

# ترکیب میکروسیلیس و افزودنی‌های هوازا و پودرسنگ برای

## افزایش دوام بتن در برابر یخبندان

محمد رضا اصفهانی؛ مهدی هادیزاده بزاز<sup>۱</sup>

چکیده

در این مقاله، اثر ترکیب میکروسیلیس و مواد افزودنی هوازا و پودرسنگ بر دوام بتن مطالعه می‌شود. بدین منظور، تعداد زیادی نمونه‌های بتنی با ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتی متر مطابق با روش B استاندارد ASTM C666 تحت آزمون یخبندان-ذوب یخ قرار گرفت. مقاومت فشاری نمونه‌ها در ابتدا و پس از ۱۵۰ چرخه یخبندان-ذوب یخ اندازه‌گیری و میزان افت مقاومتی آنها مقایسه شد. وزن نمونه‌ها نیز در ابتدا و پس از ۱۵۰، ۳۰۰ و ۳۰۰ چرخه اندازه‌گیری و میزان افت وزن نمونه‌های مختلف مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پودرسنگ، هم در افزایش مقاومت بتن و هم در افزایش مقاومت در برابر یخبندان اثر مطلوب و مؤثری دارد. مواد میکروسیلیس و هوازا در افزایش مقاومت بتن در برابر یخبندان مؤثرند و در صورت استفاده همزمان از این مواد می‌توان دوام نسبتاً خوبی برای شرایط یخبندان فراهم آورد. با دوام‌ترین نمونه‌ها آنهایی هستند که دارای هر سه ماده میکروسیلیس، هوازا و پودرسنگ هستند؛ لیکن اثر پودرسنگ در هر مخلوطی که شامل ماده هوازا است قابل توجه نیست و همچنین ترکیب میکروسیلیس و پودرسنگ هم باعث افزایش دوام در حد بالایی می‌شود.

### کلمات کلیدی

پودرسنگ، چرخه‌های یخبندان-ذوب، دوام بتن، میکروسیلیس، هوازا

## *Combination of Silica Fume and the admixtures of Air Entraining agent and Stone Powder for increasing the Durability of Concrete against Freeze and Thaw Cycles*

M Reza Esfahani ; M. Hadizadeh

### ABSTRACT

This research investigates the effect of combination of silica fume and the Admixtures of air entraining agent and stone powder on durability of concrete against freeze and thaw cycles. To investigate the effect of the admixtures on concrete durability, many standard cubic specimens were manufactured and tested according to ASTM-C666 standard, method B. The compressive strength of the specimens before and after 150 cycles of freeze and thaw were measured and compared. Also, the weight reduction of specimens after 36, 80, 120, 150 and 300 cycles were measured and compared. The results indicate that the admixture of stone powder is effective in increasing the strength and durability of concrete. The combination of silica fume and air entraining agent results in a good durability against freeze and thaw cycles. The best specimens were those which included silica fume and the admixtures of air entraining agent and stone powder. However, the admixture of stone powder is not very effective when it is combined with the air entraining agent. The specimens including silica fume and stone powder had good durability.

<sup>۱</sup> دانشجویار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد: esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

سیمان به تخلخل، اندازه، توزیع و تداوم منافذ مویینه بستگی دارد و منافذ ژلی در آن نقشی ندارند.

وجود منافذ داخلی در سنگدانه‌ها بر خواص آنها تأثیر گذار است. تخلخل، نفوذپذیری و جذب آب سنگدانه‌ها بر خواصی از آنها، مانند چسبندگی به خمیر سیمان، مقاومت بتن در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن و همچنین بر ثبات شیمیایی و مقاومت در برابر سایش آنها تأثیر دارد. از آنجا که در بتن، سنگدانه‌ها با خمیر سیمان احاطه می‌شوند، در صورت تراکم مناسب، نفوذپذیری خمیر سیمان بیشترین اثر را بر نفوذپذیری بتن ایجاد می‌کند. عامل دیگر افزایش نفوذپذیری بتن، ترک خوردگی آن است.

آب موجود در بتن، حاوی نمک‌های گوناگون بوده و نقطه انجماد آن پایین‌تر از نقطه انجماد آب آزاد (صفر درجه) است؛ بعلاوه هر چه اندازه حفره‌های پر از آب کوچک تر باشد عمل یخ‌زدن دیرتر انجام می‌گیرد و درجه حرارتی که در آن آب یخ می‌زند، پایین‌تر خواهد بود. حفره‌های بتن ابعاد کوچک تا بزرگ دارند. از آنجا که حفره‌های ژل بسیارکوچک هستند امکان یخ‌زدن آب در آنها بسیار کم است و یخ‌زدان عمدتاً در حفره‌های مویینه رخ می‌دهد. حفره‌های هوا نیز که در اثر تراکم ناقص به وجود می‌آیند پر از هوا هستند و معمولاً در معرض یخ‌زدگی اولیه قرار نمی‌گیرند.

