

## اثر تغییرات غلظت کربن دی اکسید بر روی زمان شروع خوردگی سازه‌های بتن آرمه

محمد قانونی بقا<sup>۱\*</sup>، محسنعلی شایانفر<sup>۲</sup>، محمد رضا یکه‌فلاح<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ دی ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲ فروردین ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۲ تیر ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۵ تیر ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

خوردگی آرماتورها  
کربناسیون  
تغییرات آب و هوایی  
روش مونت کارلو  
دما

**چکیده:** نفوذ کربن دی اکسید تا سطح آرماتور در سازه‌های بتن آرمه، منجر به خوردگی آرماتورها می‌شود. میزان غلظت کربن دی اکسید در محیط بر روی زمان شروع خوردگی اثرگذار است. بر اساس ادبیات فنی، میزان غلظت کربن دی اکسید موجود در جو می‌تواند بر اثر تغییرات آب‌وهوایی از ۳۷۹ ppm در سال ۲۰۰۵ با نرخ‌های رشد متفاوتی به ۱۰۰۰ ppm در سال ۲۱۰۰ افزایش یابد. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از روش مونت کارلو احتمال شروع خوردگی آرماتورهای سازه‌های بتنی در طی زمان محاسبه شود و همچنین اثر در نظر گرفتن تغییرات غلظت کربن دی اکسید در جو و میانگین دمای زمین، بر روی زمان شروع خوردگی، مورد توجه قرار گیرد و با حالتی که تغییرات عوامل مذکور برای محاسبه زمان شروع خوردگی در نظر گرفته نمی‌شود، مقایسه شود. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، احتمال شروع خوردگی با در نظر گرفتن هر یک از دو سناریوی معتبر برای افزایش غلظت کربن دی اکسید، تفاوت چندانی نمی‌کند. اما مقایسه نتایج حالت‌هایی که غلظت کربن دی اکسید متغیر می‌باشد با حالتی که غلظت کربن دی اکسید ثابت در نظر گرفته شود نشان داد که احتمال شروع خوردگی در یک زمان مشخص برای هر یک از حالات غلظت ثابت و متغیر کربن دی اکسید می‌تواند تفاوت قابل توجهی داشته باشد. همچنین مشاهده شد که تغییرات میانگین دما اثر قابل توجهی بر روی زمان شروع خوردگی ندارد.

### ۱- مقدمه

نفوذ کربن دی اکسید و کربناسیون در سازه‌های بتنی منجر به خوردگی آرماتورها و در نتیجه کاهش عمر سازه‌های بتنی می‌گردد [۱]. شایانفر و همکاران برای محاسبه احتمال خوردگی میلگردها در شرایط نفوذ کلرید و کربنات‌شدن در اعضای سازه‌های بتن آرمه از روش‌های فراکاوشی استفاده کردند [۲ و ۳].

پژوهشی برای کاهش دادن خوردگی در نوع خاصی از بتن صورت گرفت [۴]. همچنین توسط شایانفر و همکاران اثر خوردگی میلگردهای طولی بر کاهش مقاومت فشاری بتن در سازه‌های بتن آرمه بررسی شد [۵].

به طور کلی می‌توان عوامل موثر بر کربناسیون و به عبارت دیگر دوام سازه‌های بتنی را به سه گروه، عوامل خارجی یا شرایط محیطی، عوامل داخلی یا ساختاری بتن و شرایط اجرایی و بهره‌برداری تقسیم‌بندی کرد [۶]. از مهمترین عوامل اثرگذار محیطی می‌توان به غلظت کربن دی اکسید در محیط و نیز دمای محیط اشاره کرد. شواهد تجربی بیانگر این موضوع است که نفوذ کربن دی اکسید به شدت تحت اثر عوامل محیطی مانند غلظت کربن دی اکسید موجود در جو می‌باشد [۷].

بنابر گزارش‌های IPCC تغییرات آب‌وهوایی به عوامل زیادی بستگی دارد و پیش‌بینی آن دشوار می‌باشد [۸]. از طرفی سرعت رشد سالانه غلظت

کربن دی اکسید از ۱/۴ ppm در طول دوره ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۵ به ۱/۹ ppm در طول دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ افزایش یافته [۹] و مطالعات تخمین می‌زند که میزان غلظت کربن دی اکسید موجود در جو می‌تواند از ۳۷۹ ppm در سال ۲۰۰۵ به ۱۰۰۰ ppm در سال ۲۱۰۰ افزایش یابد [۹]. علاوه بر تغییرات غلظت کربن دی اکسید، تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی می‌تواند منجر به شروع و گسترش خوردگی شود و در نهایت خرابی و کاهش قابلیت اطمینان سازه را در پی داشته باشد [۱۰]. خوردگی آرماتورها یکی از مهمترین دلایل کاهش ظرفیت و خرابی سازه‌های بتنی است. بر اثر خوردگی آرماتورها سطح مقطع موثر کاهش می‌یابد؛ علاوه بر این افزایش حجم ناخالصی‌های ایجادشده در طی فرایند خوردگی، ترک‌هایی را در سازه بتنی ایجاد می‌کند [۱۱]. از زمان شروع خوردگی این کاهش سطح مقطع موثر و ایجاد ترک در سازه شروع شده و تا زمان خرابی کامل سازه ادامه دارد. بنابراین برای محاسبه عمر سازه پیش‌بینی زمان شروع خوردگی ضروری است.

