



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS

دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی  
۲۹ آبان لغایت ۱ آذر ۹۱ (تهران-ایران)



بررسی اثر کربناسیون در تغییر مشخصات فیزیکی بتنهای حاوی دوده سیلیس

علی دلنواز<sup>۱</sup>

کلید واژه: کربناسیون، تخلخل، دوده سیلیس.

چکیده

خرابی‌های محیطی بتن یک پدیده غیر خطی پیچیده و ناشی از اثرات همزمان پدیده‌های مختلف است. در این میان پدیده کربناسیون به عنوان یکی از عوامل اصلی در خرابی سازه‌های بتن مسلح شناخته می‌شود. در بررسی اثر کربناسیون بر روی سازه‌های بتنی دو اثر متفاوت مشاهده می‌شود از یک طرف کربناسیون با کاهش تخلخل بتن به علت تبدیل آهک به کربنات کلسیم اثر مثبت در جلوگیری از نفوذ مواد مخرب به داخل بتن دارد و از طرف دیگر با کاهش pH بتن می‌تواند به عنوان عامل اولیه در خوردگی آرماتورها مطرح شود. تحقیقات زیادی بر روی اثر کربناسیون در سازه‌های بتنی انجام شده است. با این حال تعداد کارهای انجام شده بر روی بتنهای حاوی دوده سیلیسی بسیار محدود می‌باشد در تحقیق حاضر اثر کربناسیون در کاهش تخلخل بتنهای حاوی دوده سیلیس بررسی می‌شود. به این منظور با کربناته کردن نمونه های بتنی با نسبتهای آب به سیمان و میزان میکروسیلیس مختلف اثر کربناسیون در کاهش میزان نفوذپذیری بتن نسبت به نمونه‌های شاهد از طریق آزمایشهای گوناگون و در سنین مختلف عمر بتن ارزیابی می‌شود. در نهایت بر اساس نتایج آزمایشگاهی اثر کربناسیون در کاهش تخلخل به صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌گردد.

مقدمه

علی‌رغم آنکه بتن و بتن مسلح در مقایسه با فولاد از دوام بسیار زیادی برخوردار است ولی در محیطهای خورنده سخت نظیر سواحل و بنادر و جزایر خلیج فارس و دریای عمان به شدت در معرض آسیب قرار می‌گیرند و لذا عمر مفید آنها بسیار کاهش می‌یابد. یکی از عمده‌ترین خوردگیهای این نوع سازه‌ها، خوردگی آرماتور در بتن مسلح بر اثر نفوذ یون کلراید و کربناتاسیون بتن است. این خسارت عمده‌ترین خسارت وارد بر سازه‌های بتن آرمه در کل جهان است و خسارت ناشی از آن را از نظر میزان و ابعاد و مقیاس با خسارتهای ناشی از جنگ تشبیه کرده‌اند. از سوی دیگر سواحل و جزایر خلیج فارس از نظر اقلیمی و آب و هوایی وضعیت ویژه‌ای را در جهان دارد و بسیاری از شرایط نامساعد را برای تخریب و انهدام سازه‌های بتن آرمه دارا می‌باشد و می‌توان گفت که مخرب‌ترین و نامساعدترین شرایط را برای سازه‌های بتن آرمه در جهان دارا است. از سوی دیگر در حال حاضر در منطقه خلیج فارس و به ویژه در مناطقی نظیر عسلویه پروژه‌های زیادی در حال اجرا است. مقادیر قابل توجهی بتن برای ساخت انواع مختلف سازه‌ها به کار می‌رود. به علاوه با توجه به صنعتی شدن منطقه تغییر غلظت آلاینده‌ها و از جمله گاز CO<sub>2</sub> در منطقه قابل پیش‌بینی می‌باشد.

فولاد مدفون در بتن توسط یک لایه اکسید بسیار نازک که بر سطح بیرونی آرماتورها قرار می‌گیرد در برابر خوردگی محافظت می‌شود. این لایه در محیط به شدت قلیایی (pH در حدود ۱۳) بتن اطراف آرماتورها تشکیل شده و پایدار می‌ماند. در صورتی که pH محیط پیرامون این لایه به مقادیری در حدود ۹ برسد، این لایه از بین رفته و خوردگی آرماتورها آغاز می‌شود. [۱]

<sup>۱</sup> - استاد یار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، ایران alidelnavaz@yahoo.com

pH بتن با نفوذ و انتشار گازهای موجود در محیط و تشکیل اسیدها تغییر می‌یابد. گازهای موثر اصلی عبارتند از  $CO_2$  هوا و  $SO_2$  موجود در آب باران [۲].

در این میان دی اکسید کربن موجود در هوا از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد و در نتیجه نفوذ آن به درون بتن پدیده کربناتاسیون روی خواهد داد. کربناتاسیون بتن یک واکنش شیمیایی بین دی اکسید کربن نفوذ کرده به درون بتن با محصولات قلیایی حاصل از هیدراتاسیون سیمان در بتن می‌باشد. این واکنش، جزو واکنش‌های تبدیلی بین سیال مهاجم و خمیر سیمان که منجر به تشکیل نمک‌های کلسیم قابل حل می‌شوند، تقسیم بندی می‌شود.

پدیده کربناتاسیون دو اثر مختلف را در نفوذ کلراید در بتن دارد. از یک طرف کربناتاسیون با تغییر تخلخل بتن موجب کاهش نفوذ کلراید می‌شود (تأثیر فیزیکی) و از طرف دیگر با آزاد کردن کلراید درگیر غلظت کلراید را در بتن افزایش می‌دهد (تأثیر شیمیایی). نتایج موجود در مقالات حاکی از تأثیر بیشتر اثر فیزیکی کربناتاسیون نسبت به اثر شیمیایی آن در بتن می‌باشد.

