



## تعیین ضریب نفوذ یون کلراید در بتنهای کربناته شده حاوی میکروسیلیس

علی دلنواز<sup>۱</sup>، علی اکبر رمضانیاپور<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.  
۲- دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ مهرماه ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۸ بهمن ماه ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۰ فروردین ماه ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

کربناسیون  
تخلخل  
دوده سیلیس

**چکیده:** هدف از تحقیق حاضر تعیین مدلی است که بتواند در پیش بینی فرآیند خوردگی منجر به خرابی بتن به کار رود. این مدل به طور خاص بر روی مدل نفوذ هم‌زمان یون کلراید و پدیده کربناسیون بتن تحت شرایط محیطی مشخص متمرکز می‌شود. در این مقاله اثر نفوذ هم‌زمان یون کلراید و پدیده کربناتاسیون از طریق آزمایش بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی در دو حالت بررسی می‌شود: ۱- نمونه ابتدا تحت اثر گاز دی‌اکسید کربن و سپس تحت نفوذ یون کلراید قرار می‌گیرد. ۲- نمونه تحت اثر نفوذ کلراید به تنهایی قرار می‌گیرد. نمونه‌های مورد آزمایش شامل ۹ طرح اختلاط با سه نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۵ و سه درصد دوده سیلیس ۰٪، ۷٪ و ۱۰٪ می‌باشند. آزمایش‌های انجام شده در تحقیق شامل آزمایش‌های نفوذ یون کلراید تسریع یافته (RCPT)، جذب موئینه، نفوذ آب تحت فشار و مقاومت فشاری بتن می‌باشد. آزمایش‌های بلند مدت نیز شامل نفوذ یون کلراید و تعیین پروفیل یون کلراید و تعیین ضریب نفوذ یون کلراید در نمونه‌های شاهد و کربناته می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از تاثیر مستقیم کربناسیون بر کاهش میزان شار عبوری در آزمایش نفوذ یون کلراید تسریع یافته و هم‌چنین کاهش ضریب جذب موئینه در آزمایش جذب موئینه آب می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی اثر کربناسیون بر کاهش شار عبوری و هم‌چنین ضریب جذب موئینه آب افزایش می‌یابد ولی با افزایش درصد دوده سیلیس این اثر کاهش می‌یابد. در نهایت بر اساس نتایج آزمایش‌های بلند مدت با استفاده از مدل‌های برازش خطی میزان تغییرات ضریب نفوذ یون کلراید در اثر کربناسیون بتن و تعیین غلظت یون کلراید در بتن‌های کربناته ارائه شده است.

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]. pH بتن با نفوذ و انتشار گازهای موجود در محیط و تشکیل اسیدها تغییر می‌یابد. گازهای موثر اصلی عبارتند از CO<sub>2</sub> هوا و SO<sub>3</sub> موجود در آب باران [۲].

در این میان دی‌اکسید 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 دی‌اکسید 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)

### ۱- 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 خرابی‌های 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.

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

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.

پیچ<sup>۱</sup> و ونستند<sup>۲</sup> [۳] احتمال افزایش حلالیت نمک فریدل در سیمان‌های حاوی میکروسیلیس را بررسی کردند. این گروه در مطالعه خود نمونه‌های بتنی با ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان را ساخته و تغییرات فلیائیت محلول منفذی و درگیری کلراید را مشاهده کردند.

سوامی<sup>۳</sup> و سوریاواناشی<sup>۴</sup> [۴] با توجه به نتایج این مقاله، اثر کربناتاسیون را در پایداری نمک فریدل بررسی کردند. این گروه تعدادی دال بتنی مختلف با نسبت‌های آب به مواد سیمانی (w/b) و استفاده از افزودنی‌های معدنی مانند میکروسیلیس و سرباره کوره ذوب آهن و خاکستر بادی را ساختند. دال‌ها سپس تحت اثر سیکل‌های ترو و خشک قرار داده شدند. نتایج آزمایش حاکی از افزایش حلالیت نمک فریدل در نواحی کربناته بود. ایشیدا<sup>۵</sup> و میاکاوا<sup>۶</sup> [۵-۷] با استفاده از معادلات ترمودینامیک و انتقال جرم حاکم بر بتن یک مدل المان محدود را برای پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح ارائه کردند. این مدل محاسباتی در نرم‌افزاری تحت عنوان DuCOM ارائه شد که قادر به مدل‌سازی پدیده‌های خرابی در بتن و تحلیل‌های حرارتی می‌باشد.

لین<sup>۷</sup> و لیانگ<sup>۸</sup> [۸] در مقاله خود اثر هم‌زمان مواد شیمیایی را در سازه‌های بتن مسلح با استفاده از معادلات نفوذ یک‌بعدی بررسی کردند. این گروه با استفاده از روش تبدیل لاپلاس و قضیه Convolution، حل تحلیلی از معادله نفوذ ارائه کردند و اثر هم‌زمان نفوذ  $Cl^-$  و  $CO_2$  و هم‌چنین  $Cl^-$  و  $SO_4^{2-}$  و نیز  $CO_2$  و  $SO_4^{2-}$  را در معادلات وارد کردند. برای در نظر گرفتن اثر هم‌زمان ترکیبات فوق، این گروه از یک ضریب تعویق R در معادلات خود استفاده کردند تا اثر هر کدام از یون‌ها در روی عامل دیگر بررسی کنند.