مطالعاتی برای محاسبه خطر نفوذ کربن دی اکسید و برآورد اولیه آن و نیز اثر هر یک از اقدامات پیشنهادی برای مقابله با نفوذ کربن دی اکسید در سازه‌های بتنی انجام شد. در این مطالعات اثر تغییرات اقلیمی بر روی سازه‌هایی که در یک مکان خاص قرار داشتند مورد بررسی قرار گرفت [۱۳-۱۱]. مدل‌هایی برای نفوذ کربن دی اکسید توسط DuraCrete و همچنین Yoon و همکارانش پیشنهاد شد [۱۲ و ۱۳] در مدلی که پیشنهاد شد غلظت کربن دی اکسید ثابت در نظر گرفته شده بود. Stewart و همکاران روشی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghanoonibagha@iauet.ac.ir

۲ و ۳ به دست می‌آید.

$$D_{CO_2} = D_1 t^{-n_d} \quad (2)$$

در فرمول ۲،  $D_{CO_2}(t)$  ضریب انتشار وابسته به زمان کربن‌دی‌اکسید در بتن است [۱۱].  $n_d$  یک ثابت بدون واحد می‌باشد و  $D_1$  ضریب نفوذ کربن‌دی‌اکسید بعد از یک سال از ساخت عضو بتنی است و هر دو متغیر  $n_d$  و  $D_1$  با توجه به نسبت آب به سیمان به دست می‌آیند و مقادیر آن‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۶۵ درصد در جدول ۱ ارائه شد [۱۰] همانطور که مشاهده می‌شود در طی زمان نفوذپذیری عضو بتنی کاهش می‌یابد.

$$a = 0.75 C_e CaO \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (3)$$

در فرمول ۳ و ۴،  $C_e$  میزان سیمان استفاده شده برای ساختن عضو بتنی (واحد آن کیلوگرم در متر مکعب) می‌باشد و  $w/c$  نسبت آب به سیمان است [۱۰]. مقدار  $CaO$  برابر ۰/۶۵ می‌باشد [۱۱]  $\alpha_H$  همان درجه هیدراتاسیون است و برای محاسبه آن از فرمول ۴ استفاده می‌شود [۱۲]. مقدار  $M_{CaO}$  و  $M_{CO_2}$  به ترتیب برابر با ۵۶ و ۴۴ gr/mol است [۱۳].

$$\alpha_H = 1 - e^{-3.38 \frac{w}{c}} \quad (4)$$

برای پیش‌بینی عمق کربناسیون زمانی که غلظت کربن‌دی‌اکسید افزایش می‌یابد، نمی‌توان از فرمول ۱ استفاده کرد. چرا که در این فرمول برای محاسبه عمق کربناسیون غلظت کربن‌دی‌اکسید در محیط ثابت فرض شده است. برای استفاده از فرمول مذکور می‌توان به عنوان یک تخمین محافظه‌کارانه غلظت کربن‌دی‌اکسید را ثابت و برابر با بیشترین مقدار پیش‌بینی شده در طی عمر عضو بتنی در نظر گرفت؛ و یا به عنوان یک تخمین خوشبینانه غلظت کربن‌دی‌اکسید را ثابت و برابر با کمترین مقدار پیش‌بینی شده در طی عمر عضو بتنی در نظر گرفت؛ و یا حتی از میانگین غلظت کربن‌دی‌اکسید استفاده نمود. البته فرمول ۵ نیز توسط Yoon و همکاران [۱۵] برای در نظر گرفتن تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید ارائه شد.

$$X_C(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} C_{CO_2}(t) \cdot t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}} \quad (5)$$

همچنین، توسط Stewart و همکاران [۱۴] فرمول ۶ برای در نظر گرفتن تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید در طی عمر سازه بتنی پیشنهاد شد:

$$X_C(t) = \sqrt{\frac{2f(t)D_{CO_2}(t)}{a} k \int_0^t C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{1}{t}\right)^{n_m}} \quad (6)$$

تمامی پارمترهای فرمول‌های ۵ و ۶ به جز  $f(t)$ ، مشابه فرمول ۱ است؛  $f(t)$  تابعی برای در نظر گرفتن اثر تغییرات دما بر روی کربناسیون می‌باشد

برای در نظر گرفتن اثر تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید پیشنهاد دادند [۱۱]. این روش برای محاسبه تاثیر تغییرات آب و هوایی بر روی احتمال خرابی سازه‌ها بر اثر خوردگی توسط Stewart و همکاران استفاده شد. همچنین گفته شد که استفاده از غلظت ثابت در مدل ارائه‌شده منجر به ایجاد خطا در محاسبات می‌شود [۱۰]. در مقاله مذکور تاثیر تغییرات آب و هوایی بر روی احتمال خرابی سازه‌ها بر اثر خوردگی مورد بررسی قرار گرفته شد. غلظت کربن‌دی‌اکسید یکی از مواردی می‌باشد که بر اثر تغییرات آب و هوایی تغییر می‌کند. Stewart و همکاران برای بررسی خرابی‌ها و خطرات ایجادشده بر روی سازه‌های بتنی بر اثر تغییرات آب و هوایی غلظت کربن دی اکسید را متغیر در نظر گرفتند [۱۱].

اگرچه در پژوهش‌های قبلی صورت گرفته، احتمال شروع خوردگی در سال‌های مختلف با استفاده از روش‌های احتمالاتی محاسبه شده است اما پژوهش‌های مذکور دارای نواقص و کاستی‌هایی نیز هست؛ از جمله اینکه اثر تغییرات دما و نیز برابر نبودن غلظت کربن‌دی‌اکسید در مناطق مختلف با مقدار میانگین جهانی در آن‌ها در نظر گرفته نشده است.

در این پژوهش نتایج به دست آمده با استفاده از هر یک از دو روش ارائه‌شده توسط Yoon و Stewart با یکدیگر مقایسه شده و همچنین اثر افزایش میانگین دمای زمین بر روی زمان شروع خوردگی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت برابر نبودن غلظت کربن‌دی‌اکسید در مناطق مختلف با میانگین جهانی و اثر این موضوع بر محاسبه زمان شروع خوردگی بر اثر کربناسیون، بررسی شد.