هدف از مقاله حاضر بررسی اثرات فیزیکی کربناتاسیون در نفوذ کلراید به بتن و تغییرات مشخصات فیزیکی بتن مانند تغییرات تخلخل بتن است. روش تحقیق مبتنی بر روشهای آزمایشگاهی می‌باشد. روند کلی کار به این صورت است که نمونه‌های بتنی در دو حالت کربناته شده کامل و بتن معمولی غیر کربناته در معرض یون کلراید قرار داده می‌شوند و در زمان معین از نمونه‌ها پروفیل گیری شده و تغییر غلظت کلراید بدست می‌آید. به این ترتیب می‌توان به رابطه‌ای بین غلظت کلراید در بتن‌های کربناته شده و بتن‌های معمولی دست یافت. نفوذ کلراید به داخل بتن مبتنی بر مکانیزم انتشار (diffusion) در نظر گرفته می‌شود که از قانون فیک تبعیت می‌کند. عمق نفوذ نیز از رابطه منتج از همین قانون یعنی رابطه جذر زمان بدست می‌آید.

### برنامه آزمایشها

نمونه‌های آزمایشگاهی جهت تعیین تغییرات ضریب نفوذ کلراید در محیط کربناته و غیر کربناته ساخته شدند و تحت آزمایش‌های مهاجرت یون کلراید، آزمایش تسریع نفوذ یون کلراید، نفوذ حجمی آب، جذب موئینه و مقاومت فشاری قرار گرفتند. تعیین پروفیل یون کلراید و تعیین عمق کربناتاسیون از دیگر آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. جدول ۱ مشخصات طرح اختلاطها را نشان می‌دهد.

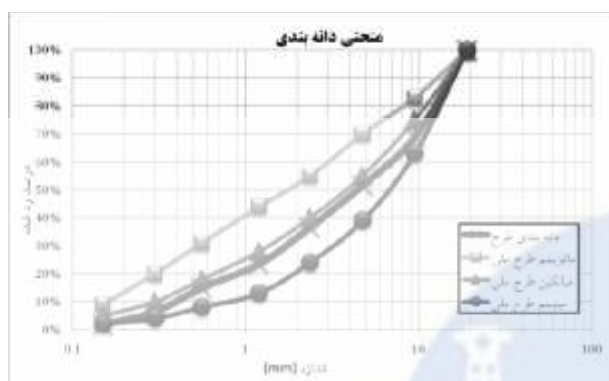
جدول ۱- طرح اختلاط نمونه های بتنی

شماره	ماده	Csf/(c+csf)	W/(c+csf)	مخلوط آزمایش
۱۰۵۰	۸۰۰	۰	۰/۳۵	M-۳۵-۰
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۷	۰/۳۵	M-۳۵-۷
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۱۰	۰/۳۵	M-۳۵-۱۰
۱۰۵۰	۸۰۰	۰	۰/۴۰	M-۴۰-۰
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۷	۰/۴۰	M-۴۰-۷
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۱۰	۰/۴۰	M-۴۰-۱۰
۱۰۵۰	۸۰۰	۰	۰/۵۰	M-۵۰-۰
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۷	۰/۵۰	M-۵۰-۷
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۱۰	۰/۵۰	M-۵۰-۱۰

در جدول فوق C بیانگر سیمان و Csf بیانگر میزان میکروسیلیس است. در تمام نمونه‌ها میزان سیمان مصرفی ۴۰۰ کیلوگرم بوده و دانه‌بندی سنگدانه‌ها به صورت استاندارد انتخاب شده است. با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر کربناتاسیون در تغییر مشخصات بتن می‌باشد لذا نمونه‌ها در دو حالت کربناته و غیر کربناته مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور کربناته کردن بتن، نمونه‌ها در داخل مخزن حاوی غلظت بالای گاز دی‌اکسید کربن به مدت یک ماه قرار داده شدند تا به طور کامل کربناته شوند.

### نتایج آزمایش مشخصات شیمیایی و فیزیکی مصالح

با توجه به اینکه هدف از انجام آزمایشها ارائه یک مدل نفوذ می‌باشد لذا باید آزمایشها را در شرایط کنترل شده انجام داد. لذا در ساخت تمام نمونه‌ها از یک نوع دانه‌بندی یکسان استفاده شده است. شکل ۱ و جدول ۲ نوع دانه‌بندی مصالح سنگی به همراه نتایج آزمایش XRF سیمان و میکروسلیس را نشان می‌دهد.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی در قیاس با طرح اختلاط ملی

جدول ۲: نتایج آزمایش XRF بر روی مصالح به کار رفته (اعداد بر حسب درصد وزنی می‌باشند)

ترکیب شیمیایی	سیمان تپ ۱	دوده سلیسی
SiO <sub>۲</sub>	۲۱,۵۰	۸۷,۵
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۳,۶۸	۰,۵
Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۲,۷۶	۱,۵۳
CaO	۶۱,۵۰	۱,۲۷
SO <sub>۳</sub>	۳,۵۰	۰,۴۶
MgO	۴,۸۰	۱,۰۱
Na <sub>۲</sub> O	۰,۱۲	۰,۳۶
K <sub>۲</sub> O	۰,۹۵	۱,۱۴
P <sub>۲</sub> O <sub>۵</sub>	۰,۰۶	۰,۱۳۱
TiO <sub>۲</sub>	۰,۳۵	۰,۰۲
CL	۰,۰۳	۰,۰۵۶
LOI	۰,۷۰	۵,۹۲

### مقاومت فشاری نمونه‌ها

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتیمتری در سن ۲۸، ۹۰ و ۲۷۰ روز انجام شد. جدول ۳ میانگین نتایج بر روی سه نمونه را برای هر طرح اختلاط نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها (kg/cm<sup>2</sup>)

نمونه شاهد			نمونه کربناته شده			طرح اختلاط
سن عمل آوری			سن عمل آوری			
۲۷۰	۹۰	۲۸	۲۷۰	۹۰	۲۸	
۴۶۵	۴۶۲	۴۵۳	۴۶۲	۴۵۶	۴۳۶	M-۳۵-۰
۵۵۷	۵۵۹	۵۲۵	۵۵۹	۵۵۲	۵۳۷	M-۳۵-۷
۶۳۵	۶۲۹	۵۹۵	۶۳۰	۶۳۲	۵۹۳	M-۳۵-۱۰
۴۳۰	۳۹۷	۴۰۰	۴۱۹	۴۰۸	۳۹۴	M-۴۰-۰
۵۳۴	۵۳۶	۴۹۸	۵۴۲	۵۲۴	۴۹۰	M-۴۰-۷
۵۵۶	۵۶۹	۵۲۸	۵۷۸	۵۵۵	۵۳۲	M-۴۰-۱۰
۴۲۴	۳۸۲	۳۷۲	۳۹۲	۳۷۹	۳۶۶	M-۵۰-۰
۴۷۷	۴۵۳	۴۴۸	۴۷۴	۴۶۰	۴۴۳	M-۵۰-۷
۵۴۴	۵۱۸	۴۹۶	۵۳۰	۵۱۳	۴۹۰	M-۵۰-۱۰

**آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلرید در بتن (RCPT)**

این آزمایش که توسط Whiting در سال ۱۹۸۱ [۳] ابداع شده به نام RCPT مشهور است. در این آزمایش بار عبوری از نمونه بتنی اندازه‌گیری و از آن برای درجه‌بندی بتن طبق معیار استاندارد استفاده می‌شود. برای انجام این آزمایش طبق استاندارد ASTM C۱۲۰۲ یا AASHTO T۲۷۷ باید نمونه‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱۰/۲ سانتیمتر (۴ اینچ) و ارتفاع  $51 \pm 3$  سانتیمتر ( $2 \pm 1/8$  اینچ) تهیه شود. جدول ۴ نتایج آزمایش RCPT را برای ۹ طرح اختلاط در سن ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده میانگین نتایج برای ۳ نمونه می‌باشد.

جدول ۴: نتایج آزمایش RCPT (کولومب)

نمونه شاهد		نمونه کربناته شده		طرح اختلاط
سن عمل آوری		سن عمل آوری		
۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	
۹۵۲	۱۱۰۴	۷۳۲	۷۳۰	M-۳۵-۰
۳۶۷,۵	۴۸۱	۲۴۰,۵	۳۲۴	M-۳۵-۷
۲۸۴,۵	۲۹۹	۱۷۵	۲۳۶	M-۳۵-۱۰
۹۴۰	۱۳۲۳	۶۴۳,۵	۸۹۹	M-۴۰-۰
۶۶۱,۵	۷۸۵	۴۷۰	۶۱۵	M-۴۰-۷
۵۸۶,۵	۶۶۱	۴۳۸,۵	۵۷۶	M-۴۰-۱۰
۲۲۶۰	۲۴۴۵	۱۶۱۰	۱۳۶۸	M-۵۰-۰
۱۸۷۷	۲۱۲۷	۸۴۸	۱۰۱۲	M-۵۰-۷
۹۹۲	۱۰۴۶	۷۵۱,۵	۸۳۱	M-۵۰-۱۰

**آزمایش جذب آب موئینه**

این آزمایش بدین صورت است که نمونه‌ها پس از سن عمل آوری، در داخل آون (در دمای ۵۰ °C و به مدت ۳ روز) خشک شده و وزن می‌شوند. سپس، نمونه‌ها در داخل ظرف آب به نحوی قرار می‌گیرند که ۰/۵ سانتیمتر از کف آنها در داخل آب قرار گرفته و آب از پایین نمونه امکان نفوذ داشته باشد. با تعیین تغییر وزن نمونه در زمانهای مشخص تا ۷۲ ساعت میزان جذب آب موئینه نمونه‌ها تعیین می‌شود. جدول ۵ نتایج آزمایش جذب موئینه را برای ۹ طرح اختلاط در سن ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده میانگین نتایج برای ۳ نمونه می‌باشد.

جدول ۵: نتایج آزمایش جذب موئینه (درصد تغییر وزن نمونه‌ها)

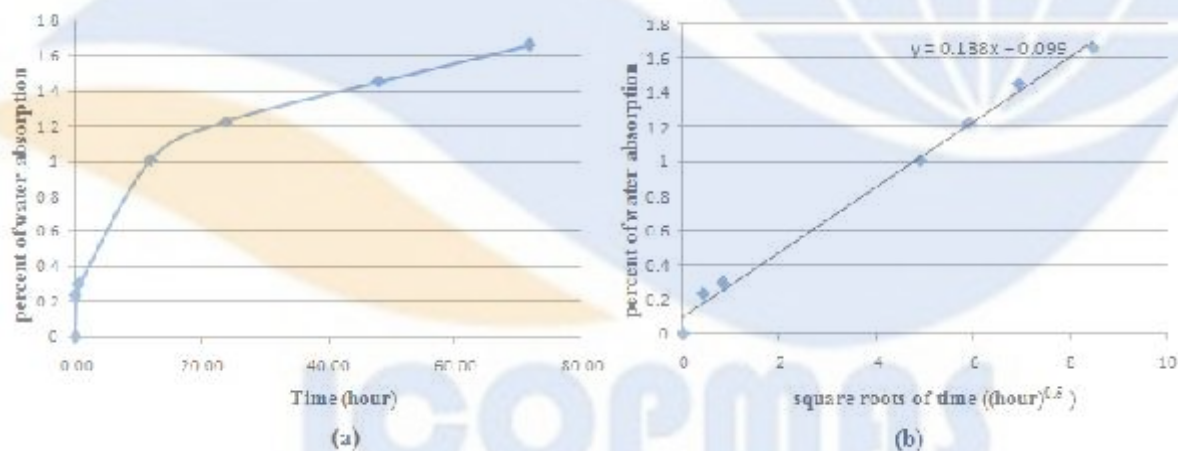
نمونه شاهد		نمونه کربناته شده		طرح اختلاط
سن عمل آوری		سن عمل آوری		
۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	
۲/۳۱	۱/۶۶	۱/۵۹	۱/۵۸	M-۳۵-۰
۱/۰۵	۱/۱۷	۰/۹۴	۰/۸۸	M-۳۵-۷
۱/۳۶	۱/۹۷	۱/۱۷	۱/۹۶	M-۳۵-۱۰
۱/۹۱	۲/۶۸	۱/۰۶	۲/۲۵	M-۴۰-۰
۱/۸۸	۲/۱	۱/۹۱	۱/۸۸	M-۴۰-۷
۲/۱	۱/۹۸	۱/۸۲	۱/۶۳	M-۴۰-۱۰
۴/۲۷	۳/۷۳	۴/۳	۳/۴	M-۵۰-۰
۳/۳۸	۴/۹۵	۳/۶	۲/۴	M-۵۰-۷
۳/۷	۱/۳۳	۳/۱	۳	M-۵۰-۱۰