رزاقپور و همکاران [۹] یک مدل عددی را برای در نظر گرفتن اثر هم‌زمان انتقال دما، رطوبت، نفوذ کلراید و پدیده کربناتاسیون در بتن ارائه کردند. مدل ارائه شده شامل حل عددی معادلات دو بعدی حاکم بر نفوذ می‌شد. این گروه از روش اجزا محدود برای حل معادلات استفاده کردند. اثر کربناتاسیون در تغییر ساختار منافذ بتن و اثر متقابل آن بر انتقال رطوبت و کلراید در این مدل در نظر گرفته شده است. تأثیر کربناتاسیون در آزاد کردن کلراید در کار این گروه وارد نشده است. مدل

این گروه در نرم‌افزاری تحت عنوان CONDOUR ارائه شده است. پواتاتسانانون<sup>۹</sup> و سوما<sup>۱۰</sup> [۱۰] یک مدل عددی غیر خطی را برای نفوذ هم‌زمان کلراید و کربناتاسیون در بتن ارائه کردند. مدل این گروه تا حد زیادی شبیه مدل ارائه شده توسط رزاقپور بود با این تفاوت که این گروه از روش تفاضل محدود برای حل معادلات استفاده کرده بودند. گرما، رطوبت نسبی، نفوذ کلراید و کربناتاسیون پدیده‌هایی هستند که در این تحقیق این گروه به صورت مدل‌های تفاضل محدود بررسی شدند. اثر نفوذ هم‌زمان کلراید و کربناتاسیون در دو مدل بتن همگن و ناهمگن بررسی شده است.

سانگ<sup>۱۱</sup> و هنکاران [۱۱] (۲۰۰۶) [۱۱] یک مدل عددی را برای پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح تحت اثر نفوذ هم‌زمان کلراید و کربناتاسیون ارائه کردند. مدل ارائه شده توسط این گروه نیز تا حدی شبیه کارهای ایشیدا می‌باشد که شامل مدل‌های هیدراتاسیون حرارتی اجزای بتن، مدل تشکیل ریزساختارها، مدل انتقال جرم، نفوذ کلراید، کربناتاسیون و مدل خوردگی فولاد می‌باشد. در مدل ارائه شده توسط این گروه از روش اجزا محدود برای حل معادلات حاکم بر پدیده نفوذ استفاده شد. این مدل هم‌چنین قادر به مدل‌سازی خرابی ناشی از اثرات هم‌زمان نفوذ رطوبت، کلراید و تغییرات ساختاری بتن تحت اثر پدیده کربناتاسیون می‌باشد. مدل این گروه اثر کربناتاسیون در آزاد کردن کلراید را از طریق معادلات تجربی در نظر می‌گیرد. نتایج حاصل از مدل ارائه شده برای نفوذ کلراید با نتایج حاصل از نمونه‌گیری‌های یک پل رودخانه‌ای اعتبارسنجی شد. از دیگر مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی نفوذ یون کلراید در محیط‌های کربناته می‌توان به مطالعات میجرز<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۲]، بولفیزا<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۳] و مدل یون<sup>۱۴</sup> [۱۴] نیز اشاره کرد. 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 پروفیل‌گیری 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<sup>۱۵</sup> 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.

9 Puatatsananon  
10 Saouma  
11 Song  
12 Meijers  
13 Boulfiza  
14 Yoon  
15 diffusion

1 Page  
2 Vennešland  
3 Swamy  
4 Suryavanashi  
5 Ishida  
6 Maekawa  
7 Lin  
8 Liang

## ۲- برنامه آزمایش ها

### ۲-۱ مشخصات مصالح

سیمان مصرفی در ساخت تمام نمونه ها از نوع سیمان پرتلند

تیپ ۴۲۵-۱ با جرم حجمی  $3150 \text{ kg/m}^3$  و بلین  $30 \text{ m}^2/\text{kg}$  می باشد. دوده سیلیس مصرفی نیز دارای جرم حجمی  $2900 \text{ kg/m}^3$  و بلین  $383 \text{ m}^2/\text{kg}$  می باشد. مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس بر حسب درصد وزنی اکسیدهای موجود در جدول ۱ ارائه شده است.

**جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و دوده سیلیس**  
**Chemical and physical properties of cement and silica fume**

	ترکیبات شیمیایی (%)								جرم مخصوص	بلین ( $\text{gr/cm}^2$ )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig.loss		
سیمان پرتلند	۲۱/۵۰	۳/۶۸	۲/۷۶	۶۱/۵۰	۴/۸۰	۰/۱۲	۰/۹۵	۱/۳۵	۳/۱۵	۳/۰
دوده سیلیس	۹۶	۰/۶	۰/۶	۰/۳	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۱/۷	۲/۹۰	۳/۸۳

در محفظه های حاوی محلول آب آهک اشباع و در دمای  $21 \pm 2$  درجه سانتی گراد انجام شده است. ابعاد نمونه ها در آزمایش نفوذ کلراید به صورت مکعب  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متری ساخته شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه عمق نفوذ در نمونه ها در حدود  $2/5$  سانتی متر در بیشترین حالت بود لذا انتخاب بعد نمونه ها تأثیری در نتایج نداشت. هم چنین با توجه به ابعاد نمونه های آزمایش حداکثر بعد سنگدانه نیز به  $2/5$  سانتی متر محدود شد. هر چند بر اساس مطالعات پیشین بعد حداکثر سنگدانه در مدل های نفوذ به میزان کمی مورد توجه بوده است و تأثیر آن بر ضریب نفوذ یون کلراید چندان مورد توجه نمی باشد.