## ۲- مدل‌سازی نفوذ کربن‌دی‌اکسید در تیر بتنی

با نفوذ و انتشار کربن‌دی‌اکسید موجود در اتمسفر به داخل بتن و در حضور اکسیژن و رطوبت، قلیائیت بتن (pH) به دلیل تولید اسید کربنیک کاهش یافته و از طریق تخریب لایه محافظ اکسیدی انفعالی دور فولاد، موجب خوردگی آرماتور می‌شود. زمانی که عمق کربناسیون به اندازه عمق کاور بتنی شده باشد به عبارت دیگر کربن‌دی‌اکسید به سطح میلگرد برسد، با تخریب لایه محافظ روی آرماتور خوردگی آغاز می‌شود [۲]. عمق کربناسیون ( $X_c$  به سانتی‌متر) را می‌توان از فرمول ۱ محاسبه کرد [۱۳] که در این فرمول برای اصلاح غلظت کربن‌دی‌اکسید ضریب  $k$  به فرمول اضافه شد [۱۰].

$$X_C(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a} k \cdot C_{CO_2} \cdot t \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_m}} \quad (1)$$

در فرمول فوق  $CCO_2$  غلظت کربن‌دی‌اکسید در محیط (واحد آن  $kg/m^3$  ضرب در  $10^{-3}$ ) می‌باشد [۱۱].  $k$  ضریبی برای در نظر گرفتن اثر غیریکنواخت بودن غلظت کربن‌دی‌اکسید در محیط‌های مختلف است [۱۱]  $t$  سن یا عمر سازه بر حسب زمان و  $t_0$  زمان عمل‌آوری بتن می‌باشد.  $nm$  فاکتور سن بتن می‌باشد که برای در نظر گرفتن تغییرات دمایی محیط در مدل فوق لحاظ شده [۱۰]. مقادیر  $D_{CO_2}(t)$  و  $a$  نیز از به ترتیب از فرمول‌های

به دلیل عدم قطعیت‌های بسیار زیاد در پارامترهای موثر شناخته شده در تخریب لایه انفجالی میلگرد و شروع خوردگی زمان آغاز خوردگی با درصد احتمال و قابلیت اعتماد متناظری محاسبه می‌شود. از دقیق‌ترین روش‌ها، شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) است. برای این منظور برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب (Matlab) انجام شد. فرآیند محاسباتی مربوط به روش MCS بسیار ساده می‌باشد که در مورد طراحی دوام و به طور خاص در اینجا برای کرناسیون به صورت زیر قابل بیان است. مدل ریاضی مربوط به عمق نفوذ کربن دی‌اکسید، مطابق فرمول‌های ۵ و ۶ به عنوان حالت حدی  $g(t)$  انتخاب می‌گردد. اگر عمق کاور برابر با  $C$  فرض شود و با توجه به اینکه  $X_c(t)$  قبلاً عمق کرناسیون در لحظه  $t$  تعریف شد، حالت حدی را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(t) = C - X_c(t) \quad (9)$$

برای هر پارامتر که موثر در رابطه یک نوع توزیع احتمالاتی انتخاب می‌شود. یک مجموعه‌ی نمونه‌برداری از پارامترها با توزیع احتمالاتی مربوطه تولید و شبیه‌سازی‌های لازم بر همین مینا انجام می‌شود. در صورتی که تابع حالت حدی  $g(t)$  نقض گردد، سازه یا عضو سازه‌ای دچار شکست شده است [۲۱]. تعداد دفعاتی که شکست رخ می‌دهد نسبت به تعداد دفعات کل تحلیل‌ها، محاسبه شده و به عنوان احتمال خرابی (در اینجا احتمال وقوع خوردگی) در نظر گرفته می‌شود. این روش قدرتمند، ساده و آسان برای استفاده می‌باشد. تعداد نمونه‌ها در برآورد مقدار میانگین، انحراف معیار و احتمال خرابی یک متغیر تصادفی اهمیت زیادی دارد. در آنالیز مونت کارلو هرچه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، دقت پاسخ به‌دست آمده بیشتر خواهد بود. برای اطمینان از دقت نتایج احتمال خوردگی ناشی از کرناسیون، تعداد حداقل نمونه‌ها برای محاسبه دوام ۱۰۷ شبیه‌سازی در هر سال در نظر گرفته شد.

### ۳- مدل افزایش غلظت کربن دی‌اکسید

همانطور که بیان شد، غلظت کربن دی‌اکسید همواره در حال افزایش است و برای محاسبه احتمال شروع خوردگی در زمان‌های مختلف باید این تغییر غلظت لحاظ گردد. مدل کردن رشد غلظت کربن دی‌اکسید در محیط بسیار دشوار است چرا که میزان رشد غلظت کربن دی‌اکسید به عوامل مختلفی مانند رشد جمعیت، وضعیت اقتصادی جامعه، میزان استفاده از تکنولوژی‌های پاک و... بستگی دارد. با در نظر گرفتن عواملی مانند عوامل ذکر شده IPCC چهار پیش‌بینی مختلف برای رشد غلظت کربن دی‌اکسید تا سال ۲۱۰۰ پیشنهاد می‌دهد. نمودار شکل ۱ ارائه دهنده دو پیش‌بینی است که برای غلظت کربن دی‌اکسید که در سال ۱۹۹۰ پیشنهاد شد [۲۵]. در نمودار مورد اشاره غلظت کربن دی‌اکسید با فرض دو شرایط متفاوت که ممکن است برای زمین پیش‌بینی بیاید پیش‌بینی شده است. در حالت AIF1 رشد اقتصادی بالا، رشد جمعیت در اواسط قرن ۲۱ با سرعت بالایی ادامه دارد و استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز مانند سابق ادامه پیدا می‌کند. در حالت AIB استفاده

که با استفاده از قانون آرنیوس بدست آمد [۱۳ و ۱۴]. افزایش دما منجر به افزایش ضریب نفوذ می‌گردد و بر روی عمق کرناسیون اثر می‌گذارد. مقدار  $f(t)$  در فرمول ۷ ارائه شده است [۱۱].

$$f(t) = e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273+T_{av}(t)} \right)} \quad (7)$$

$$T_{av}(t) = \frac{\sum_{i=1}^t T(t)}{t - 1999} \quad (8)$$

در فرمول‌های ۷ و ۸،  $T(t)$  نمایانگر دما در زمان  $t$  می‌باشد.  $E$  انرژی فعال‌سازی فرایند خوردگی است و برابر  $40 \text{ kJ/mol}$  می‌باشد [۱۴].  $R$  همان ثابت گازها است و مقدار آن برابر با  $8.314 \times 10^{-3}$  می‌باشد [۱۰].

