



مدلسازی فرآیند کربناتاسیون بتن معمولی و میکروسیلیسی برای شرایط محیطی بندرعباس

دکتر علی اکبر رمضانپور - استاد دانشکده مهندسی عمران

امیر طریقت - دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

امروزه بحث در مورد عمر مفید سازه‌های بتن مسلح از اهمیت زیادی برخوردار شده است. به دلیل علاقه رو به رشد در این زمینه، آئین‌نامه‌های طراحی دوام براساس مدلسازی فرآیندهای خرابی بتن در حال تدوین و تکمیل می‌باشند. کربناتاسیون یکی از دلایل عمده برای خوردگی فولادهای تقویتی مدفون در بتن است. این نوع خرابی در جنوب ایران و بخصوص حاشیه‌های خلیج فارس رایج می‌باشد. به منظور اعمال ضوابط فنی و رعایت اصول طراحی دوام سازه‌های بتنی، نیاز مبرمی به یک مدل ساده و کارآ احساس می‌شود. در این مقاله سعی شده است که چنین مدلی ارائه گردد. مدل مذکور براساس اصول تئوری انتشار و قوانین اول و دوم فیک پایه‌گذاری شده و با نتایج روشهای آزمایشی واقعی و تسریع شده، کالیبره می‌گردد.

در اکثر مدل‌های موجود، یکی از روشهای تئوری و یا صرفاً آزمایشگاهی مد نظر بوده است. این فرض اولیه، دو مشکل عمده را بوجود می‌آورد: عدم حصول نتایج مطابق با واقعیت و یا عدم درک صحیح و تبیین روابط موجود بین پارامترها براساس یکی از تئوریهای شناخته شده و موجود. ترکیب دو فرض فوق، قابلیت اعتماد بیشتری را فراهم می‌سازد. برای انجام آزمایشهای کربناتاسیون تسریع شده، دستگاه خاصی ساخته شده است که با افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن در آن، مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری عمق کربناته شده بتن کاهش می‌یابد. در مورد آزمایشهای دراز مدت هم از نمونه‌های ارسال شده به بندرعباس، استفاده گردیده است.

مدل بدست آمده براساس قانون جذر زمان به تعیین عمق کربناتاسیون بتنی می‌پردازد که در آن نسبتهای آب به مواد سیمانی و میکروسیلیس به مواد سیمانی در یک رطوبت نسبی، مشخص باشند. بدلیل سادگی و نوع پارامترهای موجود در مدل، استفاده از آن برای طراحی دوام توصیه می‌گردد.

مقدمه

امروزه به دلایل مختلف فنی و اقتصادی، شناسایی و آگاهی از عمر مفید سازه‌های بتنی، حائز اهمیت فراوانی است. از این رو نیاز به ایجاد شاخه‌ای نوین در مهندسی سازه تحت عنوان طراحی دوام احساس می‌شود. یکی از ارکان اصلی تحلیل عمر مفید و طراحی دوام، درک صحیح از مکانیزم خرابی و مدلسازی آن است [1] و [2]. با توجه به نیاز روزافزون مهندسین و طراحان، آئین‌نامه‌های جدیدی برای بررسی عمر مفید و طراحی، تدوین شده و یا در مرحله تکمیل شدن می‌باشند. در این آئین‌نامه‌ها چهارچوب روشهای صحیح بررسی، شناخت و مدلسازی فرآیندهای

خرابی بتن ارائه شده‌اند. یکی از معتبرترین آئین‌نامه‌ها، RILEM است که در این مقاله از روش این آئین‌نامه استفاده می‌شود [3].

لازم به ذکر است که اساساً دو حوزه کاربرد برای پیش‌بینی عمر مفید وجود دارد:

- (۱) طراحی کمی دوام سازه‌های جدید
- (۲) پیش‌بینی عمر مفید باقی مانده سازه‌های موجود به منظور طرح‌ریزی صحیح نگهداری، تعمیرات و بهسازی آنها [4] و [5].