یخ‌زدن بتن و درجه انجماد آن به عوامل زیر بستگی دارد: (۱) میزان قلیایی موجود در آبی که هنوز یخ نزده، (۲) روند انتقال حرارت از بتن و (۳) اندازه منافذی که آب در آن واقع شده است. یخ‌زدن از بزرگ ترین منافذ شروع می‌شود و به تدریج به منافذ کوچک‌تر گسترش می‌یابد. برخی محققین معتقدند که در منافذ ژل به علت اینکه بسیارکوچک هستند تا دمای ۸۷- درجه سانتی گراد هسته یخی تشکیل نمی‌شود و در نتیجه، در آنها هیچگاه یخ ایجاد نمی‌شود. هنگامی که آب یخ می‌زند افزایش حجمی حدود ۹٪ به وجود می‌آید. با افزایش حجم، آب اضافی به منافذ راه یافته و در اثر حرکت آب در بتن فشار هیدرولیکی بوجود می‌آید که این فشار به مقاومت در برابر جریان آب؛ یعنی به طول مسیر و نفوذپذیری خمیر بین منافذ یخ‌زده و منافذی که بتوانند آب اضافی را در خود جای دهند، بستگی خواهد داشت. اگر این فشار رها نشود می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های کششی داخلی شود به طوری که در بتن گسیختگی‌های موضعی پدید آید. همچنین به دلیل عدم وجود

دوام بتن و از آن جمله مقاومت در برابر یخ‌زدان و ذوب یخ از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در بسیاری از شهرهای کشور؛ که به طور متوسط در هر سال حدود ۵۰ چرخه یخ‌زدان- ذوب یخ دارند، کمبود دوام بتن دلیل اصلی خرابی اکثر جداول، بلوک‌های مصرفی و سایر فرآورده‌های بتنی در پروژه‌های شهری است. معمولاً خرابی ناشی از یخ‌زدان از گوشه‌ها آغاز شده و به تدریج با نفوذ آب به عمق بتن گسترش می‌یابد و به از هم پاشی کل بتن می‌انجامد.

انجام واکنش‌های مخرب در بتن بدون وجود آب ممکن نیست، بنابراین وجود آب در بتن؛ که به نفوذپذیری آن بستگی دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نفوذ آب به داخل بتن تأثیر مهمی بر آسیب پذیری آن در مقابل یخ‌زدگی دارد. این فرایند باعث انبساط و در نتیجه ترک خوردن بتن می‌شود. منافذ موجود در بتن به دو دسته منافذ موجود در خمیر سیمان و منافذ موجود در سنگدانه تقسیم می‌شوند. خمیر سخت شده سیمان از هیدرات‌های با ترکیبات مختلف (ژل)، کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم، برخی ترکیبات جزئی، ذرات سیمان هیدراته نشده و فضاهای خالی پر شده از آب تشکیل می‌شود. به این فضاهای خالی منافذ مویینه می‌گویند. در داخل ژل نیز فضاهایی بین ذرات وجود دارد که منافذ ژلی نامیده می‌شوند.

منافذ مویینه شکل‌های متفاوت دارند و با یکدیگر شبکه مرتبطی را تشکیل می‌دهند که به طور پراکنده در سراسر خمیر سیمان وجود دارند. این منافذ دلیل اصلی نفوذپذیری خمیر سخت شده هستند. راه ارتباط لوله‌های مویینه به وسیله ژل قطع می‌شود؛ بنابراین لوله‌های مویینه فقط از طریق منافذ موجود در ژل به هم ارتباط دارند. عدم وجود لوله‌های مویینه یکسره، معلول نسبت آب به سیمان مناسب و مدت زمان کافی برای عمل آوردن مرطوب است.

منافذ ژلی، منافذ بین ذرات ژل مرتبط به یکدیگر است. ژل مقدار زیادی از آب تبخیر را در داخل خود نگه می‌دارد، بنابراین، ژل ماده متخلخلی است. منافذ ژلی حدود ۲۸٪ کل حجم ژل را تشکیل می‌دهد. این نسبت بدان معنی است که منافذ ژلی فضایی تا حدود یک سوم حجم مواد جامد ژل را اشغال می‌کند. منافذ ژلی بسیار کوچک تر از منافذ مویینه است و قابلیت تحرک آب جذب شده به وسیله آنها با خصوصیات آب آزاد متفاوت است. اگر چه تخلخل ژل سیمان ۲۸٪ است، نفوذپذیری آن حدود  $7 \times 10^{-16}$  می‌باشد. نفوذ پذیری خمیر

تعادل ترمودینامیکی بین آب ژل و یخ، انتشار آب به سمت حفره‌های مویینه باعث رشد یخ شده و فشار هیدرولیکی را افزایش می‌دهد و مانند قبل اگر این فشار رها نشود باعث ایجاد تنش‌های کششی داخلی می‌شود [۱].

عامل مؤثر دیگر، نفوذ و گسترش آب در بتن فشار اسمزی حاصل از افزایش موضعی غلظت مواد محلول است. مواد محلول به علت جدا شدن آب خالص یخ‌زده از محلول غلظتشان، افزایش می‌یابد. این فشار باعث می‌شود آب به طرف سردترین نقطه؛ یعنی جایی که آب یخ می‌زند حرکت کند. انتشار آب به طرف حفره‌های مویینه باعث رشد یخ می‌شود و در نتیجه فشار هیدرولیکی افزایش می‌یابد.

برای به دست آوردن یک بتن با دوام ابتدا بایستی نفوذپذیری بتن را تا حد ممکن کاهش داد تا آب به درون بتن نفوذ نکند و از واکنش‌های مخرب آب از جمله یخبندان جلوگیری به عمل آید. از جمله عواملی که می‌توان به وسیله آن نفوذپذیری را کاهش داد، کاهش نسبت آب به سیمان است [۲]. با کاهش نسبت آب به سیمان، روانی بتن کاهش می‌یابد. برای بهبود این امر به بتن مواد روان کننده افزوده می‌شود.