### جدول ۱: $D_1$ و $n_d$ برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان [۶]

Table 1.  $n_d$  and  $D_1$  for different w/c ratios [6]

W/C	$D_1 \times 10^{-4}$ $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$n_d$	$\alpha_H$
۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۲۱۸	۰/۷۸
۰/۵	۱/۲۴	۰/۲۳۲	۰/۸۱
۰/۵۵	۲/۲۲	۰/۲۴	۰/۸۴

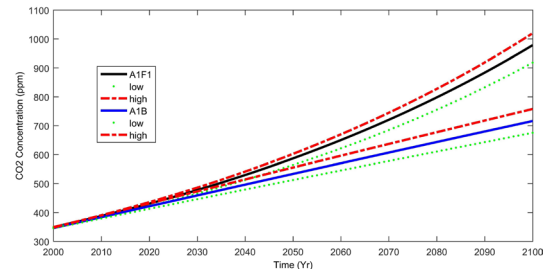
در ادامه در جدول ۲ مقادیر میانگین، ضریب تغییرات و تابع توزیع احتمالاتی برای هر یک از پارامترهای احتمالاتی مورد نیاز در انجام محاسبات ارائه شده است.

### جدول ۲: مقادیر آماری مورد نیاز

Table 2. Probabilistic parameters of variables

$c_t$	mm	۵۰	۰/۲۵	Normal	[۲۰]
$c_q$	J/kg <sup>0</sup> c	۱۰۰۰	۰/۱۰	Beta on [۸۴۰]; [۱۱۷۰]	[۲۰]
$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>	۲۴۰۰	۰/۰۴	Normal	[۲۲]
$f_c$	MPa	۴۰	۰/۱۵	Normal	[۲۳]
$f_y$	MPa	۶۰۰	۰/۱۰	Normal	[۲۴]

از انرژی‌های پاک مرسوم شده است. در واقع حالت AIF1 یک پیش‌بینی بدبینانه و AIB یک پیش‌بینی خوش‌بینانه برای غلظت کربن‌دی‌اکسید در محیط می‌باشد. همچنین در این نمودار کران بالا و پایینی که برای این پیش‌بینی لحاظ شده، ارائه می‌شود. می‌توان از هر یک از دو نمودار ارائه‌شده در شکل ۱ برای محاسبه احتمال شروع خوردگی استفاده کرد.



شکل ۱: پیش‌بینی غلظت کربن‌دی‌اکسید در طی دوره ۱۰۰ ساله

Fig. 1. Estimation of carbon dioxide concentration during the 100-year period

AIB، بسته به شرایط، ممکن است که اتفاق بیفتد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه بسیاری از پارامترهای تاثیرگذار بر روی عمق کربناسیون را نمی‌توان به قطعیت تعیین کرد و همواره خطاهایی در تعیین آن‌ها وجود دارد، استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی نسبت به روش‌های دقیق، برای بررسی دوام سازه‌ها مطلوب‌تر به نظر می‌رسد. در شکل ۱ ابتدا عمق کربناسیون در طی دوره ۱۰۰ ساله با استفاده از هریک از سه فرمول ۱، ۵ و ۶ محاسبه شد. در فرمول‌های ۵ و ۶ که تغییرات کربن‌دی‌اکسید در برای محاسبه عمق کربناسیون در نظر گرفته می‌شود، محاسبه عمق کربناسیون با فرض وقوع هر یک از دو پیش‌بینی صورت گرفته است. در حالی نیز که غلظت کربن‌دی‌اکسید ثابت می‌باشد، محاسبه عمق کربناسیون با فرض غلظت‌های ۳۵۰، ۶۵۰ و ۹۵۰ ppm که به ترتیب کمترین، میانگین و بیشترین غلظت در طی دوره ۱۰۰ ساله هستند، صورت گرفته است. بعد از محاسبه عمق کربناسیون با فرض کاور ۲۵ mm برای یک عضو بتنی و با استفاده از روش مونت کارلو و جدول ۲ احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله محاسبه شد. نتایج به دست آمده در شکل ۱ ارائه گردید.

مشاهده می‌شود در روش ارائه‌شده توسط Yoon و همکاران عمق کربناسیون همواره بیش از عمقی است که از روش Stewart و همکاران محاسبه شد. این نتایج با توجه به دو روش بیان شده منطقی است. چرا که در روش Yoon و همکاران جهت محاسبه عمق کربناسیون در طی یک دوره مشخص، غلظت کربن‌دی‌اکسید برابر با آخرین غلظت ثبت‌شده در طی دوره مذکور در نظر گرفته می‌شود. برای مثال جهت محاسبه عمق کربناسیون پنجاه سال بعد از ساخت سازه، غلظت کربن‌دی‌اکسید برابر با غلظت سال پنجاهم در نظر گرفته می‌شود. مشخص است که در نظر گرفتن غلظت کربن‌دی‌اکسید در طول یک دوره معین، برابر با غلظت آخرین سال دوره مذکور، با توجه به روند افزایشی غلظت در طی زمان، نتایجی بیش از مقداری که در عمل برای عمق کربناسیون اتفاق خواهد افتاد، نتیجه خواهد داد.

در روش ارائه‌شده توسط Stewart و همکاران برای محاسبه عمق کربناسیون در یک دوره مشخص، از غلظت کربن‌دی‌اکسید در طی زمان انتگرال گرفته می‌شود. در واقع اثر تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید در طی زمان در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر در روش مذکور غلظت کربن‌دی‌اکسید در هر یک از سال‌های دوره، برای محاسبه عمق کربناسیون در طی دوره اثرگذار است.

با توجه به توضیحات فوق مشخص است که روش ارائه شده توسط Stewart و همکاران در بین روش‌های موجود کاملترین و دقیق‌ترین روش است و نتایج به دست آمده از آن با واقعیت تطابق دارد.

در شکل ۲ احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله با استفاده از روش Stewart و همکاران با فرض وقوع هر یک از دو پیش‌بینی برای افزایش غلظت کربن‌دی‌اکسید محاسبه شده و با نتایجی که با فرض غلظت ثابت و برابر با سه غلظت مختلف (۳۵۰، ۶۵۰ و ۹۵۰ ppm) مقایسه شده است.