همانگونه که مشاهده می‌شود، یکی از مهمترین بخشهای روند پیش‌بینی عمر مفید، مدلسازی خرابی است. بعضی از مدل‌های موجود، براساس روشهای آزمایشگاهی و یا تئوری ارائه شده‌اند [6]. از این رو حوزه کاربرد آنها محدود خواهد بود. از تجربه موجود در این شاخه تحقیقاتی دریافت می‌شود که بهترین مدل‌ها، آنهایی هستند که مبنای تئوری داشته و براساس نتایج آزمایشگاهی، کالیبره شده باشند.

یکی از خرابیهای عمده سازه‌های بتن مسلح، خوردگی فولاد در بتن است. خوردگی به دو علت آغاز می‌شود: کربناتاسیون و یا نفوذ یون کلراید در داخل بتن. در این مقاله فرآیند کربناتاسیون بتن و مدلسازی آن مدنظر قرار می‌گیرد. با مدلسازی کربناتاسیون بتن و استفاده از آن برای مناطق مستعدی مانند ناحیه بندرعباس، می‌توان سازه‌هایی پایاتر را طراحی و اجرا نمود.

فولادهای تقویتی مدفون در سازه‌های بتن مسلح، توسط لایه نازکی از اکسید که بر روی آنها تشکیل می‌شود و علت اصلی آن قلیایی بودن بتن است، در برابر خوردگی محافظت می‌شوند. آغاز خوردگی زمانی است که این لایه محافظ از بین رفته و pH بتن به مقداری کمتر از ۹ برسد.

محافظت از فولادهای تقویتی در برابر کربناتاسیون منجر به خوردگی را می‌توان با انتخاب پوشش بتنی روی میلگردها و طرح اختلاط صحیح بوجود آورد. با این عمل، عمق جبهه کربناتاسیون بتن در طول عمر مفید و قابل انتظار برای سازه بتن مسلح، به سطح میلگردهای فولادی نخواهد رسید. این مهم، ارائه مدل مذکور را توجیه می‌کند.

یکی دیگر از دلایل ارائه مدلی جدید برای کربناتاسیون بتن، توصیه‌های مختلف برای استفاده از میکروسیلیس در ساخت بتن‌های توانمند و بادوام می‌باشد. از آنجائیکه مدل‌های موجود در این راستا قابل استفاده نیستند، سعی گردیده است که اثر این پوزولان مهم نیز در مدل منظور شود.

فرآیندهای فیزیکی - شیمیایی کربناتاسیون بتن

فرآیندهای فیزیکی - شیمیایی کربناتاسیون بتن عبارتند از:

- (۱) واکنشهای شیمیایی تولید کننده مواد قابل کربناته شدن.
- (۲) نفوذ گاز CO_2 جو در فاز گازی منافذ داخلی بتن.
- (۳) حل شدن Ca(OH)_2 جامد در آب منفذی و انتشار Ca(OH)_2 محلول در فاز آبی منافذ بتن.
- (۴) حل شدن گاز CO_2 در آب منفذی و واکنش آن با Ca(OH)_2 محلول.
- (۵) واکنش CO_2 با دیگر جامدات قابل کربناته شدن خمیر سیمان سخت شده.
- (۶) کاهش حجم منافذ به علت اشغال بخشی از آنها توسط محصولات هیدراتاسیون و کربناتاسیون بتن.
- (۷) تراکم بخار آب بر روی دیواره منافذ بتن. بخار آب با دمای محیط و رطوبت نسبی آن در تعادل می‌باشد.

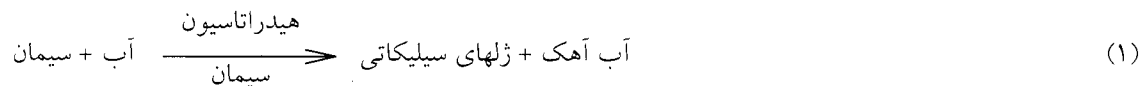
همانگونه که مشاهده می‌شود فرآیند کربناتاسیون بتن، شامل فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی است و اثر توأم آنها مدلسازی دقیق را غیرممکن خواهد ساخت. بعضی از محققین با استفاده از روشهای پیچیده ریاضی سعی در مدلسازی تک تک موارد مذکور داشته و به مدل‌های پیچیده و غیرکاربردی رسیده‌اند [7]. یکی از اصول اساسی در ارائه یک مدل، سادگی درک و کاربرد آسان آن در طراحی‌های روزمره می‌باشد. در ادامه، برای رسیدن به مدلی با خصوصیات فوق ناگزیر از به کارگیری فرضیات ساده کننده هستیم.