استفاده از دانه‌بندی با تراکم مطلوب اثر بسزایی در کاهش نفوذپذیری دارد. بتن‌های تهیه شده با مصالح نفوذپذیر و با تراکم نامطلوب ضریب نفوذپذیری بالایی دارند و در برابر چرخه‌های یخبندان-ذوب یخ مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند [۳]. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، دانه‌بندی مصالح استفاده شده در محدوده استاندارد ASTM C33 است و در مواردی به جای مصالح ریزدانه، پودر خاک سنگ افزوده شده است. با جایگزینی مصالح ریزدانه مقاوم؛ مانند پودر خاک سنگ به جای مصالح ریزدانه ماسه که کم و بیش حاوی رس هستند، دوام بتن افزایش می‌یابد.

استفاده از مخلوط‌های پر سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری بتن و همچنین افزایش دوام بتن می‌شود. برای این منظور در آیین‌نامه‌های مختلف از جمله ACI 302.1R-80 [۴] برای به دست آوردن یک بتن بادوام مطلوب مقدار حداکثر برای مقدار سیمان در نظر گرفته شده است.

عامل دیگری که در افزایش مقاومت در برابر یخبندان تأثیر بسزایی دارد مواد هوازا است. این مواد با ایجاد حباب‌های تصادفی فضای کافی برای انبساط آب درون بتن ایجاد می‌کنند و از فشار ایجاد شده ناشی از یخبندان در درون بتن می‌کاهند. استفاده از مواد هوازا بایستی با دقت خاصی در طرح اختلاط و میزان تراکم مخلوط صورت گیرد تا میزان مطلوب حباب هوای تصادفی ایجاد شود [۳].

استفاده از مواد پوزولانی؛ که امروزه در افزایش دوام بتن

در برابر خرابی‌های متفاوت رایج شده است، یکی دیگر از روش‌های افزایش مقاومت بتن در برابر چرخه‌های یخبندان-ذوب یخ است. از جمله این مواد، میکروسیلیس است. این ماده در میان منافذ مویینه نفوذ می‌کند و باعث قطع لوله‌های مرتبط این منافذ می‌شود و با این کار، یک بتن متراکم و با نفوذپذیری پایین ایجاد می‌کند [۵]. این ماده همچنین اثر مطلوبی بر افزایش مقاومت در برابر یخبندان دارد [۶] و [۷].

مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی باعث کاهش نفوذپذیری می‌شوند. لیکن؛ مشاهده شده است که استفاده از این مواد باعث افزایش مصرف مواد هوازا برای رسیدن به مقاومت مناسب در برابر یخبندان می‌شود [۸] و [۹].

## ۲- کار آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد اولیه و مصالح مصرفی در آزمایش‌ها

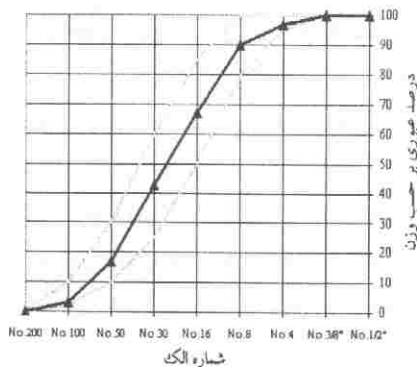
- سیمان: سیمان مصرفی از نوع پرتلند مقاوم در برابر سولفات متوسط (نوع دو) از محصولات مجتمع کارخانجات سیمان شرق می‌باشد. علت استفاده از سیمان نوع ۲ در این تحقیق، کاربری زیاد آن در صنعت بخصوص در مورد پروژه‌های شهری از جمله جداول بتنی است. تولیدات مجتمع کارخانجات سیمان شرق به طور عمده از این نوع سیمان است.

- میکروسیلیس: میکروسیلیس مصرفی با نام تجاری میکروسیلیکا است که با استاندارد ASTM C1240 مطابقت دارد.

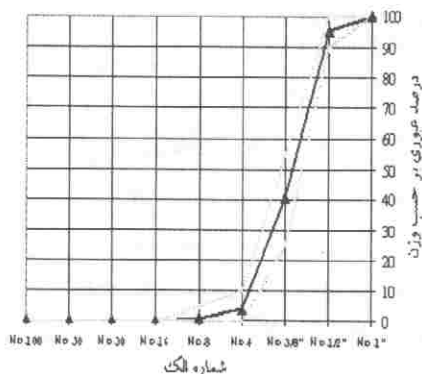
- فوق روان کننده: فوق روان کننده مصرفی از نوع فوق روان کننده نوترال با نام اختصاری 102N از فرآورده‌های شرکت بتن شیمی است. این فوق روان کننده مایع و به رنگ قهوه‌ای تیره و مطابق استانداردهای C494 و ASTM C1017 تهیه شده است. طبق کاتالوگ شرکت بتن شیمی، فوق روان کننده مورد نظر با سیمان و میکروسیلیس سازگاری دارد.

- مواد هوازا: مواد هوازای مصرفی می‌تواند با ایجاد میلیون‌ها حباب هوای بسیار ریز مقاومت بتن را در برابر یخبندان-ذوب یخ بالا ببرد و با استاندارد ASTM C260 مطابقت دارد.