#### ۴- نتایج و تفسیر آن‌ها

در این قسمت ابتدا به مقایسه سه روش ارائه شده برای محاسبه عمق کربناسیون پرداخته و احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله با استفاده از هر یک از روش‌های مذکور محاسبه می‌شود. همچنین اثر تغییرات دمای میانگین کره زمین بر روی شروع خوردگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

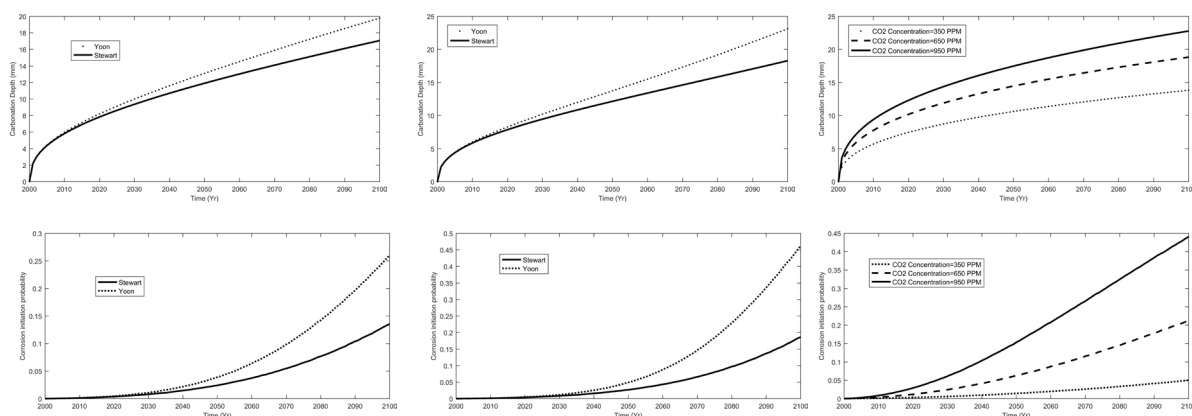
لازم به ذکر است که در انجام محاسبات فرض شده است که عضو بتنی در محیط حفاظت‌نشده قرار دارد ( $n_{\text{m}}=0$ )؛ نسبت آب به سیمان  $0/55$  ( $D_1=2/22$  و  $n_d=0/24$ ) و مقدار سیمان به کار رفته در طرح اختلاط عضو بتنی  $370$  کیلوگرم در متر مکعب است. همچنین تغییرات دما زمین در طی دوره ۱۰۰ ساله صفر و تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید در طی دوره ۱۰۰ ساله در حالت اول مطابق با پیش‌بینی AIB و در حالت دوم مطابق با AIF1 فرض شده است. در نهایت برای بررسی اثر تغییرات دمای میانگین کره زمین بر روی زمان شروع خوردگی مطابق با پیش‌بینی‌های IPCC، با فرض افزایش دمای صفر،  $2/5$  و  $6/5$  درجه سانتی‌گراد محاسبات انجام شده است [۲۵-۲۸].

#### ۴-۱ اثر تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید بر دوام سازه‌های بتنی

سه فرمول ۱، ۵ و ۶ برای محاسبه عمق کربناسیون ارائه شد که در فرمول ۱ غلظت کربن‌دی‌اکسید ثابت فرض شده بود و اثر تغییرات غلظت در طی زمان بر روی عمق کربناسیون در نظر گرفته نمی‌شد، ولی در دو فرمول ۵ و ۶ که به ترتیب توسط Yoon و Stewart ارائه گردید اثر تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید در نظر گرفته شد.

همچنین مشاهده شد که تغییرات غلظت مطابق دو پیش‌بینی AIF1 و

مقایسه نتایج حاصل با فرض سه غلظت ثابت کربن دی اکسید  
 مقایسه نتایج روش ارائه شده توسط Yoon و همکاران با روش Stewart با فرض وقوع پیش بینی A1B  
 مقایسه نتایج روش ارائه شده توسط Yoon و همکاران با روش Stewart با فرض وقوع پیش بینی A1F1



شکل ۲: عمق کربناسیون و احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله در حالت‌های مختلف (محور افقی زمان با واحد سال و محور قائم در شکل‌های ردیف بالا عمق کربناسیون و در شکل‌های ردیف پایین احتمال شروع خوردگی)

Fig. 2. Carbonation depth and the probability of corrosion initiation during the 100 year period in different conditions

محاسبه عمق کربناسیون تا به حال ارائه شده است، روش ارائه شده توسط Stewart و همکاران دقیق‌ترین روش است. همچنین با در نظر گرفتن هر یک از پیش‌بینی‌های صورت گرفته برای تغییرات غلظت کربن دی اکسید، می‌توان به نتایج قابل قبولی رسید و تفاوت زیادی در نتایج ایجاد نمی‌شود.

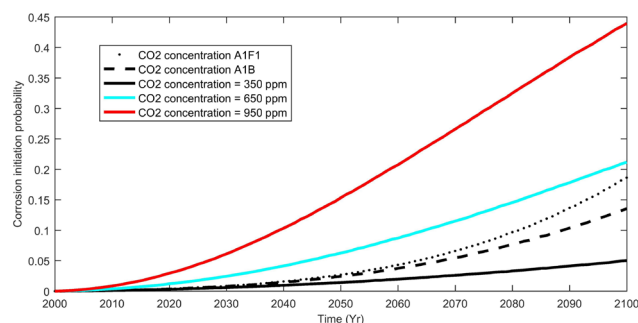
همانطور که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده با فرض رخ دادن هر یک از پیش‌بینی‌های صورت گرفته تفاوت چندانی در نتایج حاصل برای عمق کربناسیون ایجاد نمی‌کند. با توجه به فرمول ۶ در روش Stewart و همکاران برای در نظر گرفتن اثر تغییرات غلظت کربن دی اکسید در طی زمان باید از معادله‌ای غلظت برحسب زمان انتگرال گرفت. معادله‌های انتگرال غلظت کربن دی اکسید در طی زمان برای پیش‌بینی‌های ارائه شده جهت تغییرات غلظت کربن دی اکسید عبارت‌اند از:

برای حالت A1B

$$\int C_{CO_2} \cdot dt = 7583t \ln(t) - 64874t + 14472713 \quad (10)$$

برای حالت A1F1

$$\int C_{CO_2} \cdot dt = 36600 \exp\left(\frac{i-2000}{100}\right) - 16i - 4600 \quad (11)$$



شکل ۳: احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله برای روش‌های مختلف ارائه شده (محور افقی زمان با واحد سال و محور قائم احتمال شروع خوردگی)