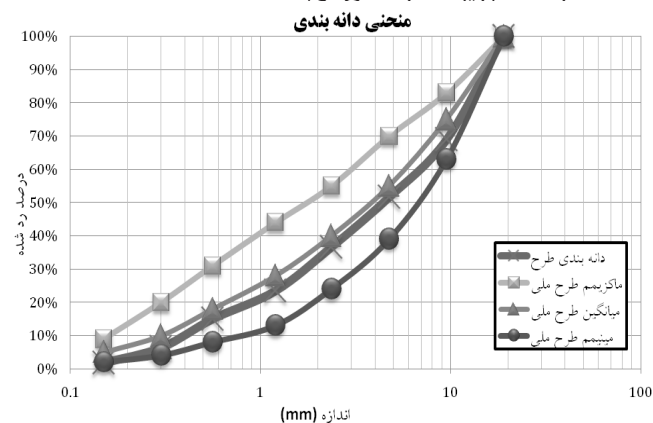
**جدول ۲. طرح اختلاط نمونه های بتنی**  
**Concrete mixing design**

شماره	ماسه	Csf/(c+csf)	W/(c+csf)	مخلوط آزمایش
۱۰۵۰	۸۰۰	۰	۰/۳۵	۵-۳۵-M
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۷	۰/۳۵	۷-۳۵-M
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۱۰	۰/۳۵	۱۰-۳۵-M
۱۰۵۰	۸۰۰	۰	۰/۴۰	۵-۴۰-M
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۷	۰/۴۰	۷-۴۰-M
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۱۰	۰/۴۰	۱۰-۴۰-M
۱۰۵۰	۸۰۰	۰	۰/۵۰	۵-۵۰-M
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۷	۰/۵۰	۷-۵۰-M
۱۰۵۰	۸۰۰	٪۱۰	۰/۵۰	۱۰-۵۰-M

### ۳-۲- کربناته کردن نمونه ها

با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر کربناسیون در تغییر مشخصات بتن می باشد لذا نمونه ها در دو حالت کربناته و غیر کربناته مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور کربناته کردن بتن، نمونه ها، بعد از عمل آوری ۲۸ روزه، تعدادی از نمونه ها به منظور انجام فرایند کربناسیون در دستگاه کربناسیون در رطوبت ۶۰٪ و به مدت ۱ ماه تحت اثر گاز CO<sub>2</sub> قرار گرفتند. نمونه های کنترلی نیز به منظور کنترل کربناته

سنگدانه مصرفی نیز در تمام نمونه ها با دانه بندی استاندارد و دارای مدول نرمی ۳ می باشند. شکل ۱ منحنی دانه بندی مورد استفاده در مصالح ریز دانه را نشان می دهد.



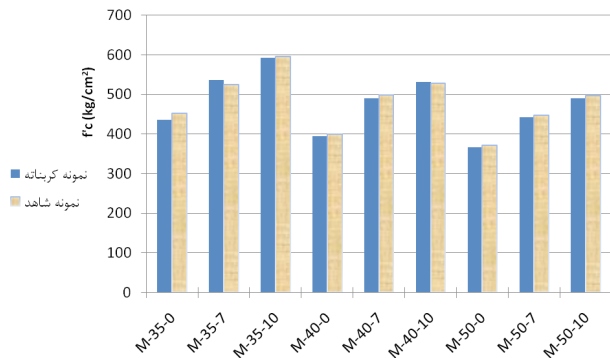
**شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی در قیاس با طرح اختلاط ملی**  
**Granular aggregate curve of sand in comparison with national mix design**

### ۲-۲ مشخصات طرح اختلاط نمونه ها

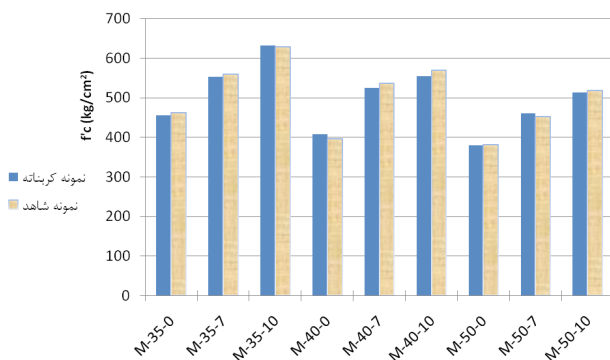
برای ساخت نمونه ها در مجموع ۹ طرح اختلاط با مقدار سیمان ثابت  $400 \text{ kg/m}^3$  مورد استفاده قرار گرفت. نسبت آب به مواد سیمانی، ۳ مقدار  $0/35$ ،  $0/4$  و  $0/5$  در نظر گرفته شد. هم چنین میکروسیلیس نیز به صورت ۳ میزان ۰٪، ۷٪ و ۱۰٪ جایگزین سیمان در تهیه نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ مشخصات طرح اختلاط های مورد استفاده در آزمایش ها را نشان می دهد. در این جدول C بیانگر مقدار سیمان و Csf بیانگر میزان میکروسیلیس است.

فوق روان کننده مصرفی در ساخت نمونه ها نیز از نوع خنثی و بدون یون کلراید انتخاب شده است. ساخت نمونه ها بر اساس آیین نامه آبا انجام شده است. در ساخت نمونه ها اسلامپ بین ۵ تا ۷ سانتی متر به عنوان اسلامپ هدف مد نظر قرار گرفته است. عمل آوری نمونه ها

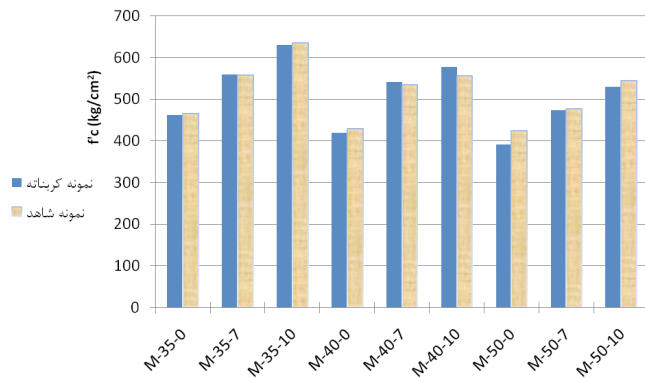
دارد لذا اثر کرناسیون در تغییر مقاومت مشهود نمی باشد. نتیجه مشابه این تحقیق در مرجع [۱۴] نیز مورد اشاره قرار گرفته است.