از دیگر نتایجی که از آزمایش جذب موئینه می‌توان بدست آورد ضریب جذب موئینه می‌باشد. به طور کلی منحنی تغییرات وزن نمونه در مقابل زمان یک منحنی غیر خطی می‌باشد. با این حال در صورتی که تغییرات وزن نمونه در مقابل جذر زمان رسم شود می‌توان یک خط را بین نقاط مربوطه به سادگی برازش داد. شیب این خط بر اساس معادله ۱ به عنوان ضریب جذب موئینه شناخته می‌شود.

$$K = S \times t^{.5}$$

(۱)

شکل ۲ نمونه‌ای از نتایج را برای یکی از طرح اختلاطها نشان می‌دهد. میزان ضریب جذب موئینه در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۲: مقایسه منحنی تغییرات وزن در آزمایش جذب موئینه و ضریب جذب موئینه

جدول ۶: نتایج آزمایش ضریب جذب موئینه ( $1/\text{hour}^{0.5}$ )

نمونه شاهد		نمونه کربناته شده		طرح اختلاط
سن عمل آوری		سن عمل آوری		
۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	
۰,۲۰	۰,۲۳	۰,۱۷	۰,۱۸۳	M-۳۵-۰
۰,۱۸	۰,۱۵۶	۰,۱۵۳	۰,۱۴۱	M-۳۵-۷
۰,۱۵۲	۰,۱۲۳	۰,۱۲	۰,۱۰۵	M-۳۵-۱۰
۰,۲۵۱	۰,۲۸۵	۰,۲۱	۰,۲۶۶	M-۴۰-۰
۰,۱۸۴	۰,۲۲۵	۰,۱۶	۰,۲۱۲	M-۴۰-۷
۰,۱۶۵	۰,۲۱۴	۰,۱۵	۰,۲۱۱	M-۴۰-۱۰
۰,۵۳۲	۰,۵۰	۰,۳۳	۰,۳۹	M-۵۰-۰
۰,۴۱	۰,۴۲۸	۰,۲۸	۰,۳۲	M-۵۰-۷
۰,۳۳۵	۰,۳۸۹	۰,۲۶	۰,۲۷۵	M-۵۰-۱۰

## پروفیل یون کلرید

آزمایش تعیین پروفیل یون کلرید در سه شرایط محیطی مستغرق، اتمسفر و تروخشک انجام شد. به این منظور نمونه‌های کربناته و شاهد به مدت یکسال در معرض یون کلرید ۳۰ گرم در لیتر قرار داده شدند. میزان نفوذ یون کلرید برحسب عمق از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشارپذیری Fick بیان می‌شود [۴]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (۲)$$

پس از حل، معادله دیفرانسیل فوق بصورت زیر درمی‌آید:

$$C(x, t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (۳)$$

که در آن  $x$  فاصله از سطح بتن برحسب متر،  $t$  مدت زمان رویارویی برحسب ثانیه،  $D_c$  ضریب انتشارپذیری بتن برحسب متر مربع بر ثانیه،  $C$  میزان درصد وزنی یون کلر در سطح بتن و  $C(x, t)$  میزان درصد وزنی یون کلر در عمق  $x$  نسبت به سطح و در زمان  $t$  است.  $\operatorname{erf}$  هم تابع خطاست که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\beta^2} d\beta \quad (۴)$$

در هر پروفیل، دو سری شش تایی درصد وزنی یون کلر و عمق مربوطه وجود دارد. با استفاده از نرم افزار Matlab، منحنی مربوط به معادله ۲ از میان نتایج آزمایش برازش شده و مقادیر  $D_{cl}$  و  $C_s$  بدست می‌آید. جدول ۷ و ۸ خلاصه نتایج ضریب نفوذ کلرید برای نمونه‌های کربناته شده و شاهد پس از ۱ سال را نشان می‌دهد.

جدول ۷: مقادیر ضریب نفوذ کلرید در نمونه‌های شاهد

Mix ID	$D_{cl}(\text{mm}^2/\text{year})$ (مستغرق)	$D_{cl}(\text{mm}^2/\text{year})$ (اتمفر)	$D_{cl}(\text{mm}^2/\text{year})$ (تر و خشک)
M-۳۵-۰	۱۰۵	۵۷	۱۵۳
M-۳۵-۷	۱۰۱	۵۰	۱۳۱
M-۳۵-۱۰	۸۹	۳۷	۸۷
M-۴۰-۰	۳۱۱	۵۷	۳۴۰
M-۴۰-۷	۱۱۹	۵۴	۱۶۰
M-۴۰-۱۰	۱۰۴	۴۰	۱۰۵
M-۵۰-۰	۴۵۱	۸۷	۳۲۳
M-۵۰-۷	۳۴۳	۸۰	۲۸۵
M-۵۰-۱۰	۲۲۸	۶۷	۲۴۳

جدول ۸: مقادیر ضریب نفوذ کلرید در نمونه‌های کربناته

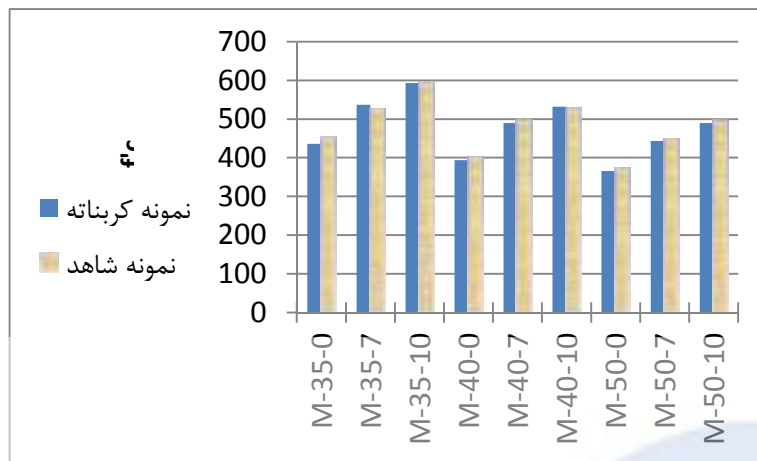
Mix ID	$D_{cl}(\text{mm}^2/\text{year})$ (مستغرق)	$D_{cl}(\text{mm}^2/\text{year})$ (اتمفر)	$D_{cl}(\text{mm}^2/\text{year})$ (تر و خشک)
M-۳۵-۰	۶۷	۴۲	۱۰۴
M-۳۵-۷	۸۲	۴۳	۱۱۱
M-۳۵-۱۰	۷۷	۳۳	۷۹
M-۴۰-۰	۱۷۷	۳۴	۲۰۴
M-۴۰-۷	۸۰	۳۶	۱۱۲
M-۴۰-۱۰	۸۹	۲۷	۹۳
M-۵۰-۰	۱۸۰	۳۵	۱۲۹
M-۵۰-۷	۱۵۱	۳۵	۱۲۵
M-۵۰-۱۰	۱۱۹	۴۶	۱۴۱