Fig. 3. The probability of corrosion during the 100 year period for different methods

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ می‌توان بیان کرد که:

۱. احتمال شروع خوردگی مانند عمق کربناسیون که بالاتر محاسبه شد، برای دو پیش‌بینی در نظر گرفته شده برای تغییرات غلظت کربن دی اکسید تفاوت زیادی ندارد و در سال ۲۱۰۰ که بیشترین

در سال ۲۱۰۰ مقدار انتگرال‌های فوق برای هر یک از حالت‌های A1B و A1F1 به ترتیب برابر  $53313/3$  و  $61289/1$  است که واحد آنها PPM.Yr است. اختلاف این دو مقدار کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. با توجه به این موضوع که بیشترین اختلاف در سال ۲۱۰۰ بین نتایج دو پیش‌بینی خواهد بود و اختلاف ضرایب این دو مقدار در سال ۲۱۰۰ کمتر از ۲۰ درصد است و می‌توان این موضوع که بین نتایج به دست آمده برای دو پیش‌بینی تفاوت زیادی وجود ندارد را توجیه کند. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که در بین روش‌هایی که برای

۴. ثابت در نظر گرفتن غلظت کربن دی‌اکسید برابر  $650 \text{ ppm}$  که میانگین غلظت کربن دی‌اکسید در طی دوره ۱۰۰ ساله است، منجر به این موضوع خواهد شد که حداکثر ۱۰ درصد احتمال شروع خوردگی بیشتر از حالت واقعی یا همان روش ارائه شده توسط Stewart و همکاران گردد.

#### ۴-۲- اثر تغییرات دما بر دوام سازه‌های بتنی

از عوامل محیطی اثرگذار بر دوام سازه‌های بتنی تغییرات دمای محیط است. همانطور که در فرمول‌های ۶، ۷ و ۸ مشاهده شد، میانگین دما در طی دوره مورد نظر بر روی عمق کربناسیون اثرگذار است. برای مثال جهت محاسبه عمق کربناسیون در  $2050$  میانگین دمای محیط از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۵۰ اثرگذار خواهد بود. همچنین بیان شد که افزایش دمای زمین تا سال ۲۱۰۰ می‌تواند برابر با صفر،  $2/5$  و یا  $6/5$  درجه سانتی‌گراد باشد. با فرض افزایش خطی میانگین دمای زمین تا سال ۲۱۰۰ می‌توان عمق کربناسیون و همچنین احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله را محاسبه کرد. در شکل ۴ عمق کربناسیون و نیز احتمال شروع خوردگی تا سال ۲۱۰۰، با فرض کاور  $25 \text{ mm}$  برای عضو بتنی و نیز تغییرات غلظت کربن دی‌اکسید مطابق با حالت AIF1، محاسبه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده نزدیک به هم است. بیشترین مقدار ضریب که در فرمول ۷ معرفی شد، در سال ۲۱۰۰ می‌باشد چرا که میانگین دمای کره زمین همواره در حال افزایش است؛ این مقدار با فرض افزایش کره زمین به میزان صفر،  $2/5$  و  $6/5$  درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱،  $1/08$  و  $1/18$  است. با توجه به این موضوع نتایج بدست آمده در شکل‌های ۴ قابل توجیه است. می‌توان چنین بیان کرد که افزایش دمای زمین موجب افزایش عمق کربناسیون و در نتیجه احتمال شروع خوردگی می‌شود اما تاثیر آن چندان قابل ملاحظه نیست. لازم به ذکر است که اگر چه افزایش دمای زمین تاثیر قابل توجه بر زمان شروع خوردگی بر اثر کربناسیون نخواهد داشت، اما این افزایش دما منجر به افزایش قابل توجه سرعت خوردگی آرماتورها بعد از شروع خوردگی می‌شود [۱۰].

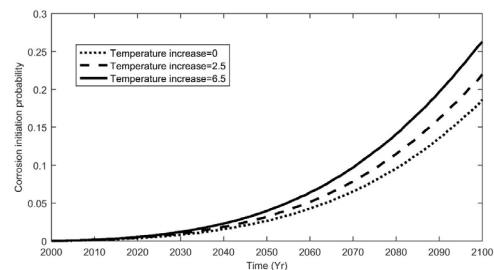
#### ۴-۳- اثر غیریکنواخت بودن غلظت کربن دی‌اکسید

در تمامی محاسباتی که صورت گرفت از غلظت میانگین کربن دی‌اکسید در اتمسفر استفاده شده و از غیریکنواخت بودن غلظت در نقاط مختلف چشم‌پوشی شده است. البته همانطور که در توضیحات فرمول ۶ بیان شد ضریب  $k$  برای در نظر گرفتن این تفاوت غلظت در نقاط مختلف پیشنهاد شد؛ ولی مقدار آن که برای مناطق شهری  $1/15$  و برای مناطق روستایی  $1/05$  پیشنهاد شد، به نظر ناکافی می‌آید [۱۱].

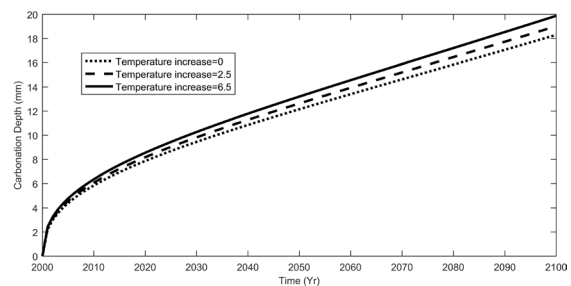
در شکل ۵ نتایج بدست آمده برای عمق کربناسیون و احتمال شروع خوردگی در طی دوره ۱۰۰ ساله، با فرض تغییرات ضریب  $k$  بین ۱ تا ۲ ارائه شده است.

اختلاف مشاهده می‌شود اختلاف مذکور کمتر از ۱۰ درصد است. ۲. ثابت در نظر گرفتن غلظت کربن دی‌اکسید برابر  $350 \text{ ppm}$  و در نظر نگرفتن تغییرات غلظت کربن دی‌اکسید در طی دوره ۱۰۰ ساله، منجر به این موضوع خواهد شد که حداکثر حدود ۳۰ درصد احتمال شروع خوردگی کمتر از حالت واقعی یا همان روش ارائه شده توسط Stewart و همکاران گردد.