شکل ۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز  
Results of compressive strength testing at 28 days age



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز  
Results of compressive strength testing at 90 days age



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۷۰ روز  
Results of compressive strength testing at 270 days age

۳-۲- آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلرید در بتن (RCPT)  
در آزمایش RCPT بار عبوری از نمونه بتنی طبق استاندارد ASTM C1202 یا AASHTO T277 اندازه گیری و از آن برای درجه بندی بتن طبق معیار استاندارد استفاده می شود. برای انجام این آزمایش باید نمونه هایی استوانه ای به قطر ۱۰/۲ سانتی متر (۴ اینچ) و ارتفاع  $51 \pm 3$

شدن نمونه ها در مخزن قرار داده می شد. میزان گاز ورودی به میزانی تعیین می شد که حداقل نصف فضای داخل مخزن با گاز دی اکسید کربن اشغال شود. به این منظور میزان گاز خروجی با توجه به دبی گاز خروجی (مشاهده شده از درجه رگلاتور) و اندازه گیری زمان تعیین می شد. با این حال با توجه به امکان نشت گاز، تزریق گاز در چند نوبت انجام می شد. برای کنترل میزان عمق کرناسیون در نمونه های کنترل از محلول فنل فتالین استفاده شد. نمونه های کربناته شده به همراه نمونه های شاهد به مدت ۲۷۰ روز در سه شرایط محیطی مستغرق، جزر و مد و بالاتراز سطح آب (اتمسفرف) در مقابل یون کلراید قرار گرفتند. غلظت یون کلراید در محیط به میزان 30 gr/lit در نظر گرفته شد.

### ۳- تحلیل نتایج آزمایش ها

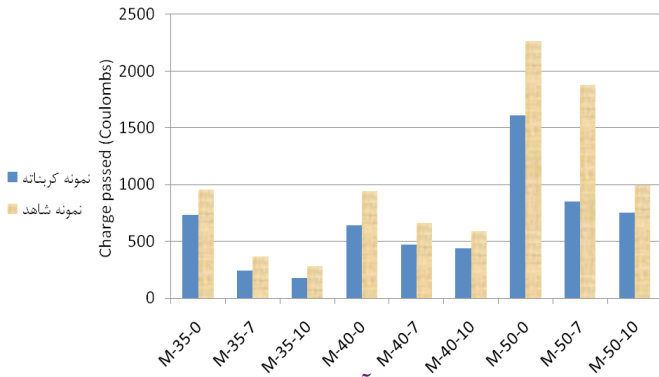
#### ۳-۱- مقاومت فشاری نمونه ها

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی ۱۰ سانتی متری در سن ۲۸، ۹۰ و ۲۷۰ روز بر اساس استاندارد ASTM C39 انجام شد. جدول ۳ میانگین نتایج بر روی سه نمونه را برای هر طرح اختلاط نشان می دهد.

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها (kg/cm<sup>2</sup>)  
Results of the compressive strength test of samples

طرح اختلاط	نمونه کربناته شده			نمونه شاهد		
	سن عمل آوری	۲۸	۹۰	سن عمل آوری	۲۸	۹۰
M-35-0	۲۷۰	۴۳۶	۴۵۶	۲۸	۴۵۳	۴۶۲
M-35-7	۲۷۰	۵۳۷	۵۵۲	۲۸	۵۲۵	۵۵۹
M-35-10	۲۷۰	۵۹۳	۶۳۲	۲۸	۵۹۵	۶۲۹
M-40-0	۲۷۰	۳۹۴	۴۰۸	۲۸	۴۰۰	۳۹۷
M-40-7	۲۷۰	۴۹۰	۵۲۴	۲۸	۴۹۸	۵۳۶
M-40-10	۲۷۰	۵۳۲	۵۵۵	۲۸	۵۲۸	۵۶۹
M-50-0	۲۷۰	۳۶۶	۳۷۹	۲۸	۳۷۲	۳۸۲
M-50-7	۲۷۰	۴۴۳	۴۶۰	۲۸	۴۴۸	۴۵۳
M-50-10	۲۷۰	۴۹۰	۵۱۳	۲۸	۴۹۶	۵۱۸

نمودار شکل های ۲ تا ۴ مقاومت نمونه های کربناته و کربناته نشده بر اساس نوع طرح اختلاط و سن نمونه ها را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود تغییرات مقاومتی در نمونه ها بر اساس کربناته بودن یا نبودن نمونه ها روند مشخصی را ندارد و عملاً کرناسیون تغییر مشخصی در مقاومت نمونه ها ایجاد نمی کند. علت این امر را می توان در عمق کم کرناسیون نسبت به ابعاد نمونه دانست به عبارت دیگر علی رغم اینکه انتظار می رود با کرناسیون سطح، مقاومت این لایه افزایش یابد ولی چون مقاومت نمونه مکعبی بیشتر تحت تاثیر لایه های میانی بتن قرار



شکل ۶. نتایج آزمایش RCPT در سن

۹۰ روز در نمونه کربناته و شاهد

**Results of RCPT test at 90 days in car-bonate and control samples**

اثر دوده سیلیس در کاهش تخلخل بتن وغالب 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 می باشد. نتایج مشابه در مرجع [۱۴] نیز نشان می دهد که در عمق کربناسیون بیش از ۱ سانتی متر، تغییرات میزان شار عبوری در آزمایش RCPT کاملاً مشهود است. با توجه به اینکه در نمونه‌های موجود عمق کربناسیون بیش از ۱ سانتی متر است لذا نتایج گرفته شده روند مشابه با مرجع [۱۴] را نشان می دهد.

**۳-۳- 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 می شوند. سپس، نمونه‌ها در داخل طرف آب به نحوی قرار می گیرند که ۵/۰ سانتی متر 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 می شود. جدول ۵ نتایج آزمایش جذب آب موئینه را برای ۹ طرح اختلاط در سن ۲۸ و ۹۰ روز نشان می دهد. نتایج ارائه شده میانگین نتایج برای ۳ نمونه می باشد.

