model to account for the de-icer salt scaling deterioration of concrete", *Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement*, Montreal, Canada, July, 2007.
- [24] Powers, T.C. Helmuth, R.A., "Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing", *Proc. Highw. Res. Board*, 1953, vol. 39.
- [25] Powers, T.C., "The Properties of Fresh Concrete", JohnWiley and Sons, Inc., New York, 1968.
- [26] Marchand, J. Pigeon, M. Boisvert, J. Isabelle, H.L. Houdusse, O., "Deicer salt scaling resistance of roller compacted concrete pavements containing fly ash and silica fume", in: V.M. Malhotra (Ed.), *ACI Special Publication SP-132*, 1992.
- [27] Valenza J.J., Scherer G.W. "A review of salt scaling: I. Phenomenology", *Cem Conc. Res.*, 2007, vol. 37.
- [1] "Nonconventional Concrete Technologies: Renewal of the Highway Infrastructure", National Research Council, NMA-484 (National Academy Press, Washington, DC, 1997).
- [2] Arnfelt, H., "Damage on Concrete Pavements by Wintertime Salt Treatment", *Meddelande*, vol. 66, Statens Väginstytut, Stockholm, 1943.
- [3] Verbeck, G.J. Klieger, P., "Studies of salt scaling of concrete", *Highw. Res. Board. Bull.* 150, 1957.
- [4] Jana, D., "Concrete construction or salt—which causes scaling?", *Concr. Int.*, Nov. 2004.
- [5] Alonso, C. Andrade, C. Castellote, M. Castro, P., "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", *Concr. Res.*, 2000, vol. 30.
- [6] Hime, W.G., "The corrosion of steel — random thoughts and wishful thinking", *Concr. Int.*, Oct. 1993.
- [7] Beckett, D., "Influence of carbonation and chlorides on concrete durability", *Concrete*, Feb. 1983.
- [8] Fagerlund, G., "The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete", *Constr.*, 1977, vol. 10.
- [9] Scherer, G.W., "Crystalization in pores", *Concr. Res.*, 1999, vol. 29.
- [10] Scherer, W.G., Valenza, J.J., "Mechanisms of frost damage", in: J. Skalny, F. Young (Eds.), *Materials Science of Concrete*, vol. VII, American Ceramic Society, 2005.
- [11] Valenza, J.J., Scherer, G.W., "A review of salt scaling: II. Mechanisms", *Cement and Concrete Research*, 2007, vol. 37.
- [12] Tsivilis, S. Chaniotakis, E. Kakali, G. Batis, G., "An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete", *Cement Concrete Comp*, 2002.
- [13] Valenza J.J., "Mechanism for salt scaling, PhD thesis, Princeton University, 2005, [www.jvalenza.com/thesis.html](http://www.jvalenza.com/thesis.html).
- [14] Bird R.B., Stewart W.E., "Lightfoot, Transport Phenomena", Wiley, New York, 1960.
- [15] Valenza, J.J. Scherer, G.W., "Mechanism for salt scaling", *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006, vol. 89.

- Book of ASTM Standards, vol. 04.02, American Society for Testing and Materials
- [32] ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete", ACI 211.1-91, American Concrete Institute, 2002.
- [33] ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", ACI 201.2R-01, American Concrete Institute, 2001.
- [28] "Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals", ASTM Standard C672, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
- [29] Shahin, R. Tasdemir, M.A. Gül, R. Çelik, C., "Determination of the optimum conditions for de-icing salt scaling resistance of concrete by visual examination and surface scaling", Construction and Building Materials, 2009.
- [30] Sun Z., Scherer G.W., "Effect of air voids on salt scaling and internal freezing", Cement and Concrete Research 40, 2010.
- [31] "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method", ASTM Standard C321, Annual

Archive of SID