مبنای تئوری مدل مورد نظر - تئوری انتشار و قوانین فیک (Fick's Laws)

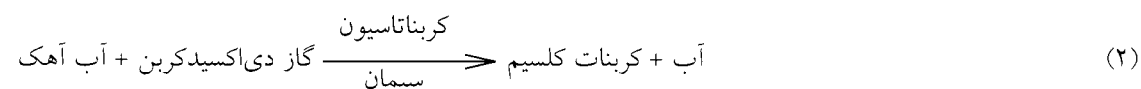
باتوجه به مراحل مختلف کربناتاسیون بتن و به کارگیری تئوری انتشار مواد (قوانین فیک)، امکان بکارگیری معادلات دیفرانسیل مختلفی وجود دارد. دستگاه معادلات دیفرانسیل، براساس معادلات شیمیایی مختلف و تغییرات فیزیکی در ساختار داخلی بتن تشکیل شده و شرایط اولیه و مرزی بر روی آن اعمال می‌گردد. مشاهده می‌شود که چنین روشی دور از خواست آئین‌نامه‌های طراحی دوام بوده و باید با ساده‌سازی مدل، قالب کلی آن را حفظ کرده و در نهایت به کالیبره کردن آن پرداخت، زیرا ساده‌سازی باعث در نظر نگرفتن بعضی از موارد شده و بدون کالیبراسیون واقعی و آزمایشی نمی‌توان به مدل مناسبی دست یافت.

روش مورد نظر چنین است که به جای استفاده از کلیه معادلات شیمیایی حاکم بر فرآیند، معادله شیمیایی عمده - معادله (۱) - در نظر گرفته می‌شود. صحت چنین رابطه‌ای در مراجع مختلف و با انجام آزمایشهای شیمیایی به اثبات رسیده است [6]، [8] و [9].

رابطه‌های کلی مورد استفاده عبارتند از:



در رابطه فوق حدود ۲۵ درصد محصولات ایجاد شده، آب آهک یا Ca(OH)_2 می‌باشد. در واقع این ماده است که با CO_2 ترکیب می‌گردد. در مورد واکنش کربناتاسیون، رابطه ذیل صادق است:



همانگونه که مشاهده می‌شود، نتیجه ترکیب گاز دی‌اکسیدکربن و آب آهک، کربنات کلسیم است که pH کمتری نسبت به محصولات اولیه خواهد داشت. نتیجه کلی این واکنش، کاهش قلاییت بتن و حذف لایه محافظ روی آرماتورها می‌باشد. براساس فرضیات ساده شده فوق، معادله دیفرانسیل کلی ذیل را می‌توان برای تحلیل دینامیکی وابسته به زمان در تئوری انتشار، مورد استفاده قرار داد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3)$$

پارامترهای موجود در رابطه (۳) عبارتند از:

C = غلظت مولار مواد مصرفی یا مواد تولید شده (Ca(OH)_2 و یا CaCO_3).

$$t = \text{زمان}$$

$$x = \text{عمق کربناتاسیون بتن}$$

$$D = \text{ضریب انتشار}$$

با استفاده از شرایط اولیه و مرزی می‌توان به رابطه کلی ذیل دست یافت:

$$x = A\sqrt{t} \quad (4)$$

در رابطه فوق A ضریب کربناتاسیون بتن می‌باشد. صورت کلی رابطه (4) که بر فرآیند کربناتاسیون بتن حاکم است، صرفاً تئوری بوده و قانون جذر زمان خوانده می‌شود. از این رابطه کلی برای مدلسازی استفاده خواهد شد. گام بعدی تعیین ضریب کربناتاسیون بتن یعنی A می‌باشد. تمامی پارامترهای در نظر گرفته شده و نادیده را باید با آزمایشهای هدفدار به شکل مناسبی در A ملحوظ نمود تا ساده‌سازی انجام شده، کارایی مدل و دقت آنرا کاهش ندهد.