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

**Experimental results of absorption test (weight change percentage of samples)**

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

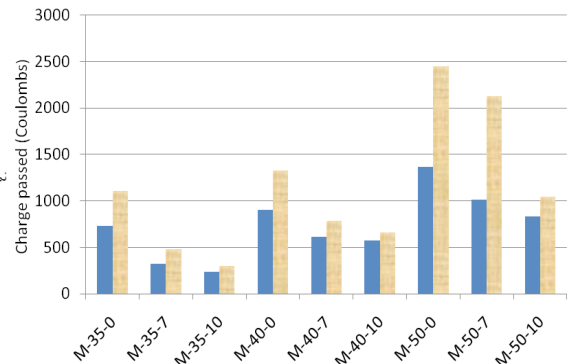
سانتی متر (۲±۱/۸) اینچ تهیه شود. جدول ۴ نتایج آزمایش RCPT را برای ۹ طرح اختلاط در سن ۲۸ و ۹۰ روز نشان می دهد. نتایج ارائه شده میانگین نتایج برای ۳ نمونه می باشد.

جدول ۴. نتایج آزمایش RCPT (کولومب)

**RCPT test results**

طرح اختلاط	نمونه کربناته شده		نمونه شاهد	
	سن عمل آوری	سن عمل آوری	سن عمل آوری	سن عمل آوری
	۲۸	۹۰	۲۸	۹۰
۰-۳۵-M	۷۳۰	۷۳۲	۱۱۰۴	۹۵۲
۷-۳۵-M	۳۲۴	۲۴۰/۵	۴۸۱	۳۶۷/۵
۱۰-۳۵-M	۲۳۶	۱۷۵	۲۹۹	۲۸۴/۵
۰-۴۰-M	۸۹۹	۶۴۳/۵	۱۳۲۳۳	۹۴۰
۷-۴۰-M	۶۱۵	۴۷۰	۷۸۵	۶۶۱/۵
۱۰-۴۰-M	۵۷۶	۴۳۸/۵	۶۶۱	۵۸۶/۵
۰-۵۰-M	۱۳۶۸	۱۶۱۰	۲۴۴۵	۲۲۶۰
۷-۵۰-M	۱۰۱۲	۸۴۸	۲۱۲۷	۱۸۷۷
۱۰-۵۰-M	۸۳۱	۷۵۱/۵	۱۰۴۶	۹۹۲

نمودار شکل های ۵ و ۶ تغییرات شار عبوری در آزمایش RCPT را برای نمونه‌های مختلف نشان می دهد. با توجه به قرارگیری نمونه‌ها در سلول های دستگاه آزمایش و یکسان بودن شرایط ساخت نمونه‌ها، تغییرات شار عبوری در این آزمایش را می توان 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 هم چنین نشان می دهد که با افزایش درصد دوده سیلیسی، اثر کربناسیون در کاهش شار عبوری کمتر شده است. علت این امر را می توان 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 ۵. نتایج آزمایش RCPT در سن

۲۸ روز در نمونه کربناته و شاهد

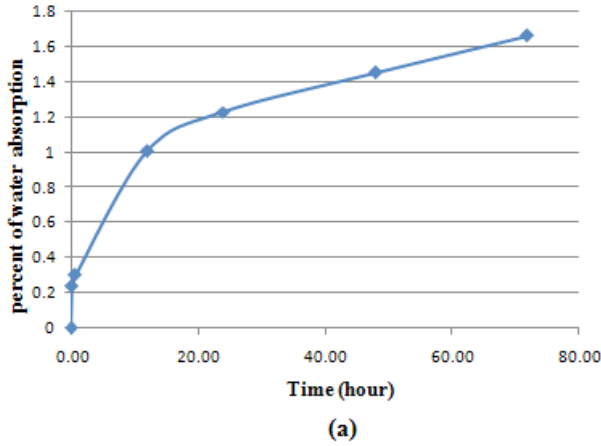
**Results of RCPT test at 28 days in car-bonate and control samples**



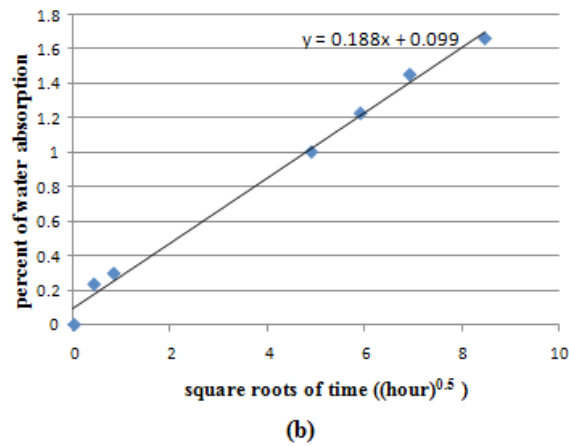
معادله ۱ به عنوان ضریب جذب موئینه شناخته می‌شود.

$$K = S \times t^{0.5} \quad (1)$$

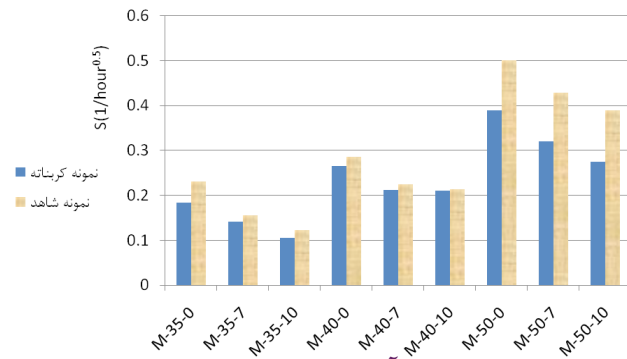
شکل ۷ نمونه‌ای از نتایج را برای یکی از طرح اختلاطها نشان می‌دهد. میزان ضریب جذب موئینه در جدول ۶ ارائه شده است.



