

Wpływ różnej zawartości cementu i wskaźnika wodno-cementowego na głębokość karbonatyzacji i prawdopodobieństwo karbonatyzacji w betonie

Effect of different cement content and water cement ratio on carbonation depth and probability of carbonation induced corrosion for concrete

Mostafa Hassan^{1,*}, Lamya Amleh¹, Hesham Othman²

¹Ryerson University, Toronto –Ontario – Canada

²Ryerson University, - Cairo Campus hosted by Universities of Canada in Egypt, New Administrative Capital, Egypt

*Corresponding author: Mostafa Hassan, e-mail: mostafa.hassan@ryerson.ca

Streszczenie

Infrastruktura jest narażona na oddziaływanie dwutlenku węgla a co za tym idzie karbonatyzację betonu, która w przypadku mostów z żelbetu może powodować korozję stalowego zbrojenia. Dwutlenek węgla ma duży wpływ na głębokość karbonatyzacji betonu. Zawartość cementu i wskaźnik wodno-cementowy mają duży wpływ na głębokość karbonatyzacji betonu. Niniejsze badanie ma na celu zbadanie wpływu zmian klimatycznych na głębokość karbonatyzacji przez rozważenie różnych scenariuszy RCP [ang. Representative Concentration Pathway - reprezentatywnych ścieżek stężenia CO₂]. Ponadto zbadano wpływ wytrzymałości betonu na ściskanie na głębokość karbonatyzacji. Dodatkowo zbadano wpływ różnych zawartości cementu na prawdopodobieństwo korozji, wywołanej karbonatyzacją. Rozważane są dwa parametry, a mianowicie zawartość cementu [400 kg/m³, 350 kg/m³ i 250 kg/m³] oraz stosunek wody do cementu [0,45 i 0,55]. W badaniu tym uwzględniono różne stężenia CO₂ przy użyciu scenariuszy RCP. Scenariusze RCP [2.6, 4.5, 6 i 8.5] zostały wykorzystane przez Międzypaństwowy Zespół ds. Zmian Klimatu [IPCC], do przedstawienia odpowiednio ścieżki niskiej, średniej i wysokiej emisji. Głębokość karbonatyzacji oszacowano za pomocą równań Yoona i Stewarta. Ponadto zbadano prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją za pomocą symulacji Monte Carlo i metody niezawodności pierwszego rzędu, przy różnych zawartościach cementu [FORM] dla RCP 8.5. Określono procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji przy użyciu Yoona w porównaniu z równaniami Stewarta, dla mieszanek betonowych o różnych proporcjach wody do cementu i zawartości cementu w latach 2025 i 2100, zarówno dla RCP 2.6, jak i RCP 8.5. Ostatecznie prawdopodobieństwo

Summary

Nowadays transportation infrastructure is subjected to a high percentage of carbon dioxide emissions. CO₂ greatly affects the carbonation depth of concrete, which can affect the deck for reinforced concrete bridges causing corrosion to steel reinforcement. Cement content and water to cement ratio greatly influence the carbonation depth of concrete. This study aims to investigate the effect of climate change on carbonation depth by considering different Representative Concentration Pathways [RCPs]. In addition, the effect of different compressive strengths on the carbonation depth was investigated in this research. Additionally, the effect of different cement contents on the probability of carbonation-induced corrosion has been investigated. Two parameters are considered, namely, the cement content [400 kg/m³, 350 kg/m³, and 250 kg/m³] and, the water to cement ratio [0.45 and 0.55]. This study RCPs for CO₂ concentrations. The RCP [2.6, 4.5, 6, and 8.5] trajectory was used by the Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], which represents low emission pathways, intermediate emission pathways, and high emission pathways, respectively. Carbonation depth has been estimated using Yoon's and Stewart's equations. Furthermore, the probability of carbonation-induced corrosion has been investigated using Monte Carlo simulation and the first-order reliability method at different cement contents for RCP 8.5. The percentage increase in the carbonation depth using Yoon's compared to Stewart's equations for concrete mixes which consist of different water to cement ratios and cement content for the years 2025 and 2100 for both RCP 2.6 and RCP 8.5 were calculated. Finally, the probability of carbonation-induced corrosion conducted by FORM for cement content of 250 kg/m³ has been increased by

korozji wywołanej karbonatyzacją przeprowadzonej przez FORM dla zawartości cementu 250 kg/m³, wzrosło o 118% w porównaniu z prawdopodobieństwem karbonatyzacji z zawartością cementu wynoszącą 400 kg/m³, dla roku 2100.

Słowa kluczowe: głębokość karbonatyzacji, scenariusze RCP, zmiany klimatu, zawartość cementu, stosunek wody do cementu, prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją, FORM, symulacja Monte Carlo

118% compared to the probability of carbonation including cement content equal to 400 kg/m³ for the year 2100.

Keywords: carbonation depth, representative concentration pathways (RCPs), climate change, cement content, water to cement ratio, probability of carbonation induced corrosion, form, monte carlo simulation

1. Wprowadzenie

Karbonatyzacja betonu jest jedną z głównych przyczyn korozji zbrojenia. Zwiększenie stężenia CO₂ związane z globalnym ociepleniem, zwiększa prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją. Ponadto wzrost temperatury zwiększa szybkość korozji. Tlen i wilgoć to kolejne składniki niezbędne do korozji stalowego zbrojenia (1). Zaczyn cementowy zawiera pory kapilarnie (1). Wielkość porów zależy od jakości betonu i ilości wody w mieszance. Gęstszy beton z mniejszym stosunkiem wody do cementu, zmniejsza ilość porów.