۳. ثابت در نظر گرفتن غلظت کربن دی‌اکسید برابر  $950 \text{ ppm}$  که بیشترین غلظت کربن دی‌اکسید در طی دوره ۱۰۰ ساله است، منجر به این موضوع خواهد شد که حداکثر ۳۵ درصد احتمال شروع خوردگی بیشتر از حالت واقعی یا همان روش ارائه شده توسط Stewart و همکاران گردد.



الف: احتمال شروع خوردگی (محور افقی زمان با واحد سال و محور قائم احتمال شروع خوردگی)



ب: عمق کربناسیون (محور افقی زمان با واحد سال و محور قائم عمق کربناسیون با واحد میلی‌متر)

شکل ۴: عمق کربناسیون و احتمال شروع خوردگی با فرض وقوع هر یک از سه پیش‌بینی برای افزایش دمای زمین در طی دوره ۱۰۰ ساله

Fig. 4. Carbonation depth and the probability of corrosion with assuming the occurrence of each of the three predictions for increasing the temperature of the earth during the 100 year period

به طور مثال عمق کربناسیون در سال ۲۱۰۰ در حالتی که ضریب  $k$  برابر ۱ است و در واقع غلظت کربن دی اکسید در محیط در طی دوره ۱۰۰ ساله برابر غلظت میانگین جهانی است کمتر از ۲۰ میلی متر و احتمال شروع خوردگی نیز کمتر از ۲۰ درصد می باشد؛ در حالی که با فرض با فرض  $k$  برابر با ۲ عمق کربناسیون در سال ۲۱۰۰ بیش از ۲۵ میلی متر و احتمال شروع خوردگی بیش از ۶۰ درصد خواهد بود. لازم به ذکر است که در هر یک از تصاویر ارائه شده در شکل ۵ هر یک از نمودارها به ازای یک مقدار ضریب  $k$  است و ضریب مذکور در هر یک از دو شکل، از ۱ تا ۲، با فاصله ۰/۱ افزایش می یابد و در واقع نتایج برای ۱۱ مقدار مختلف  $k$  ارائه شده است.

### ۵- نتیجه گیری

می توان عوامل موثر بر کربناسیون و به عبارت دیگر دوام سازه های بتنی را به سه گروه عمده عوامل خارجی یا شرایط محیطی، عوامل داخلی یا ساختاری بتن و شرایط اجرایی و بهره برداری تقسیم بندی کرد. از مهمترین عوامل محیطی اثرگذار بر دوام بتن می توان به دما و غلظت کربن دی اکسید موجود در محیط اشاره کرد.

گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی منجر به افزایش دمای میانگین زمین و غلظت کربن دی اکسید در جو می شود و در نهایت می تواند موجب کاهش دوام سازه های بتنی گردد.

با توجه به اینکه بسیاری از پارامترهای تاثیرگذار بر روی عمق کربناسیون را نمی توان به قطعیت تعیین کرد و همواره خطاهایی در تعیین آن ها وجود دارد، استفاده از روش های آماری و احتمالاتی نسبت به روش های دقیق، برای بررسی دوام سازه ها مطلوب تر به نظر می رسد.

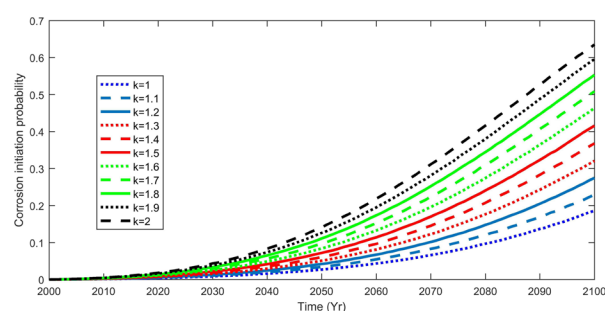
در این مقاله ابتدا نتایج به دست آمده با استفاده از دور روش ارائه شده برای محاسبه عمق کربناسیون با در نظر گرفتن تغییرات غلظت کربن دی اکسید با یک دیگر مقایسه شدند و مشاهده شد که روش ارائه شده توسط Stewart و همکاران نسبت به سایر روش های موجود دقیق تر است. سپس نتایج به دست آمده با در نظر گرفتن تغییرات غلظت، با نتایجی که برای محاسبه عمق کربناسیون غلظت ثابت در نظر گرفته می شد مقایسه شد و مشاهده گردید که در نظر نگرفتن تغییرات غلظت کربن دی اکسید می تواند اثر قابل ملاحظه ای بر روی نتایج به دست آمده برای عمق کربناسیون داشته باشد. همچنین مشاهده شد در نظر گرفتن هر یک از پیش بینی های صورت گرفته برای تغییرات غلظت کربن دی اکسید اثر قابل ملاحظه ای بر روی عمق کربناسیون نمی گذارد.

بعد از بررسی تغییر غلظت، اثر تغییر دما بر روی زمان شروع خوردگی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که نتایج به دست آمده در نظر گرفتن تغییر دمای زمین تاثیر چندانی بر زمان شروع خوردگی ندارد ولی بعد از شروع خوردگی آرماتورها، سرعت خوردگی را افزایش می دهد.

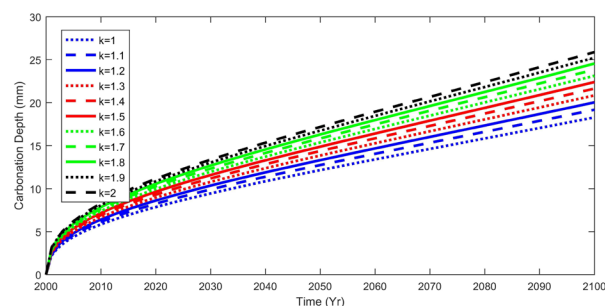
در قسمت اخر گفته شد استفاده از میانگین غلظت جهانی کربن دی اکسید برای محاسبه عمق کربناسیون موجب خطا در محاسبات شده و باید با توجه

در انجام محاسبات از روش Stewart و همکاران استفاده شده و فرض شده است که تغییرات میانگین غلظت کربن دی اکسید در جو مطابق با پیش بینی AIFI و تغییرات دمای زمین در طی دوره ۱۰۰ ساله برابر صفر است.