### مقایسه نتایج آزمایشها

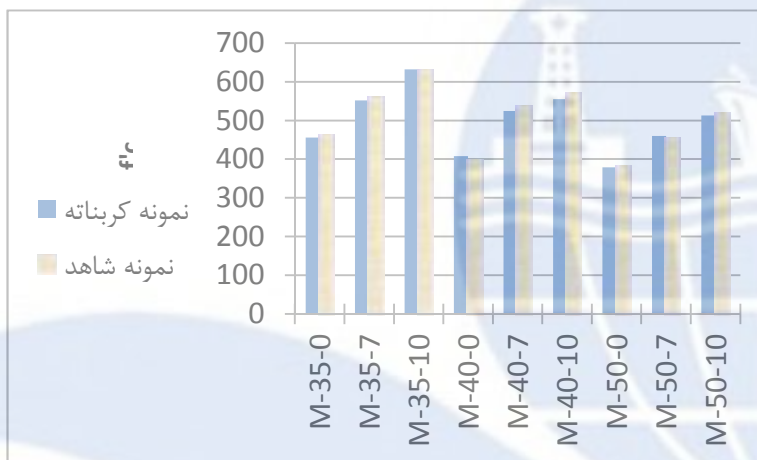
#### بررسی اثر کربناسیون در مقاومت فشاری بتن

نمودار شکل ۳ تا ۵ مقاومت نمونه‌های کربناته و کربناته نشده بر اساس نوع طرح اختلاط و سن نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییرات مقاومتی در نمونه‌ها بر اساس کربناته بودن یا نبودن نمونه‌ها روند مشخصی را ندارد و عملاً کربناسیون تغییر مشخصی در مقاومت نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند. علت این امر را می‌توان در عمق کم کربناسیون نسبت به ابعاد نمونه دانست به عبارت دیگر علی‌رغم اینکه انتظار می‌رود با کربناسیون سطح، مقاومت این لایه افزایش یابد ولی چون مقاومت نمونه مکعبی بیشتر تحت تاثیر لایه‌های میانی بتن قرار دارد لذا اثر کربناسیون در تغییر مقاومت مشهود نمی‌باشد. نتیجه مشابه این تحقیق در مرجع [۵] نیز مورد اشاره قرار گرفته است.

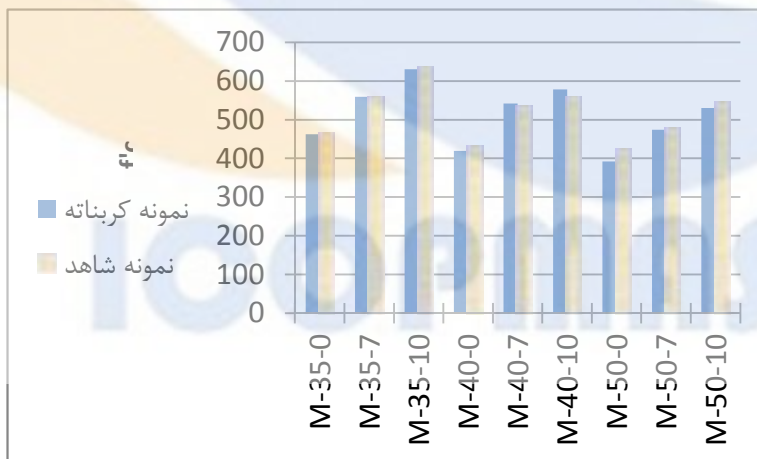




شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز



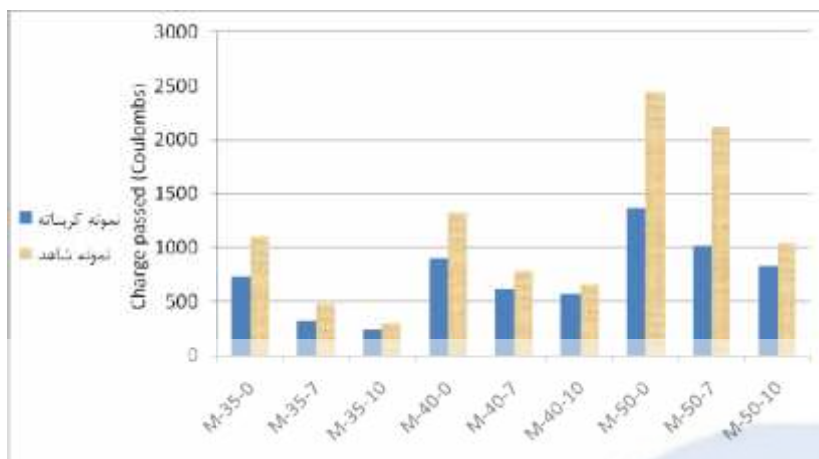
شکل ۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز



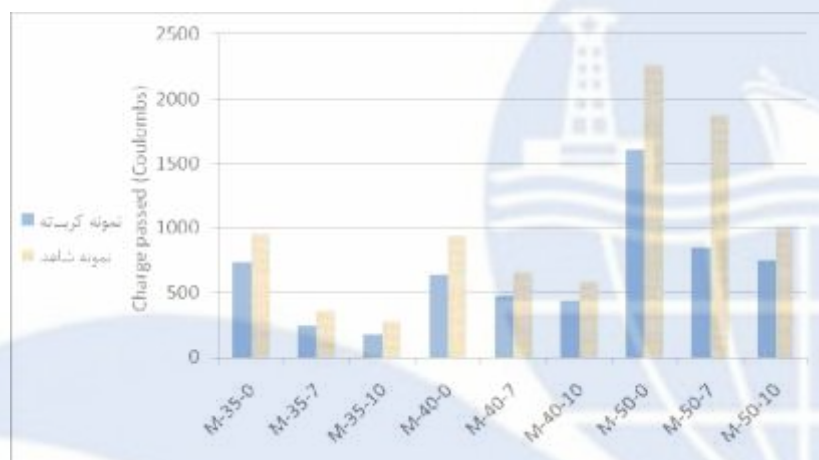
شکل ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۷۰ روز

### بررسی اثر کربناسیون در نتایج آزمایش RCPT

نمودار شکل ۶ و ۷ تغییرات شار عبوری در آزمایش RCPT را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به قرارگیری نمونه‌ها در سلولهای دستگاه آزمایش و یکسان بودن شرایط ساخت نمونه‌ها، تغییرات شار عبوری در این آزمایش را می‌توان به اثر کربناسیون نسبت داد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه کربناسیون موجب کاهش تخلخل در سطح مجاور کلرید سدیم شده است لذا شار عبوری نیز کاهش یافته است. مقایسه نمودارها همچنین نشان می‌دهد که با افزایش درصد دوده سیلیسی، اثر کربناسیون در کاهش شار عبوری کمتر شده است. علت این امر را می‌توان در کم شدن هیدروکسید کلسیم در نمونه‌های دارای دوده سیلیس و در نتیجه کاهش اثر گاز CO<sub>2</sub> در تغییرات تخلخل دانست.



شکل ۶: نتایج آزمایش RCPT در سن ۲۸ روز در نمونه کربناته و شاهد

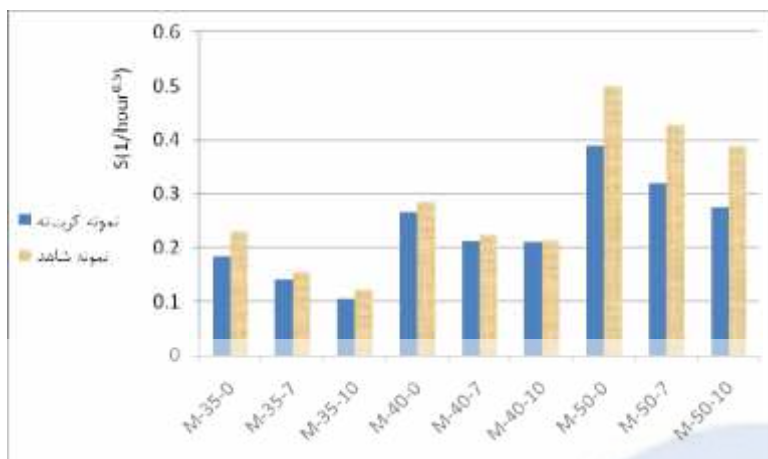


شکل ۷: نتایج آزمایش RCPT در سن ۹۰ روز در نمونه کربناته و شاهد

اثر دوده سیلیس در کاهش تخلخل بتن و غالب شدن این اثر بر کاهش تخلخل ناشی از کربناسیون نیز از دیگر دلایل کم شدن اثر کربناسیون در تغییرات شار عبوری در نمونه‌های با دوده سیلیس می‌باشد. نتایج مشابه بر اساس کارهای J.M.Chi و همکاران [۶۷] نیز نشان می‌دهد که در عمق کربناسیون بیش از ۱ سانتیمتر، تغییرات میزان شار عبوری در آزمایش RCPT کاملا مشهود است. با توجه به اینکه در نمونه‌های موجود عمق کربناسیون بیش از ۱ سانتیمتر است لذا نتایج گرفته شده روند مشابه با مرجع [۵] را نشان می‌دهد.

### اثر کربناسیون در میزان جذب موئینه آب

به منظور کنترل اثر کربناسیون در تغییرات تخلخل بتن، آزمایش جذب آب موئینه بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمودار شکل ۸ و ۹ تغییرات ضریب جذب موئینه (S) را در مقابل طرح اختلاطها برای نمونه‌های کربناته و غیر کربناته نشان می‌دهد. روند تغییرات ضریب S تا حد زیادی مشابه آزمایش RCPT می‌باشد. به عبارت دیگر در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان بالا و دوده سیلیس کمتر اثر کربناسیون در کاهش ضریب S بیشتر و با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش دوده سیلیس این اثر کمتر می‌شود.



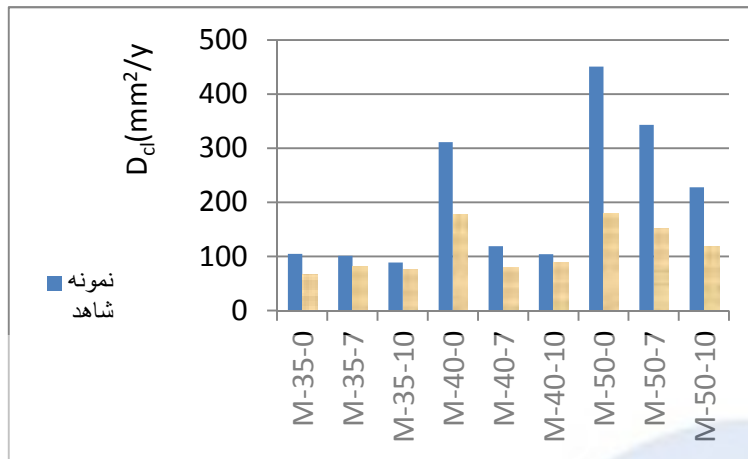
شکل ۸: نتایج آزمایش جذب موئینه در سن ۲۸ روز در نمونه کربناته و شاهد