صورت کلی مدل مورد نظر

با بررسی مدل‌های مختلف موجود مشخص گردید که در بیشتر آنها از پارامترهای فیزیکی - شیمیایی استفاده شده و برای تعیین آنها نیاز به انجام آزمایشهای خاصی می‌باشد و اصولاً توجه کمتری به پارامترهای مهندسی مانند نسبت آب به سیمان و درصد پوزولانها و ... شده است. از آنجائیکه فرآیند کربناتاسیون بتن، فرآیندی فیزیکی - شیمیایی بوده و شرایط محیطی در آن اثر مستقیم دارد، مدل ذیل به صورت کلی انتخاب می‌گردد:

$$x = K \cdot f\left(\frac{W}{C + CSF}, \frac{CSF}{C + CSF}, RH\%\right) \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

پارامترهای بکار رفته عبارتند از:

$$K = \text{ضریب کالیبراسیون}$$

$$\frac{W}{C + CSF} = \text{نسبت آب به مواد سیمانی (شامل سیمان و میکروسیلیس)}$$

$$\frac{CSF}{C + CSF} = \text{نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی (شامل سیمان و میکروسیلیس)}$$

$$RH\% = \text{درصد رطوبت نسبی محیط}$$

در رابطه فوق ضریب کربناتاسیون بتن (A)، تابعی از نسبت آب به مواد سیمانی، نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی و رطوبت نسبی محیط است که با ضریب کالیبراسیون برای تطابق آزمایشهای دراز مدت و تسریع شده اصلاح می‌گردد.

برنامه آزمایشهای تسریع شده و درازمدت

برنامه خاصی برای انجام آزمایشهای مورد نظر تهیه گردیده است. با توجه به کندی روند فرآیند کربناتاسیون بتن، استفاده از آزمایشهای تسریع شده ضرورت تام دارد. از سوی دیگر برای دستیابی به قابلیت اعتماد بیشتر نسبت به نتایج بدست

آمده، به موازات آزمایشهای تسریع شده، آزمایشهای درازمدتی هم تدارک دیده شدند، تا در شرایط واقعی بندرعباس به مورد اجرا گذاشته شوند. از نتایج این آزمایشها برای کالیبراسیون مدل استفاده می‌گردد.

مصالح و انواع مخلوطهای بتن

در ساخت مخلوطهای بتنی از سیمان تیپ یک، میکروسیلیس ایران، فوق روان کننده و سنگدانه‌های با دانه‌بندی ثابت استفاده گردید. با کاربرد مصالح فوق، ۹ طرح اختلاط مختلف با مشخصات ذیل ساخته و مورد استفاده قرار گرفتند:

$$\frac{W}{C + CSF} = ۰/۳۵, ۰/۴۲, ۰/۵۰$$

نسبت آب به مواد سیمانی

$$\frac{CSF}{C + CSF} = ۰/۰۰, ۰/۰۷, ۰/۱۰$$

نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی

در طرح اختلاط، اسلامپ مخلوطها برابر 10 ± 1 سانتیمتر ثابت نگهداشته شدند، تا پارامترهای تراکم و روانی از بررسی حذف گردند. حفظ اسلامپ ثابت با استفاده از فوق روان کننده صورت گرفته است.

شرایط محیطی بندرعباس

با بررسی آمار موجود چندساله برای شهر بندرعباس، شرایط محیطی عبارتند از:

27°C = دمای متوسط سالیانه ، 66% = درصد رطوبت نسبی متوسط سالیانه

آزمایشهای تسریع شده کربناتاسیون بتن

به منظور انجام آزمایشهای تسریع شده کربناتاسیون، دو محفظه برای قرار دادن ۱۰۸ نمونه استوانه‌ای کوچک به طول تقریبی ۲۰ سانتیمتر و قطر ۵ سانتیمتر ساخته شدند که در یک مدار بسته قرار می‌گیرند. در مدار بسته مذکور، جریانی از مخلوط ۵۰٪ هوا و ۵۰٪ گاز دی‌اکسیدکربن برقرار می‌گردد. نسبتهای فوق، حجمی می‌باشند. با توجه به اینکه در واکنشهای کربناتاسیون بتن آب تولید می‌شود (معادله ۲)، رطوبت نسبی تغییر خواهد نمود. به همین دلیل در مدار بسته مذکور از خشک‌کنهای شیمیایی (ژل سیلیکاتی جاذب رطوبت) به منظور دستیابی به رطوبتهای نسبی ۴۰٪، ۶۰٪، ۷۰٪ و ۹۰٪ استفاده می‌گردد. دما که عموماً با افزایش همراه است، بواسطه قرار دادن محفظه‌های فوق در داخل مخازن آب، کنترل شده و با چرخش آب با دمای کمتر و تنظیمات ارتفاع آن، در حدود 27°C ثابت نگهداشته می‌شود. بوسیله دستگاه دیجیتالی حساس، دما و رطوبت نسبی داخل محفظه‌ها اندازه گیری و کنترل می‌گردند.

نمونه‌های استوانه‌ای بتن در دو انتها با محیط در تماس بوده ولی در سطح جانبی آنها از پوشش محافظ در برابر نفوذ گاز استفاده می‌شود. لذا نفوذ گاز، یک بعدی خواهد بود.

در سنین یک، سه، هفت، ده، پانزده و بیست و یک روز، نمونه‌ها از محفظه خارج شده، و عمق کربناتاسیون آنها تعیین می‌گردد.

آزمایشهای درازمدت کربناتاسیون بتن

نمونه‌های بتنی ارسالی به بندرعباس در محیط باز و محافظت شده در برابر باران قرار داده شدند و در سنین بخصوص مورد آزمایش قرار گرفته و عمق کربناتاسیون آنها تعیین می‌شود.

تعیین عمق کربناتاسیون بتن

در هر دو آزمایش تسریع شده و درازمدت، ابتدا نمونه‌ها در راستای طولی در دستگاه اعمال نیرو خوابانده شده و همانند آزمایش برزیلی به دو نیم تقسیم می‌شوند. سپس محلولی از فنل فتالین و الکل اتیلیک روی سطح شکست پاشیده شده و حد فاصل بین رنگ ارغوانی (بتن کربناته نشده) و عدم تغییر رنگ (بتن کربناته شده) نسبت به سطح خارجی نمونه، به عنوان عمق کربناتاسیون بتن گزارش می‌شود. عمل قرائت و ثبت عمق یک ساعت پس از پاشیدن محلول و ۲۴ ساعت بعد از آن صورت می‌گیرد.

بکارگیری نتایج بدست آمده در مدلسازی کربناتاسیون بتن

از آزمایشهای تسریع شده بر روی ۴۳۲ نمونه، ۳۴۵۶ نتیجه بدست آمده است. از آزمایشهای درازمدت هم تا لحظه تهیه مقاله، ۲۱۶ نتیجه حاصل شده که برای کالیبره کردن مدل استفاده می‌گردد. برای دستیابی به بهترین مدل، ۴۵ مدل مختلف برای آزمایشهای تسریع شده با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف و اندر کنش آنها مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور ارائه بهترین مدل، از روش کمترین مربعات به همراه تحلیل همبستگی و تحلیل واریانس استفاده شده است. همین روشها نیز برای نتایج آزمایشهای درازمدت، بکار گرفته شدند. در نهایت نتایج آزمایشهای تسریع شده با نتایج آزمایشهای درازمدت تطبیق داده می‌شوند. نتیجه این عمل ایجاد مدل نهایی و کاربردی است که در آن ضریب کالیبراسیون هم ملحوظ شده است. مدل نهایی بدست آمده عبارت است از:

$$x = K \left[\frac{W}{C + CSF} (-3.57 + 0.36RH\% - 0.00326RH\%^2) + 1.38 \frac{CSF}{C + CSF} \right] \sqrt{t} \quad (6)$$

در مدل فوق پارامترهای به کار رفته به قرار ذیل می‌باشند:

x = عمق کربناتاسیون بتن برحسب میلیمتر

K = ضریب کالیبراسیون برابر ۲/۴۴

$\frac{W}{C + CSF}$ = نسبت آب به مواد سیمانی (شامل سیمان و میکروسیلیس)