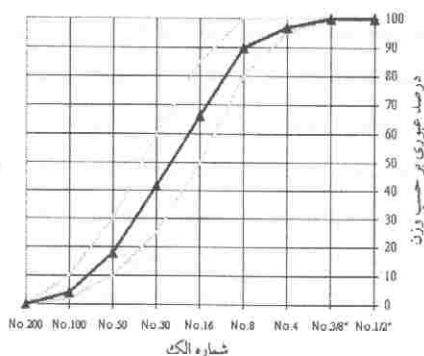
- سنگدانه‌ها: سنگدانه‌های مصرفی در این آزمایش از دپوی شهرداری محل تهیه شد که در سه دسته ماسه، نخودی و بادامی قرار دارند. منحنی دانه بندی ماسه شهرداری مطلوب



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی ریزدانه



شکل (۲): منحنی دانه‌بندی درشت دانه



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی اصلاح شده با پودر سنگ

نیست و پس از اصلاح در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار گرفته است (شکل ۱). این مصالح ماسه‌ای تحت عنوان مصالح اصلاح شده شهرداری در مقاله نامبرده می‌شود. شایان ذکر است که ارزش ماسه مصرفی در کارگاه‌های شهرداری حدود ۷۰ درصد است. در این تحقیق، نمونه‌های ساخته شده از این ماسه سری SH نامیده شده است. این ماسه در نمونه‌های اصلاح شده شهرداری (سری PC) استاندارد شده است. سری دانه بندی استفاده شده برای درشت دانه از ترکیب ۶۰ درصد بادامی و ۴۰ درصد نخودی تشکیل می‌شود که در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار دارد (شکل ۲). اندازه بزرگ ترین دانه مصرفی در درشت دانه برابر ۱۹ میلی متر است.

• پودر خاک سنگ: پودر خاک سنگ مصرفی، صادراتی، به رنگ سفید و از جنس آهکی است و در کیسه های ۲۰ کیلوگرمی تولید شده است. در نیمی از نمونه‌ها، پودر خاک سنگ جایگزین بخشی از مصالح ریزدانه ماسه شده است. برای این منظور پس از دانه بندی مصالح ریزدانه، به جای درصد عبوری وزنی از روی الک شماره ۵۰، ۲۰ درصد پودر خاک سنگ اضافه شد که در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار گرفت (شکل ۳). همان طور که ملاحظه می شود منحنی دانه بندی اصلاح شده با پودر سنگ با منحنی دانه بندی ماسه اصلاح شده بدون پودر (شکل ۱) تفاوت چندانی ندارد.

## ۲-۲- طرح مخلوط

برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی به منظور بررسی دوام بتن، از مخلوط‌های مختلف استفاده شده است. در این مخلوط‌ها، ترکیب‌های مختلف از میکروسیلیس و مواد افزودنی هوازا و پودر خاک سنگ استفاده شد. سری‌های مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی بجز نمونه‌های ساخته شده از مصالح مصرفی شهرداری؛ که تحت عنوان SH نامگذاری شده است، به صورت کلی PC-a نامیده می‌شوند که حرف a نشانگر نوع مواد افزودنی در نمونه های مختلف می باشد. P برای پودر خاک سنگ، A برای مواد هوازا و S برای میکروسیلیس بکار رفته است. برای مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی مختلف از ترکیب حروف P، A و S استفاده شده است. مواد مصرفی در مخلوط‌های بتن و نسبت های آنها به شرح زیر است:

- نسبت آب به سیمان: نسبت آب به سیمان مصرفی در نمونه‌های اصلاح شده شهرداری و تهیه شده در آزمایشگاه با احتساب رطوبت دانه‌ها و میزان جذب آب آنها برابر ۰/۵۵ در نظر گرفته شد. در سایر نمونه‌ها که دارای مواد افزودنی هستند برای به دست آوردن بتن با دوام، طبق جدول ارائه شده در آیین‌نامه ACI 318-83 و شرایط موجود، مقدار نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است.
- مقدار سیمان: مقدار سیمان مصرفی در طرح اختلاط شهرداری برابر ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن است. عیار بتن مصرفی در نمونه‌های آزمایشگاهی بر طبق استاندارد

ACI 302.1R-80 برابر ۲۲۰ کیلوگرم سیمان بر متر مکعب

در نظر گرفته شده است.

• ماده هوازا: مقدار ماده هوازی مصرفی برای ایجاد مقدار هوای حدود ۷-۹ درصد طبق نظر کارخانه تولیدی برابر ۱ میلی‌لیتر به ازای هر کیلوگرم سیمان استفاده شده است.

• ماده فوق روان کننده: مقدار ماده فوق روان کننده طبق مقدار پیشنهاد شده بین ۱-۳ درصد مقدار سیمان است. در طرح اختلاط، مقدار ماده روان کننده تا آنجا اضافه شده است تا روانی متوسط (۵-۱۰ سانتی متر) برای بتن حاصل آید. عدد مذکور حدود ۲ درصد به دست آمده است.

• میکروسیلیس: مقدار میکروسیلیس مصرفی؛ که به صورت جایگزین قسمتی از سیمان در بتن‌ها استفاده شده است، طبق مراجع [۶] و [۷] برابر ۸ درصد مقدار سیمان در نظر گرفته شده است. طبق مطالعات صورت گرفته حدود ۸ درصد میکروسیلیس اثر مناسبی بر روی دوام دارد و با افزایش از این مقدار سیر صعودی اثر مطلوب آن کاهش می‌یابد.