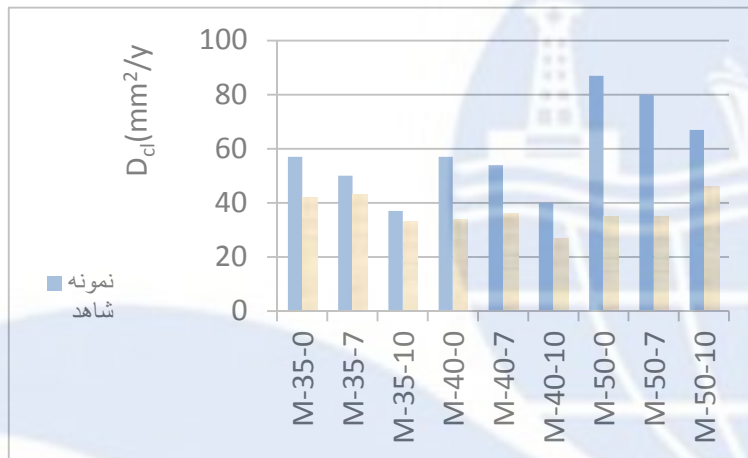
شکل ۹: نتایج آزمایش جذب موئینه در سن ۹۰ روز در نمونه کربناته و شاهد

### تغییرات ضریب نفوذ کلراید در اثر کربناسیون

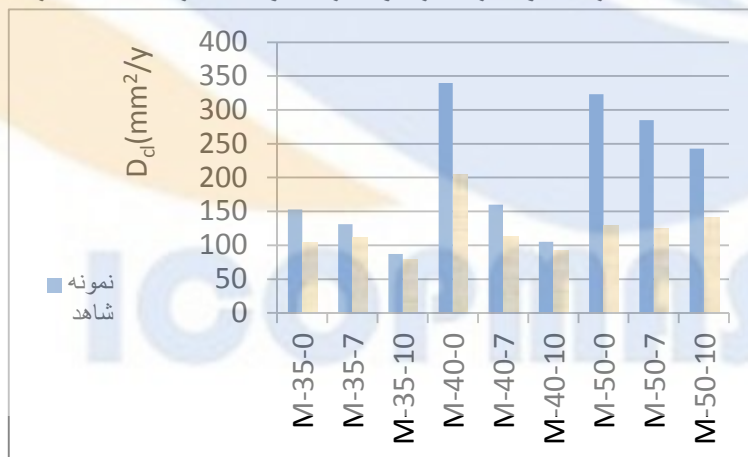
نمودار شکل ۱۱ تا ۱۳ مقایسه ضریب نفوذ کلراید در بتنهای کربناته و شاهد در مقابل طرح اختلاط نمونه ها را برای سه مورد شرایط محیطی، مستغرق، اتمسفر و تر و خشک نشان می‌دهد. علی‌رغم اینکه ضرایب  $D_{Cl}$  در سه محیط معرفی شده تفاوت محسوسی با هم دارند ولی روند تغییرات ضریب  $D_{CL}$  در هر سه محیط تقریباً مشابه است. نمودارها نشان می‌دهند که کربناسیون می‌تواند ضریب  $D_{CL}$  را تا حدود ۵۰٪ کاهش دهد. این امر در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ تقریباً مستقل از میزان میکروسیلیس شده است و لذا می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت‌های آب به سیمان بالاتر از ۰/۵ عملاً اثر کربناسیون مستقل از میزان میکروسیلیس خواهد شد. علت این امر را می‌توان در بزرگ شدن حفرات موئینه بتن در نسبت‌های آب به سیمان بالا و عدم توانایی میکروسیلیس در پر کردن این حفرات دانست. با این حال در نسبت‌های آب به سیمان پایین درصد میکروسیلیس اثر خود را نشان داده و مشاهده می‌شود که با افزایش میزان میکروسیلیس اثر کربناسیون در کاهش ضریب  $D_{CL}$  نیز کمتر می‌شود. مقایسه نمودارها همچنین نشان می‌دهد که در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ اثر نسبت آب به سیمان بر درصد میکروسیلیس تا حدی غالب گشته به نحوی که اثر کاهنده کربناسیون در نفوذ کلراید تقریباً روند ثابتی را پیدا می‌کند.



شکل ۱۰: ضریب نفوذ کلراید در نمونه کربناته و شاهد در محیط مستغرق



شکل ۱۱: ضریب نفوذ کلراید در نمونه کربناته و شاهد در محیط اتمسفر



شکل ۱۲: ضریب نفوذ کلراید در نمونه کربناته و شاهد در محیط تر و خشک

### مدل برازش خطی برای مدلسازی نفوذ کلراید

به منظور تعیین اثر کربناسیون در نفوذ یون کلرید در بتن ضریبی بدون بعد به صورت زیر تعریف شد و برای مقادیر اصلی طرح اختلاطها محاسبه گردید.

$$\beta = \frac{(D_{cl})_{non-carbonated} - (D_{cl})_{carbonated}}{(D_{cl})_{non-carbonated}} \quad (5)$$

ضریب  $\beta$  در معادله فوق بیانگر میزان تغییرات ضریب نفوذ کلراید در اثر کربناسیون می باشد

به منظور تعیین تابع تغییرات  $\beta$  تابع برآزش خطی مشابه تابع زیر جهت تعیین  $\beta$  مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه در بدست آوردن مقادیر  $\beta$  تعداد پارامترهای ورودی برای نسبت  $W/C$  و درصد میکروسیلیس ۳ بود لذا حداکثر توان تابع پیشنهادی، ۲ در نظر گرفته شد.

$$\beta = \sum_{i=0}^1 \cdot \sum_{j=0}^2 \cdot a_{i,j} \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^i \cdot (S.F)^j \quad (6)$$