$RH\%$ = درصد رطوبت نسبی محیط

$\frac{CSF}{C + CSF}$ = نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی (شامل سیمان و میکروسیلیس)

t = زمان برحسب سال

محدودیتهای مدل عبارتند از:

$$0.35 \leq \frac{W}{C + CSF} \leq 0.5 \quad \text{و} \quad 0 \leq \frac{CSF}{C + CSF} \leq 0.10 \quad \text{و} \quad 40\% \leq RH\% \leq 90\%$$

بحث

از مدل بدست آمده می‌توان برای پیش‌بینی عمق کربناتاسیون بتن پس از گذشت زمان t استفاده نمود. نتیجه مهم مدل فوق، شناخت ضریب کربناتاسیون بتن است که تابعی از پارامترهای ساختاری مانند نسبت آب به مواد سیمانی، نسبت

میکروسیلیس به مواد سیمانی و درصد رطوبت نسبی محیط می‌باشد. مدل را می‌توان برای بررسی دوام و طراحی ضخامت پوشش بتنی روی آرماتورها بکار برد.

مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت آب به سیمان، ضریب کربناتاسیون بتن به صورت خطی افزایش می‌یابد. چنین نتیجه‌ای در مدل‌های قبلی که صرفاً پارامتر مذکور را در نظر گرفته‌اند نیز مشاهده می‌شود.

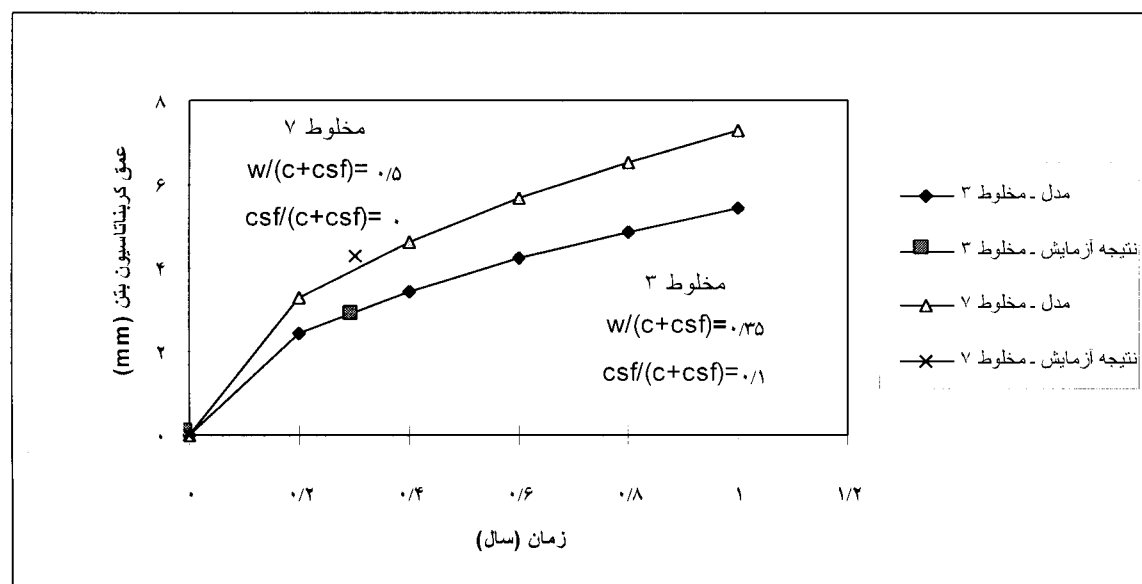
در مورد درصد رطوبت نسبی، مدل‌های موجود توانایی نمایش کاهش عمق کربناتاسیون بتن در رطوبتهای نسبی کم و زیاد را ندارند، ولی در این مدل تابع سهمی بدست آمده برای درصد رطوبت نسبی محیط، حاکی از این واقعیت مهم بوده و در حدود رطوبت نسبی ۵۵ درصد، حداکثر عمق کربناتاسیون بوجود خواهد آمد. این نتیجه نیز در مراجع گوناگون ذکر شده در متن مقاله وجود دارد. در اکثر مدل‌های موجود صرفاً یک رابطه خطی ارائه شده است که با افزایش درصد رطوبت نسبی، عمق کربناتاسیون کاهش می‌یابد ولی در رطوبتهای نسبی کم قابل کاربرد نیستند.