• در آزمایشگاه، برای هر سری تعداد ۱۵ عدد نمونه مکعبی با ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتی متر تهیه شده است. طرح مخلوط این نمونه‌ها به ترتیب در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): طرح مخلوط نمونه های مختلف آزمایشگاهی برای یک متر مکعب بتن

نسبت آب به سیمان	درشت دانه	ماسه و پودر سنگ	ماسه	روان کننده	هوازا	میکروسیلیس	آب	سیمان	نام نمونه
-	(kg)	(kg)	(kg)	(g)	(m-lit.)	(kg)	(Lit.)	(kg)	-
۰/۵۵	۹۹۲	—	۸۲۵	—	—	—	۱۷۶	۲۲۰	PC
۰/۵۵	۹۹۲	۸۲۵	—	—	—	—	۱۷۶	۲۲۰	PC-P
۰/۴	۹۹۲	—	۹۷۹	۶۲۸۰	—	۲۵/۶	۱۲۸	۲۹۴/۴	PC-S
۰/۴	۹۹۲	۹۷۹	—	۶۲۵۰	—	۲۵/۶	۱۲۸	۲۹۴/۴	PC-S-P
۰/۴	۹۹۲	—	۸۵۵	۵۹۲۰	۳۲۰	—	۱۲۸	۲۲۰	PC-A
۰/۴	۹۹۲	۸۵۵	—	۵۸۵۰	۳۲۰	—	۱۲۸	۲۲۰	PC-A-P
۰/۴	۹۹۲	—	۸۷۵	۵۸۳۰	۳۲۰	۲۵/۶	۱۲۸	۲۹۴/۴	PC-S-A
۰/۴	۹۹۲	۸۷۵	—	۵۷۸۰	۳۲۰	۲۵/۶	۱۲۸	۲۹۴/۴	PC-S-A-P
۰/۷	۹۹۲	—	۸۵۵	—	—	—	۲۱۰	۳۰۰	SH

### ۳-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه ها

نمونه‌های مکعبی به ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتی متر بر اساس استاندارد ASTM C192 تهیه و سپس با اعمال بار محوری فشاری به نمونه‌های مکعبی، مقاومت فشاری آنها اندازه گیری شد. مقدار هوای موجود نمونه‌ها و مقدار روانی (افت در آزمایش اسلامپ) آنها نیز بر اساس استانداردهای ASTM C231-78 و ASTM C143-90 محاسبه گردید. نتایج آزمایش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. پس از آزمایش‌های یخبندان-ذوب یخ؛ که جزئیات آن‌ها در قسمت بعد ارائه می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌ها از مخلوط های مختلف اندازه گیری شد. در شکل (۴) مقایسه‌ای بین مقاومت نمونه‌ها در ابتدا و پس از ۱۵۰ چرخه یخبندان-ذوب به صورت نمودار نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۴) دیده می‌شود نمونه شهرداری بیشترین افت مقاومت را دارد و نمونه‌های دارای مواد هوازا و میکروسیلیس، کمترین افت مقاومت را پس از ۱۵۰ چرخه یخبندان-ذوب یخ نسبت به مقاومت های اولیه دارند.

### ۲-۴- آزمایش یخبندان-ذوب یخ

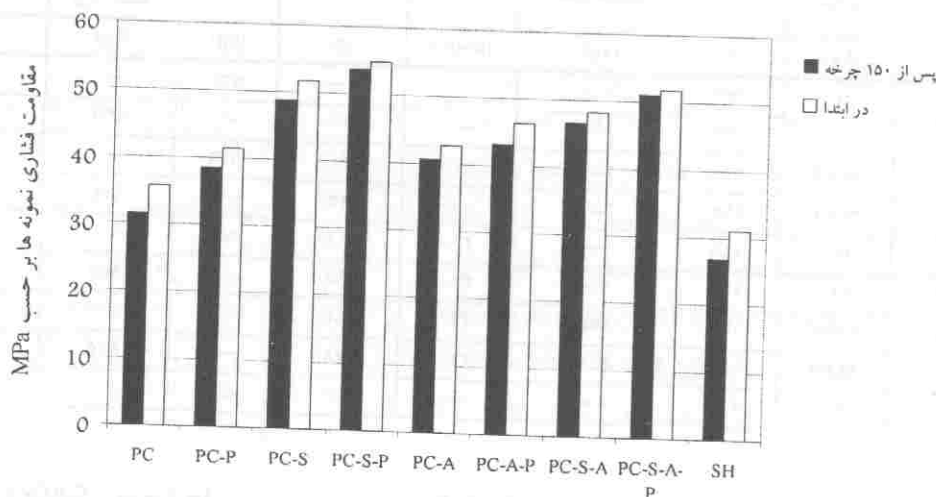
در این آزمایش، نمونه‌های تهیه شده طبق روش B استاندارد ASTM C666 و در درون دستگاه سرد کننده به حالت یخ زدگی برده می‌شود و سپس در درون آب گرم قرار می‌گیرند تا مرحله آب شدن را طی کنند. در هر روز به تعداد ۳ چرخه عمل یخ زدگی و ذوب یخ انجام شد. پس از اینکه تعداد چرخه های آزمایش به انتها رسید مقدار کاهش وزن نمونه‌ها و افت مقاومت اندازه گیری می‌شود.

شکل (۵) مقایسه‌ای بین افت وزن نمونه‌های موجود در شهرداری با نمونه های اصلاح شده را نشان می‌دهد. در نمونه‌های شهرداری SH نسبت آب به سیمان ۰/۷ و در نمونه‌های اصلاح شده PC این نسبت ۰/۵۵ است؛ بنابراین دلیل اصلی دوام کم نمونه‌های شهرداری بالا بودن نسبت آب به سیمان می‌باشد. دانه بندی نامناسب نیز دلیل دیگر دوام کم این نمونه‌ها ست. ملاحظه می‌شود که نمونه‌های شهرداری بتدریج با افزایش چرخه های یخبندان-ذوب یخ با شدت بیشتری

تخریب می‌شوند. در شکل (۵) بهبود نمونه‌های اصلاح شده PC و بخصوص نمونه‌های با پودر خاک سنگ PC-P در خصوص مقاومت در برابر یخبندان بخوبی مشاهده می‌شود. شایان ذکر است در هر دو سری این نمونه‌ها نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰.۵۵ است و می‌توان اثر پودر خاک سنگ را در افزایش دوام بتن مناسب دانست.