با حداقل کردن مقادیر تابع خطا تابع  $\beta$  برای شرایط محیطی مختلف به صورت زیر بدست می آید [۶]:

$$\beta_{submerg} = 0.10 - 0.1 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) - 1.30 \cdot (S.F) + 2 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 + 0.164 \cdot (S.F)^2 + 6.23 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) \cdot (S.F) - 0.78 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) \cdot (S.F)^2 - 7.00 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 \cdot (S.F) + 0.9 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 \cdot (S.F)^2 \quad (aV)$$

$$\beta_{atmospheric} = -1.82 + 8.0 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) + 6.29 \cdot (S.F) - 7.33 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 - 0.1 \cdot (S.F)^2 - 3.41 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) \cdot (S.F) + 0.02 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) \cdot (S.F)^2 + 4.00 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 \cdot (S.F) - 0.77 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 \cdot (S.F)^2 \quad (bV)$$

$$\beta_{tidal} = 0.133 - 0.40 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) - 1.22 \cdot (S.F) + 2.77 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 + 0.140 \cdot (S.F)^2 + 0.03 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) \cdot (S.F) - 0.68 \cdot \left(\frac{W}{C}\right) \cdot (S.F)^2 - 6.12 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 \cdot (S.F) + 0.76 \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^2 \cdot (S.F)^2 \quad (cV)$$

### جمع بندی

در مقاله حاضر اثر نفوذ کربناسیون در نفوذ کلراید در بتنهای حاوی دوده سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. رویه انجام مطالعات به این صورت بود که نمونه های بتنی ابتدا کربناته شدند سپس به مدت یک سال در معرض نفوذ یون کلراید قرار گرفتند تا اثر کربناسیون در تغییرات ضریب نفوذ کلراید بررسی گردد. همچنین آزمایشهای تسریع یافته مانند RCPT، جذب موئینه و مقاومت فشاری نیز در نمونه های کربناته و غیر کربناته انجام شد. در مجموع نتایج زیر از انجام آزمایشها و مدلسازیها بدست آمد:

- ۱- در اثر کربناتاسیون پروفیل یون کلراید دستخوش تغییراتی می گردد. در نتیجه این تغییرات مقادیر غلظت یون کلراید در نواحی کربناته سطح بتن از مقادیر پیش بینی شده توسط قانون فیک کمتر خواهد بود.
- ۲- در اثر کربناتاسیون خصوصیات بتن کربناته (لایه بیرونی و سطحی بتن) دچار تغییر می گردد. این تغییرات بر نفوذ پذیری بتن در برابر یون کلراید نیز تاثیر گذار خواهد بود. بنابراین در مورد بتن های کربناته نمی توان از صورت اولیه تئوری انتشار فیک جهت بررسی پارامترهای نفوذ یون کلراید بهره برد و باید بتن را به صورت مصالحی دو لایه (لایه بیرونی بتن کربناته و لایه درونی بتن غیر کربناته) در نظر گرفت.
- ۳- نتایج آزمایشهای تسریع یافته نشان می دهد که کربناسیون موجب کاهش در شار عبور در آزمایش RCPT و همچنین موجب کاهش عمق نفوذ و ضریب جذب موئینه در آزمایش جذب آب موئینه می شود. با این حال در آزمایش مقاومت فشاری روال مشخصی مشاهده نمی شود.

### مراجع

- ۱- Sang-Hwa Jung, Young-Jun Choi, Bong-Chun Lee, Influence of carbonation on the chloride diffusion in concrete, construction material research center, Korea institute of construction materials, ۱۶۶۵-۴, PP. ۱۱۹۱-۱۱۹۶.
- ۲- David Conciatori, Francine Laferrier, Eugen Bruhwiler, ۲۰۱۰, Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate, Cement and Concrete Research ۴۰, ۱۰۹-۱۱۸.
- ۳- Geraldine Villain, Mickael Thiery, ۲۰۰۵, Impact of carbonation on microstructure and transport properties of concrete, ۱۰ DBMC international Conference on Durability of Building Materials and Components, LYON, France.
- ۴- Ha-Won Song, Jong-Chul Jang, Velu Saraswathy, Keun-Joo Byun, ۲۰۰۷, An estimation of the diffusivity of silica fume concrete, Building and Environment ۴۲, ۱۳۵۸-۱۳۶۷.

- ۵- Jack M. Chi, Ran Huang, C. C. Yang, ۲۰۰۲ " EFFECTS OF CARBONATION ON MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF CONCRETE USING ACCELERATED TESTING METHOD", Journal of Marine Science and Technology, Vol. ۱۰, No. ۱, pp. ۱۴-۲۰
- ۶- A.Delnavaz, A.A.Ramezaniapour " The assessment of carbonation effect on chloride diffusion in concrete based on artificial neural network model" Magazine of Concrete Research, Volume ۶۴ Issue ۱
- ۷- IN-SEOK YOON and CHANG-SOO LEE, ۲۰۰۴, Prediction of chloride profile of concrete under combined deterioration of carbonation and chloride ions, Consec-۴, Seoul, Korea, PP. ۳۵۳-۳۶۰.
- ۸- H.Song, S.Pack, C.Lee (۲۰۰۶) "service Life Prediction of Concrete Structures Under Marine Environment Considering Coupled Deterioration"
- ۹- علی دلتوازه، علی اکبر رمضانینپور " بررسی اثر کربناسیون در میزان نفوذ کلراید در بتنهای حاوی دوده سیلیسی "، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

۱۳۹۰



## The Effect of Carbonation on Physical Characteristics of Concretes Containing Silica Fume

A. Delnavaz, assistant professor, Islamic Azad University, Qazvin Branch

[alidelnavaz@yahoo.com](mailto:alidelnavaz@yahoo.com)

### Abstract:

The environmental damage of concrete is a nonlinear complicated phenomenon and is due to simultaneous effects of various phenomena. Carbonation has been known as one of the main factors in destruction of armed concrete structures. In assessment of the effect of carbonation on concrete structures, two various effects have been observed; on one hand, because of converting Lime to calcium carbonate, carbonation lowers concrete porosity and has a positive effect which doesn't let the destructive material to penetrate in concrete, and on the other hand, with lowering the PH in concrete, carbonation can be proposed as the main factor in armature corrosion. Various studies have been done on the effect of carbonation on concrete structures. Nevertheless, studies done on concretes containing silica fume are limited and the present research investigates the effect of carbonation in decreasing porosity of concretes containing silica fume. With carbonating various concrete samples with water-concrete proportions and various micro silica doses, the effect of carbonation on concrete permeability reduction is assessed in comparison to control samples doing various tests in different concrete ages. Finally, based on laboratory results, the effect of carbonation on porosity reduction has been presented as a mathematical model.

**Key words:** Carbonation, porosity, Silica fume

ICOPMAS