همانطور که مشاهده می شود در محیط هایی که غلظت کربن دی اکسید بیش از مقدار میانگین جهانی است، در نتیجه ضریب  $k$  در محیط های مذکور بیش از یک است، عمق کربناسیون و در نتیجه احتمال شروع خوردگی در سال های مختلف بیشتر است و به عبارت دیگر دوام عضو بتنی کمتر خواهد بود.



الف: احتمال شروع خوردگی (محور افقی زمان با واحد سال و محور قائم احتمال شروع خوردگی)



ب: عمق کربناسیون (محور افقی زمان با واحد سال و محور قائم عمق کربناسیون با واحد میلی متر)

### شکل ۵: اثر تغییرات ضریب $k$ در محاسبه عمق کربناسیون و احتمال شروع خوردگی

Fig. 5. The effect of changes in the coefficient  $k$  in calculating the depth of carbonation and the probability of corrosion initiation

- [11] M.G. Stewart, X. Wang, M.N.J.E.S. Nguyen, Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration, *Engineering Structures*, 33(4) (2011) 1326-1337.
- [12] M.G. Stewart, X. Wang, M.N.J.S.S. Nguyen, Climate change adaptation for corrosion control of concrete infrastructure, *Structural Safety*, 35 (2012) 29-39.
- [13] X. Wang, M.G. Stewart, M.J.C.c. Nguyen, Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia, *Climatic Change*, 110(3-4) (2012) 941-957.
- [14] A. Lindvall, Duracrete-probabilistic performance based durability design of concrete structures, in: 2nd Int. PhD. Symposium in civil engineering, 1998.
- [15] I.-S. Yoon, O. Çopuroğlu, K.-B.J.A.e. Park, Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, *Atmospheric environment*, 41(34) (2007) 7274-7285.
- [16] M. Akiyama, D.M. Frangopol, I.J.E.S. Yoshida, Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides, *Engineering Structures*, 32(11) (2010) 3768-3779.
- [17] D.V. Val, P.A.J.R.E. Trapper, S. Safety, Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion, *Reliability Engineering & System Safety*, 93(3) (2008) 364-372.
- [18] S. Engelund, L. Mohr, C. Edvardsen, General guidelines for durability design and redesign: duracrete, probabilistic performance based durability design of concrete structures, CUR, 2000.
- [19] K.A.T. Vu, M.G.J.S.s. Stewart, Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models, *Structural Safety*, 22(4) (2000) 313-333.
- [20] A.M. Neville, Properties of concrete, 3rd ed ed., Longman Scientific & Technical, 1981.
- [21] M.A. Shayanfar, Ghanooni-Bagha, M., Jahani, E, Reliability theory of structures (In Persian), IUST Publication, Tehran, Iran, 2016.
- [22] J.c.o.s. safety, Code, J.P.M., in, 2001.
- [23] L.J.I.o.E.C.E.T. Pham, Reliability analyses of reinforced concrete and composite column sections under concentric loads, *Institution of Engineers (Australia) CivEng Trans*, (1) (1985).
- [24] S.A. Mirza, J.G. MacGregor, M.J.J.o.t.S.D. Hatzinikolas, Statistical descriptions of strength of concrete, *Journal of the Structural Division*, 105(ASCE 14628 Proceeding) (6) (1979) 1021-1037.
- به غلظت کربن دی اکسید در محلی که سازه قرار دارد محاسبات انجام شود و یا با استفاده از ضریب k میانگین غلظت جهانی اصلاح شود.
- مراجع**
- [1] E. Sistonen, A. Cwirzen, J.J.C.S. Puttonen, Corrosion mechanism of hot-dip galvanised reinforcement bar in cracked concrete, *Corrosion Science*, 50(12) (2008) 3416-3428.
- [2] M.A. Shayanfar, M.-A. Barkhordari, M.J.J.o.C.S.U. Ghanooni-Bagha, Probability calculation of rebars corrosion in reinforced concrete using css algorithms, *Journal of Central South University*, 22(8) (2015) 3141-3150.
- [3] M.A. Shayanfar, M.A. Barkhordari, M.J.P.P.C.E. Ghanooni-Bagha, Estimation of corrosion occurrence in RC structure using reliability based PSO optimization, *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 59(4) (2015) 531-542.
- [4] M. Ghanooni-Bagha, M. Shayanfar, A. Shirzadi-Javid, H.J.C. Ziaadiny, B. Materials, Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 221-228.
- [5] M.A. Shayanfar, M.A. Barkhordari, M.J.A.i.S.E. Ghanooni-Bagha, Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure, *Advances in Structural Engineering*, 19(6) (2016) 897-907.
- [6] A.A. Ramezani-pour, Recommendations and proposals for concrete durability and islands off the coast of southern (In Persian), Road, Housing and Development Research Center, Iran, 1992.
- [7] A.V. Satta, R.V. Scotta, R.V.J.M.J. Vitaliani, Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, *ACI Materials Journal*, 90(5) (1993) 441-451.
- [8] N.a.S. Nakicenovic, R., Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, 1, 2000.
- [9] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007, in, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [10] E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, M.G. Stewart, X.J.E.S. Wang, Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach, *Engineering Structures*, 51 (2013) 259-266.



- [27] F.N. Sperling, R. Washington, R.J.J.C.C. Whittaker, Future climate change of the subtropical North Atlantic: implications for the cloud forests of Tenerife, *Climatic Change*, 65(1-2) (2004) 103-123.
- [28] P. Lemke, Ren, R. and Alley, I., The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report, *Climate Change*, 4 (2007) 2007.
- [25] T.M. Wigley, R. Richels, J.A.J.N. Edmonds, Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations, *Nature*, 379(6562) (1996) 240.
- [26] M.R. Allen, W.J.J.N. Ingram, Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle, *Nature*, 419(6903) (2002) 224-232.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Ghanooni-Bagha, M. A. Shayanfar, M. R. Yekefallah, The Effect of Changes in Carbon-dioxide Concentrations on Corrosion Initiation of Reinforced Concrete Structures, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 697-706.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12385.5199