از دیگر نتایجی که از آزمایش جذب موئینه می‌توان به دست 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

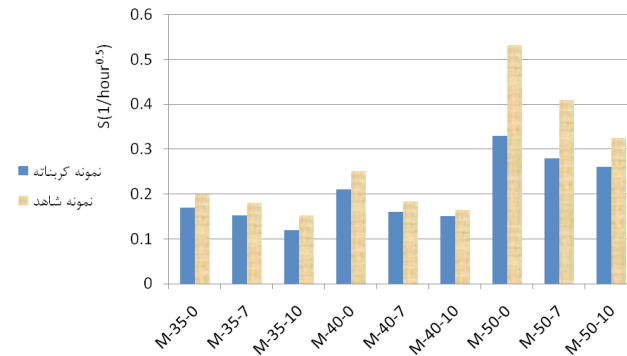


شکل ۷. مقایسه منحنی تغییرات وزن در آزمایش جذب موئینه و ضریب جذب موئینه  
Comparison of weight variation curve in absorption test



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

Experimental results of absorption test at 28 days of age in carbonate and control samples



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

Experimental results of absorption test at 90 days of age in carbonate and control samples

جدول ۶. نتایج آزمایش ضریب جذب موئینه (1/hour<sup>0.5</sup>)  
Experimental results of absorption test (1/hour<sup>0.5</sup>)

طرح اختلاط	نمونه کربناته شده		نمونه شاهد	
	سن عمل‌آوری	سن عمل‌آوری	سن عمل‌آوری	سن عمل‌آوری
۵-۳۵-M	۲۸	۹۰	۰/۲۳	۰/۱۷
	۲۸	۹۰	۰/۲۳	۰/۱۷
۷-۳۵-M	۲۸	۹۰	۰/۱۵۶	۰/۱۵۳
	۲۸	۹۰	۰/۱۵۶	۰/۱۵۳
۱۰-۳۵-M	۲۸	۹۰	۰/۱۲۳	۰/۱۲
	۲۸	۹۰	۰/۱۲۳	۰/۱۲
۰-۴۰-M	۲۸	۹۰	۰/۲۸۵	۰/۲۱
	۲۸	۹۰	۰/۲۸۵	۰/۲۱
۷-۴۰-M	۲۸	۹۰	۰/۲۲۵	۰/۱۶
	۲۸	۹۰	۰/۲۲۵	۰/۱۶
۱۰-۴۰-M	۲۸	۹۰	۰/۲۱۴	۰/۱۵
	۲۸	۹۰	۰/۲۱۴	۰/۱۵
۰-۵۰-M	۲۸	۹۰	۰/۵۰	۰/۳۳
	۲۸	۹۰	۰/۵۰	۰/۳۳
۷-۵۰-M	۲۸	۹۰	۰/۴۲۸	۰/۲۸
	۲۸	۹۰	۰/۴۲۸	۰/۲۸
۱۰-۵۰-M	۲۸	۹۰	۰/۳۸۹	۰/۲۶
	۲۸	۹۰	۰/۳۸۹	۰/۲۶

نمودار شکل‌های 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.

### جدول ۸. مقادیر ضریب نفوذ کلرید در نمونه‌های کربناته

Values of chloride diffusion coefficient in carbonated samples

Mix ID	Dcl(mm <sup>2</sup> /year) (مستغرق)	Dcl(mm <sup>2</sup> /year) (اتمسفر)	Dcl(mm <sup>2</sup> /year) (ترو خشک)
۰-۳۵-M	۶۷	۴۲	۱۰۴
۷-۳۵-M	۸۲	۴۳	۱۱۱
۱۰-۳۵-M	۷۷	۳۳	۷۹
۰-۴۰-M	۱۷۷	۳۴	۲۰۴
۷-۴۰-M	۸۰	۳۶	۱۱۲
۱۰-۴۰-M	۸۹	۲۷	۹۳
۰-۵۰-M	۱۸۰	۳۵	۱۲۹
۷-۵۰-M	۱۵۱	۳۵	۱۲۵
۱۰-۵۰-M	۱۱۹	۴۶	۱۴۱

نمودار شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مقایسه ضریب نفوذ کلراید در بتن‌های کربناته و شاهد در مقابل طرح اختلاط نمونه‌ها را برای سه مورد شرایط محیطی، مستغرق، اتمسفر و ترو خشک نشان می‌دهد. علی‌رغم اینکه ضرایب Dcl در سه محیط معرفی شده تفاوت محسوسی با هم دارند ولی روند تغییرات ضریب DCL در هر سه محیط تقریباً مشابه است. نمودارها نشان می‌دهند که کربناسیون می‌تواند ضریب DCL 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 مویینه 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 DCL 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.

### ۳-۴- پروفیل یون کلرید

آزمایش تعیین پروفیل یون کلرید در سه شرایط محیطی مستغرق، اتمسفر و ترو خشک 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]:

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

پس از حل، معادله دیفرانسیل فوق بصورت زیر درمی‌آید:

$$C(x, t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (3)$$

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

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\beta^2} d\beta \quad (4)$$

در هر پروفیل، دو سری شش تایی درصد وزنی یون کلرید و عمق مربوطه وجود دارد. با استفاده از نرم افزار Matlab، منحنی مربوط به معادله ۲ از میان نتایج آزمایش برآزش شده و مقادیر Dcl و Cs بدست می‌آید. جداول 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