پارامتر سوم یعنی نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی، باعث افزایش جزئی ضریب کربناتاسیون بتن شده و رابطه‌ای خطی را نمایش می‌دهد. باتوجه به نتایج تحقیقات موجود، این نتیجه نیز قابل تأمل است، زیرا میکروسیلیس عملاً تغییر عمده‌ای را در عمق کربناتاسیون نداشته و یا باعث اندک افزایش آن می‌شود [10]، [11] و [12].

با استفاده از موارد فوق، صحت مدل به لحاظ اصول اساسی، تأیید شده و به علت سادگی و کاربرد آسانتر آن از یک سو و در نظر گرفتن میکروسیلیس به عنوان پوزولانی مؤثر در ساخت بتن‌های توانمند از سوی دیگر، دارای ویژگی خاصی است. همچنین قابلیت اعمال رطوبتهای نسبی کم و زیاد مزیت دیگری است که در مدل‌های قبلی وجود ندارد. لذا مدل ارائه شده از این لحاظ منحصر بفرد می‌باشد و برای استفاده در آئین‌نامه‌های طراحی دوام مناسب خواهد بود.

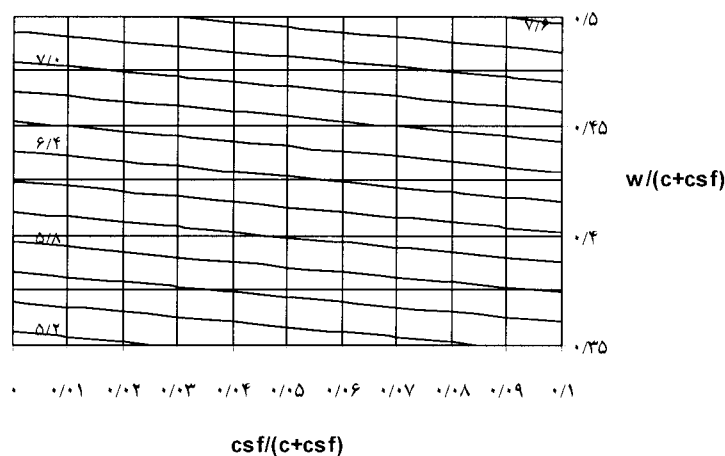
مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشهای درازمدت کربناتاسیون بتن در شکل (۱) نمایش داده شده است. شکل (۲) اثر

پارامترهای $\frac{CSF}{C + CSF}$ و $\frac{W}{C + CSF}$ را در رطوبت نسبی ثابت بر روی ضریب کربناتاسیون بتن نشان داده و اثر رطوبت نسبی متغیر برای پارامترهای ساختاری ثابت در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

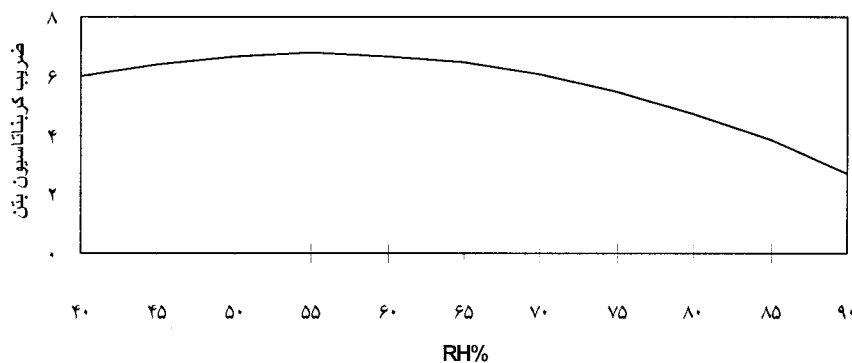


شکل (۱): مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشهای درازمدت برای دو مخلوط نمونه در شرایط محیطی بندر عباس

(رطوبت نسبی ۶۶٪)