جدول (۲): نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی و شهرداری

نام نمونه	مقدار هوای موجود	مقدار افت بتن	مقاومت فشاری نمونه ها
-	%	cm	MPa
PC	۳/۵	۶/۵	۳۵/۷۶
PC-P	۳/۱	۶/۴	۴۱/۴۳
PC-S	۲/۲	۵/۵	۵۱/۸۰
PC-S-P	۲/۵	۶/۰	۵۴/۸۳
PC-A	۷/۵	۶/۰	۴۲/۷۰
PC-A-P	۷/۰	۶/۲	۴۶/۳۳
PC-S-A	۶/۴	۵/۷	۴۸/۳۳
PC-S-A-P	۶/۲	۵/۸	۵۱/۸۶
شهرداری SH	?	۱۰	۳۱/۱۲

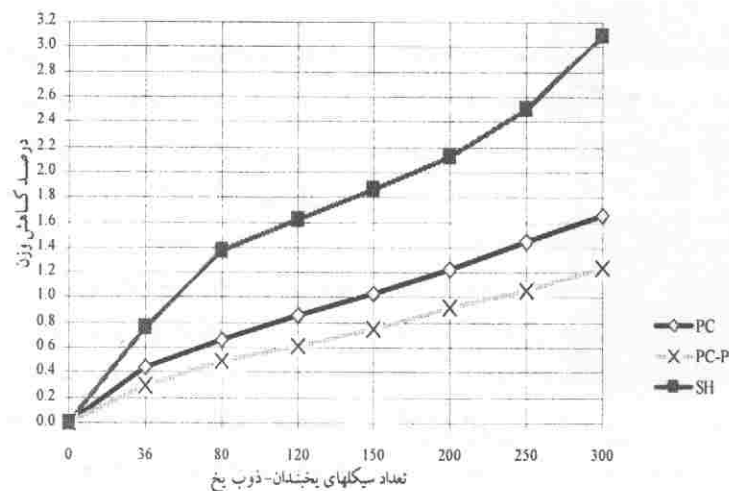


شکل (۴): مقایسه مقدار مقاومت فشاری نمونه ها در ابتدا و پس از ۱۵۰ چرخه یخبندان-ذوبیخ.

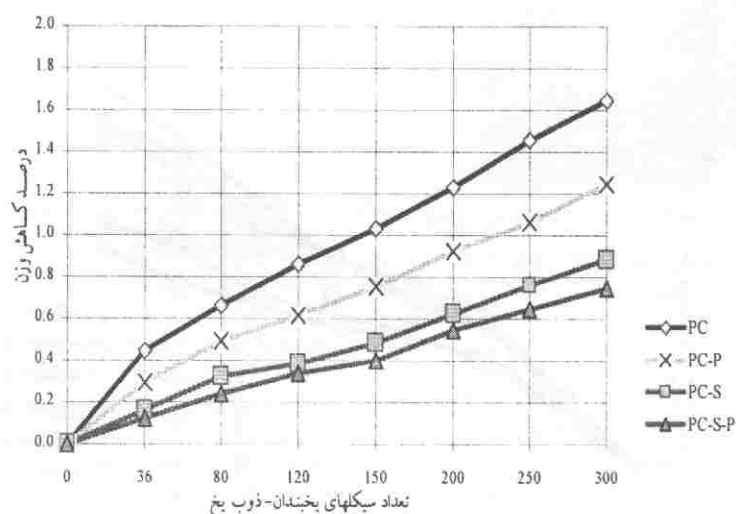
است. در این دو سری نمونه‌ها نسبت آب به سیمان یکسان و برابر ۰.۴ بوده است.

در شکل (۷) مقایسه‌ای بین افت وزن نمونه‌های دارای مواد هوازا با نمونه‌های بدون هوازا نشان داده شده است. در این شکل، اثر مواد هوازا بر افزایش مقاومت در برابر یخبندان بخوبی مشهود است؛ لیکن پودر خاک سنگ در ترکیب با مواد هوازا اثر چندانی بر کاهش افت وزن نمونه‌ها ندارد.