Values of chloride diffusion coefficient in control sample

Mix ID	Dcl(mm <sup>2</sup> /year) (مستغرق)	Dcl(mm <sup>2</sup> /year) (اتمسفر)	Dcl(mm <sup>2</sup> /year) (ترو خشک)
۰-۳۵-M	۱۰۵	۵۷	۱۵۳
۷-۳۵-M	۱۰۱	۵۰	۱۳۱
۱۰-۳۵-M	۸۹	۳۷	۸۷
۰-۴۰-M	۳۱۱	۵۷	۳۴۰
۷-۴۰-M	۱۱۹	۵۴	۱۶۰
۱۰-۴۰-M	۱۰۴	۴۰	۱۰۵
۰-۵۰-M	۴۵۱	۸۷	۳۲۳
۷-۵۰-M	۳۴۳	۸۰	۲۸۵
۱۰-۵۰-M	۲۲۸	۶۷	۲۴۳

#### ۴- مدل برازش خطی برای مدل سازی نفوذ کلراید

روش های مختلفی برای تعیین عمر مفید يك سازه بتن مسلح در مقابل عوامل محیطی وجود دارد. رایج ترین این روش های به صورت زیر است:

تخمین بر مبنای تجارب به دست آمده  
استنتاج از عملکرد مصالح مشابه  
آزمایش های تسریع شده

مدل سازی ریاضی بر پایه فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی

در بحث مدل سازی ریاضی روش هایی که وجود دارد شامل روش های شبیه سازی آماری، روش های شبکه عصبی، روش های برازش و ارائه مدل عددی و مدل سازی عددی مانند روش المان محدود است. در روش برازش اطلاعات، پس از به دست آوردن نتایج آزمایش يك تابع که حداقل خطا را نسبت به نتایج آزمایشگاهی ایجاد کند بدست می آید که مسلماً هر چه این تابع پارامترهای بیشتری را در نظر بگیرد دقت آن بالاتر خواهد بود. در حالت کلی این تابع به شکل زیر می باشد:

$$X = f(A, B, C, D, E_1, E_2, CE_1, CE_2, F_1, F_2, CF_1, CF_2, t_1, t_2) \quad (5)$$

در رابطه فوق  $x$  عمق نفوذ،  $A$  ترکیب شیمیایی سیمان،  $B$  مقدار سیمان،  $C$  نسبت های اختلاط،  $D$  تراکم بتن،  $E_1$  رطوبت نسبی در زمان عمل آوری،  $E_2$  دمای عمل آوری،  $F_1$  رطوبت محیط اطراف در هنگام عمل آوری،  $F_2$  دمای محیط و  $CE_1$ ،  $CE_2$  و  $CF_1$ ،  $CF_2$  اندرکنش بین عمل آوری و نسبت های اختلاط می باشد.

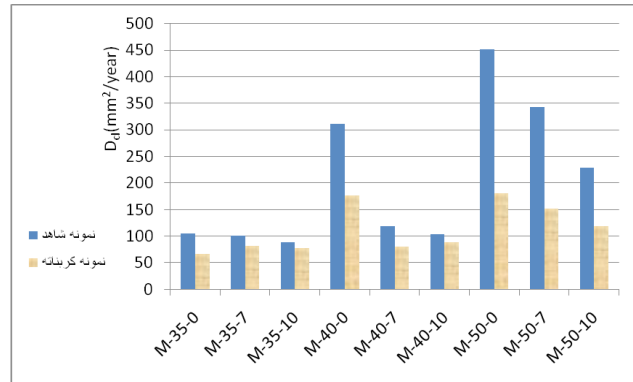
به منظور تعیین اثر کربناسیون در نفوذ یون کلرید در بتن ضریبی بدون بعد به صورت زیر تعریف شد و برای مقادیر اصلی طرح اختلاط ها محاسبه گردید.

$$\beta = \frac{(D_{cl})_{non-carbonated} - (D_{cl})_{carbonated}}{(D_{cl})_{non-carbonated}} \quad (6)$$

ضریب  $\beta$  در معادله فوق بیانگر میزان تغییرات ضریب نفوذ کلراید در اثر کربناسیون می باشد. به منظور تعیین تابع تغییرات  $\beta$  تابع برازش 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.

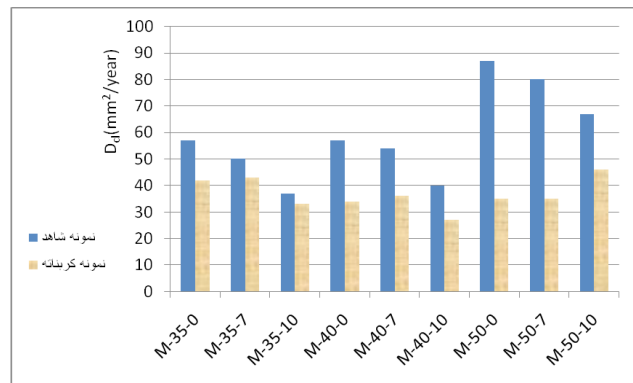
$$\beta = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{i,j} \left(\frac{W}{C}\right)^i \cdot (S.F)^j \quad (7)$$

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



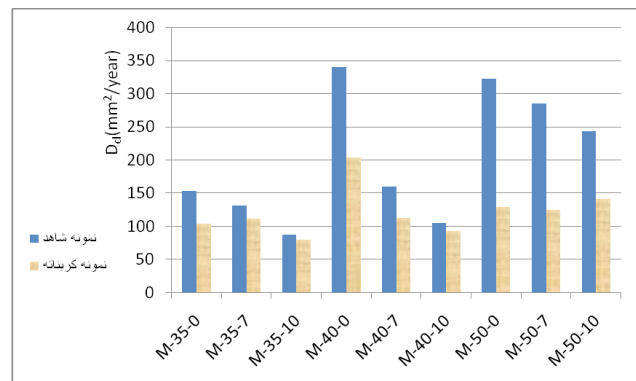
شکل ۱۰. ضریب نفوذ کلراید در نمونه کربناته و شاهد در محیط مستغرق