شکل (۲): اثر پارامترهای ساختاری بر ضریب کربناتاسیون بتن در رطوبت نسبی ثابت



شکل (۳): اثر رطوبت نسبی متغیر بر ضریب کربناتاسیون یک مخلوط بتنی مشخص

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

نتایج و پیشنهادهاى عمده‌ای که از این تحقیق می‌توان بدست آورد عبارتند از:

- (۱) طراحی دوام و پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح مقوله‌ای نوین بوده و در این راستا شناخت مکانیزم و مدلسازی فرآیندهای خرابی از اهمیت زیادی برخوردار هستند.
- (۲) مدل ارائه شده با توجه به پارامترهای آن، مدلی کاربردی و ساده بوده و طراحان برخلاف اکثر مدل‌های موجود براحتی می‌توانند از آن استفاده نمایند.
- (۳) با توجه به پارامترهای ساختاری بتن شامل نسبت آب به مواد سیمانی، نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی و همچنین شرایط محیطی دمای متوسط سالیانه ۲۷ درجه سانتیگراد (ناحیه بندرعباس) و رطوبت نسبی محیط متغیر، امکان بررسی و طراحی مناسب تر بتن از لحاظ دوام و پایایی در برابر کربناتاسیون وجود خواهد داشت.

- ۴) امکان بررسی بتن‌های توانمند ساخته شده از میکروسیلیس نیز در مدل ارائه شده فراهم است.
- ۵) بهترین روش کاهش عمق کربناتاسیون و یا به عبارت دیگر دستیابی به بتنی پایا و بادوام، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی می‌باشد.
- ۶) میکروسیلیس نه تنها عمق کربناتاسیون بتن را کاهش نمی‌دهد، بلکه باعث افزایش جزئی آن نیز می‌شود.
- ۷) با توجه به درصد رطوبت نسبی متوسط سالیانه ناحیه بندرعباس به میزان ۶۶ درصد و نزدیکی آن با مقدار ۵۵ درصد که باعث بیشترین عمق کربناتاسیون می‌شود، مشخص می‌گردد که اقلیم این منطقه، شرایط مساعدی را برای خوردگی میلگردهای فولادی داخل بتن فراهم می‌سازد.

مراجع

1. Masters L. W., "Problems in service life prediction of building and construction materials", Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands, 1985.
2. Sarja A. and Vesikari E., "Durability design of concrete structures", Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN SPON, Great Britain, 1996.
3. Masters L. W., "Prediction of service life of building and construction materials", Proceeding of the First International RILEM Congress, Durability of Construction Materials, Versailles, France, Chapman and Hall, 1987.
4. Buenfeld N. R., "Measuring and modeling transport phenomena in concrete for life prediction of structures", Prediction of Concrete Durability, Proceeding of stats 21st Anniversary Conference, E&FN SPON, Great Britain, 1997.
5. Rostam S. and Geiker M., "Prediction of residual service life conversion from theory to practical engineering", 4th International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Persian Gulf, Pub. No. 1012, Bahrain, 1993.
6. Richardson M. G., "Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management", CITIS Ltd., Ireland, 1988.
7. Papadakis V. G., Vayenas C. G. and Fardis M. N., "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation", ACI Material Journal, V. 88, No. 4, pp. 363-373, July-August 1991.
8. Fukushima T., "Theoretical investigation on the influence of various factors on carbonation of concrete", Building Research Institute, July 1988.
9. Zhang R. H., Nakazawa T. and Imai F., "Estimation of depth of concrete carbonation", Durability of Concrete, Proceedings Fourth CANMET/ACI International Conference SP-170, Vol. I, Australia, 1997.
10. Gjörv O. E., "Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete", ACI Material Journal, V. 92, No. 6, pp. 591-598, Nov.-Dec. 1995.
11. Artigues J. C., Curado J. and Iglesias E., "Impermeability and resistance to carbonation of concrete with micro-silica and water-reducing agents", Admixtures for Concrete, Improvement of Properties, Proceedings of the International RILEM Symposium, Barcelona, May 14-17, 1990.
12. Skjolsvold, "Carbonation depths of concrete with and without condensed silica fume", Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceeding of Second International Conference, Volume 2, ACI SP-91, Madrid, Spain, 1986.