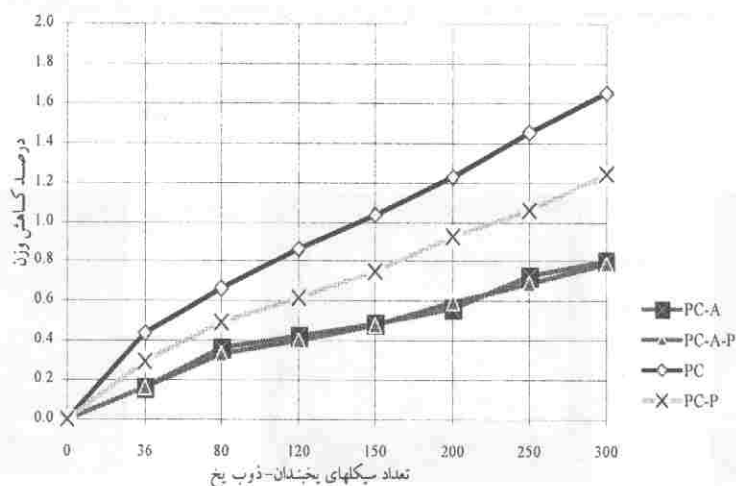
در شکل (۶) مقایسه‌ای بین افت وزن نمونه‌های دارای میکروسیلیس با نمونه‌های بدون میکروسیلیس نشان داده شده است. در این شکل، اثر میکروسیلیس و پودر خاک سنگ بر مقاومت در برابر یخبندان بخوبی مشهود است. مقدار افت وزن در نمونه‌های با افزودنی‌های میکروسیلیس و پودر خاک سنگ PC-S-P نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی‌ها به مراتب کمتر است. مقایسه بین نمونه‌های PC-S و PC-S-P نیز بار دیگر نشان می‌دهد که پودر خاک سنگ در افزایش دوام بتن موثر



شکل (۵): مقایسه افت وزن نمونه‌های شهرداری با نمونه‌های اصلاح شده با و بدون پودر خاک سنگ



شکل (۶): مقایسه افت وزن نمونه‌های دارای میکروسیلیس با نمونه‌های بدون میکروسیلیس



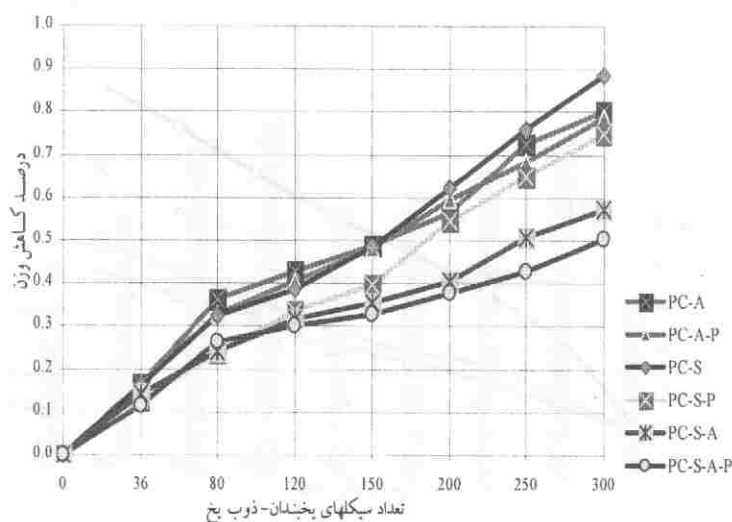
شکل (۷): مقایسه افت وزن نمونه‌های دارای مواد هوازا با نمونه‌های بدون هوازا

نمونه‌ها نسبت آب به سیمان یکسان و برابر با ۰٫۴ بوده است. همان طور که مشاهده می‌شود با ترکیب مواد هوازا و میکروسیلیس مقاومت در برابر یخبندان افزایش پیدا کرده است.

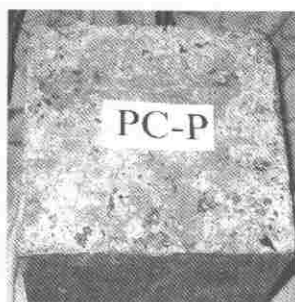
در شکل (۸) مقایسه‌ای بین افت وزن نمونه‌های دارای مواد هوازا، نمونه‌های دارای میکروسیلیس و نمونه‌های دارای میکروسیلیس و هوازا نشان داده شده است. در تمام این

دانه بندی، نمونه‌های اصلاح شده وضعیت بهتری از نظر دوام داشته و تنها رویه آنها تخریب شده است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با جایگزینی پودر خاک سنگ به جای مصالح ریز دانه نمونه‌هایی تولید شده‌اند که تنها قسمتی از رویه آنها تخریب شده است. شکل (۱۲) نمونه‌هایی را نشان می‌دهد که به علت وجود افزودنی‌های میکروسیلیس، هوازا و پودر خاک سنگ، افت وزن نسبتاً کمی دارد و تخریب رویه نمونه‌های آنها قابل ملاحظه نبوده است. شکل (۱۳) مربوط به نمونه‌هایی است که در آنها از ترکیب دو یا سه افزودنی استفاده شده و تخریب رویه آنها کم و در نتیجه دوام آنها زیاد است.

پودر خاک سنگ در کاهش افت وزن نمونه‌های دارای میکروسیلیس مؤثر است به طوری که مقدار کاهش افت در این نمونه‌ها به مقدار آن در نمونه‌های دارای میکروسیلیس و هوازا نزدیک شده است. مقایسه شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای هر سه افزودنی میکروسیلیس، هوازا و پودر خاک سنگ نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی مقاومت زیادی در برابر تعداد چرخه‌های یخبندان-ذوب یخ دارند. شکل‌های (۹) تا (۱۳) وضعیت تخریب رویه و گوشه‌های نمونه‌های بتنی مربوط به مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهند. در شکل (۹) تخریب رویه و گوشه‌های نمونه‌های مخلوط کارگاه‌های شهرداری؛ که کمترین دوام را داشته‌اند، مشخص است. همان طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود با اصلاح