Chloride penetration coefficient in carbon-ate and control sample in submerged condition



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

Chloride penetration coefficient in carbon-ate and control sample in atmosphere condition



شکل ۱۲. ضریب نفوذ کلراید در نمونه کربناته و شاهد در محیط ترو خشک

Chloride penetration coefficient in carbon-ate and control sample in tidal condition



$$\beta_{submerg} = 0.15 - 0.1 * \left(\frac{W}{C}\right) - 1.35 * (S.F) + 2 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 + 0.164 * (S.F)^2 + 6.23 * \left(\frac{W}{C}\right) * (S.f) - 0.78 * \left(\frac{W}{C}\right) * (S.f)^2 - 7.05 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 * (S.F) + 0.9 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 * (S.F)^2 \quad (۸-الف)$$

$$\beta_{atmospheric} = -1.82 + 8.5 * \left(\frac{W}{C}\right) + 6.29 * (S.F) - 7.33 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 - 0.1 * (S.F)^2 - 3.41 * \left(\frac{W}{C}\right) * (S.f) + 0.52 * \left(\frac{W}{C}\right) * (S.f)^2 + 4.50 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 * (S.F) - 0.67 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 * (S.F)^2 \quad (۸-ب)$$

$$\beta_{tidal} = 0.133 - 0.40 * \left(\frac{W}{C}\right) - 1.22 * (S.F) + 2.67 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 + 0.145 * (S.F)^2 + 5.53 * \left(\frac{W}{C}\right) * (S.f) - 0.68 * \left(\frac{W}{C}\right) * (S.f)^2 - 6.12 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 * (S.F) + 0.76 * \left(\frac{W}{C}\right)^2 * (S.F)^2 \quad (۸-ج)$$

material research center, Korea institute of construction materials, 1465-4, PP. 1191-1196.

David Conciatori, Francine Laferrier, Eugen Bruhwiler, 2010, Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate, Cement and Concrete Research 40, 109-118.

C.C.Page, O.Vennesland (1983) "Effect of Carbonation on Chloride Binding" Materials and Constructions, Vol. 16, No. 19

A.Suryavanshi, R.Swamy (1996) "Stability of Friedels Salt in Carbonated Concrete Structural Elements" Cement And Concrete Research, Vol.26, No.5, pp.729-741

K.Maekawa, T.Ishida (2002) "Service Life Evaluation of Reinforced Concrete Under Coupled Forces and Environmental Actions" Proceedings of the JCI, Vol.20, No2, pp.691-696

K.Maekawa, T.Ishida (2003) "Multi-Scale Modeling of Concrete Performance Integrated Material and Structural Mechanics" Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1 pp.91-126

K.Maekawa, T.Ishida (2004) "Theoretical Identified Strong Coupling of Carbonation Rate and Thermodynamic Moisture States in Microspores of Concrete" Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2 pp.213-222

M.Lin, M.Liang (2003) "Modeling of Transport of Multiple Chemicals in Concrete Structures: Synergetic Effect Study" Cement and Concrete Research, Vol.33 pp.1917-1924

O.Burkan Isgor, A.Ghani Razaqpur (2005) "Advanced Modeling of Concrete Deterioration due to Reinforcement Corrosion"

W.Puatatsananon, V.E.Saouma, (2005) "Nonlinear Coupling of Carbonation and Chloride Diffusion in Concrete" Journal of Materials in Civil Engineering, v 17, No 3, pp 264-275

H.Song, S.Pack, C.Lee (2006) "service Life Prediction of Concrete Structures Under Marine Environment Considering Cou-

## ۵- 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 نمونه‌های 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 نمونه‌های کربناته و غیر کربناته انجام شد. در مجموع نتایج زیر از انجام آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌ها بدست آمد:

در اثر کربناتاسیون پروفیل یون کلرید دستخوش تغییراتی می‌گردد. در نتیجه این تغییرات مقادیر غلظت یون کلراید در نواحی کربناته سطح بتن از مقادیر پیش‌بینی شده توسط قانون فیک کمتر خواهد بود. در اثر کربناتاسیون خصوصیات بتن کربناته (لایه بیرونی و سطحی بتن) دچار تغییر می‌گردد. این تغییرات بر نفوذ پذیری بتن در برابر یون کلراید نیز تاثیر گذار خواهد بود. بنابراین در مورد بتن‌های کربناته نمی‌توان 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. نتایج آزمایش‌های تسریع یافته نشان می‌دهد 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 می‌شود. با این حال در آزمایش مقاومت فشاری روال مشخصی مشاهده نمی‌شود.

## مراجع

Sang-Hwa Jung, Young-Jun Choi, Bong-Chun Lee, Influence of carbonation on the chloride diffusion in concrete, construction

IN-SEOK YOON and CHANG-SOO LEE, 2004, "Prediction of chloride profile of concrete under combined deterioration of carbonation and chloride ions", Consec04, Seoul, Korea, PP. 353-360.

Jack M. Chi, Ran Huang, C. C. Yang, 2002 " EFFECTS OF CARBONATION ON MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF CONCRETE USING ACCELERATED TESTING METHOD", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 14-20

pled Deterioration"

S.J.H. Meijers, J.M.J.M. Bijen, R. de Borst and A.L.A. Fraaij, 2005, "Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles and carbonation", Materials and Structures 38, 145-154.

Mohamed BOULFIZA, Koji SAKAI, Nemkumar BANTHIA, Hidenori YOSHIDA, 2001, "Analytical study on synergistic effects of carbonation and chloride ion attack on concrete" , Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 23, No.2, PP. 439-444.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Delnavaz<sup>1,\*</sup>, A.A. Ramezaniapour ,Determination of Chloride Diffusion in Carbonated Concrete Containing Silica Fume ,*Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)367-376.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13497.5436