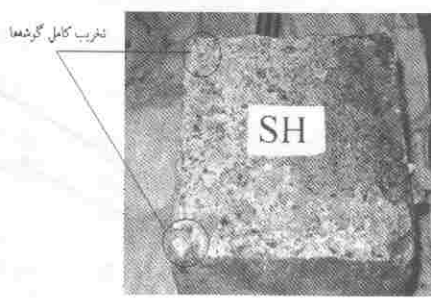
شکل (۸): مقایسه افت وزن نمونه‌های دارای مواد پودر سنگ، هوازا، میکروسیلیس و ترکیب آنها



شکل (۱۱): نمونه اصلاح شده با پودر سنگ که تنها قسمتی از رویه آن تخریب شده است



شکل (۱۰): نمونه اصلاح شده که تنها رویه آن تخریب شده است



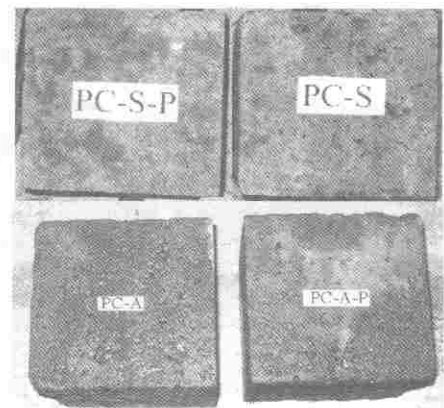
شکل (۹): نمونه شهرداری که گوشه‌ها و رویه آن تخریب شده است

یخبندان - ذوب یخ دارند.

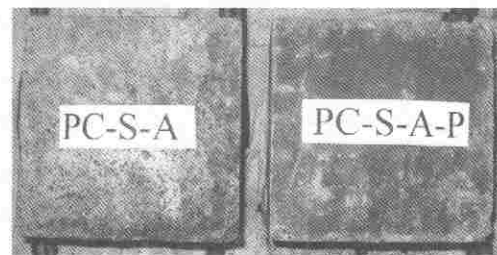
۶- نمونه هایی که در مخلوط آنها هر سه ماده میکروسیلیس، هوازا و پودر خاک سنگ استفاده می شود، بالاترین مقاومت را در برابر چرخه های یخبندان-ذوب یخ دارند. درصد کاهش وزن این نمونه ها پس از ۳۰۰ چرخه یخبندان و ذوب یخ به حدود یک سوم نمونه های اصلاح شده (نمونه های شاهد حاوی ماسه اصلاح شده بدون پودر سنگ) رسیده است.

#### ۴- مراجع

- [۱] رمضانیان پور، علی اکبر و پیمایش، منصور، بتن در محیط دریایی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵.
- [۲] ACI 318-83 ACI Committee Report, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, 1986.
- [۳] Neville A.M. and Brooks J.J., "Concrete Technology ", Longman Science & Technical, 1987
- [۴] ACI 302.1R-80 ACI Committee 302 Report, "Guide for concrete floor and slab construction," American Concrete Institute, 1980.
- [۵] رمضانیان پور، علی اکبر و پیمایش، منصور میکروسیلیس و ضریب بازده آن در مقاومت بتن سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن، اردیبهشت ۱۳۷۶.
- [۶] Bleszynski R. and Hooton R., "Durability of Ternary Blend Concrete with Silica Fume and Blast Furnace Slag ", ACI Material Journal, No. 99 pp. 499-507, 2002
- [۷] Mouchel G. and Partners, "Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained CSF Concrete", Department Of Civil Engineering and Building, the Polytechnic of Wales, Pontypridd, Cement & Concrete Composite Vol. 13 pp 203-208, 1991
- [۸] Bouzoubaa N. and Fournier B., "Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cement Produced in Cement Plant", ACI Material Journal, No. 99 pp. 560-567, 2002
- [۹] Obla, H., Hill, R., "Properties of Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash", ACI Material Journal, No. 100, pp 426-433, 2003



شکل (۱۲): نمونه هایی که افت وزن و تخریب شکل رویه آنها نسبتاً کم بوده است



(۱۳): نمونه های دارای مواد هوازا و میکروسیلیس با و بدون پودر خاک سنگ که کمترین افت وزن و تخریب رویه را داشته اند

#### ۳- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر ترکیب میکروسیلیس و مواد افزودنی هوازا و پودر خاک سنگ بر دوام بتن مطالعه شد. براساس کار آزمایشگاهی انجام یافته در این پژوهش نتایج زیر قابل ارائه است.

- ۱- بسیاری از نمونه های معمولی مورد استفاده در صنعت بتن دوام مطلوبی ندارند و مقاومت خوبی نیز در برابر چرخه های یخبندان-ذوب یخ ندارند.
- ۲- استفاده از پودر خاک سنگ به جای بخشی از مصالح ریزدانه باعث افزایش مقاومت فشاری می شود.
- ۳- پودر خاک سنگ در بهبود مقاومت در برابر چرخه یخبندان-ذوب یخ به خصوص در حضور میکروسیلیس اثر مطلوبی دارد. اثر این ماده در بهبود مقاومت بتن در برابر یخبندان در مخلوط های دارای مواد هوازا اندک است.
- ۴- استفاده از ماده میکروسیلیس برای بهبود دوام بتن در برابر چرخه های یخبندان-ذوب یخ مقاومتی نظیر نمونه های دارای مواد هوازا دارد و می توان برای به دست آوردن یک بتن با دوام نسبتاً مناسب در برابر یخبندان از این ماده استفاده کرد.
- ۵- ترکیب مواد هوازا و میکروسیلیس اثر مطلوبی بر افزایش مقاومت در برابر یخبندان دارد. نمونه های به دست آمده از این طرح اختلاط، مقاومت بسیار خوبی در برابر چرخه های