Karbonizacja betonu to proces, w którym dwutlenek węgla z powietrza penetruje beton przez pory i reaguje z wodorotlenkiem wapnia, tworząc węglan wapnia (2). Przekształcenie Ca(OH)₂ w CaCO₃ pod wpływem dwutlenku węgla, powoduje niewielki skurcz (3,4). Wartość pH stwardniałego betonu wynosi zazwyczaj od 12,5 do 13,5 (4). Dwutlenek węgla, który jest obecny w atmosferze przenika do betonu i zmniejsza jego zasadowość; w ten sposób wartość pH betonu zostaje obniżona do około 9,0 (5-8). Na degradację konstrukcji betonowych mogą mieć bezpośredni lub pośredni wpływ czynniki zmiany klimatu związane ze zmianą stężenia CO₂, temperatury i wilgotności względnej (9).

Scenariusze RCP [z ang. Representative Concentration Pathways – Reprezentatywne Ścieżki Stężenia (CO₂)] są identyfikowane za pomocą liczby wskazującej zmianę wymuszania radiacyjnego, które jest brakiem równowagi między promieniowaniem słonecznym wchodzącym do systemu klimatycznego a promieniowaniem podczerwonym, powodowanym przez gazy cieplarniane (10). Stężenia dwutlenku węgla dla czterech różnych scenariuszy RCP są używane w bieżącym badaniu, jak pokazano na rys. 1 (10). Te cztery różne scenariusze RCP oparte są na symulacjach z pięciu różnych modeli systemów Ziemi. Niniejszy dokument wykorzystuje scenariusze klimatyczne z czterema różnymi scenariuszami RCP, od scenariuszy niskiej emisji do scenariuszy wysokiej emisji; RCP 2.6 to scenariusz niskiej emisji, RCP 4.5 i RCP 6 to scenariusze średniej emisji, a RCP 8.5 to scenariusz wysokiej emisji. Dwutlenek węgla jest największym czynnikiem przyczyniającym się do historycznej i przewidywanej zmiany wymuszania radiacyjnego, a następnie metan i podtlenek azotu (11,12). Wielu badaczy badało wpływ karbonatyzacji i opracowano różne modele matematyczne, do przewidywania głębokości karbonatyzacji (13-15).

1. Introduction

Carbon dioxide is a major cause of reinforcement corrosion in bridges, buildings, and other concrete infrastructure. The increase in CO₂ levels associated with global warming, increases the likelihood of carbonation-induced corrosion. Moreover, the temperature rise will increase the corrosion rates. Oxygen and moisture are the other parameters that are required for corrosion of steel reinforcement (1). Hydrated cement paste contains capillary pores (1). The extent of pores depends upon the quality of concrete and the presence of water at the time of mixing (1). Denser concrete with less water to cement ratio, reduces the number of pores. The carbonation of concrete is a process in which carbon dioxide from the air penetrates the concrete through pores and reacts with calcium hydroxide, to form calcium carbonates (2). The conversion of Ca(OH)₂ into CaCO₃ by the action of CO₂ results in a small shrinkage (3,4). The pH value of hardened concrete is generally between 12.5 to 13.5 (4). Carbon dioxide, which is present in the atmosphere in large concentrations, penetrates concrete, and reduces its alkalinity; thus, the pH value of the concrete will be reduced to around 9.0 (5-8). The deterioration of concrete structures can be affected directly or indirectly by climate change drivers, related to the change in CO₂ concentration, temperature, and relative humidity (9).

RCPs are identified by a number indicating the change in radiative forcing which is the imbalance between the solar radiation entering the climate system and the infrared radiation caused by greenhouse gases (10). Carbon dioxide concentrations for four different RCPs are used in the current study as shown in Fig. 1 (10), these four different RCPs are based on simulations from five different earth system models. This paper uses climate scenarios with four different RCPs ranging from low emission scenarios to high emission scenarios; RCP 2.6 is a low emission scenario, RCP 4.5 and RCP 6 are considered medium emission scenarios, and RCP 8.5 is considered a high emission scenario. Carbon dioxide is the largest contributor to the historical and projected change radiative forcing, followed by methane [CH₄] and nitrous oxide [N₂O] (11), (12). Many researchers have studied the impact of carbonation, and various mathematical models have been developed to predict the carbonation depths (13-15).

Carbonation depth depends on many parameters such as concrete quality, concrete cover, relative humidity, and ambient carbon dio-

Głębokość karbonatyzacji zależy od wielu parametrów, takich jak jakość betonu, pokrycie betonu, wilgotność względna, stężenie dwutlenku węgla w otoczeniu i inne. Wpływ karbonatyzacji był badany przez wielu naukowców i opracowano różne modele matematyczne w celu przewidywania głębokości karbonatyzacji. Yoon i in. (14) wywnioskowali, że korozja może wystąpić, gdy odległość między frontem karbonatyzacji a powierzchnią pręta zbrojeniowego, jest mniejsza niż 1-5 mm.

Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu [IPCC] w roku 2007 wskazał na znaczny wzrost stężenia CO₂ w atmosferze z 280 ppm w 1750 do 380 ppm w 2005 z tendencją wzrostową. Stewart i in. (15) zmierzili stężenia CO₂ dochodzące do 575 ppm w Czechach, przy czym stężenia CO₂ były wyższe na poziomie ulicy. George i in. (16) stwierdzili, że stężenie CO₂ na terenie miejskim [miasto Baltimore, USA] było o około 16% wyższe niż na terenach wiejskich. Dlatego dla infrastruktury zlokalizowanej w środowisku miejskim uwzględniono nowy czynnik K_{urban} . Podobnie jak Stewart i in. (15), w tym artykule przyjęto, że K_{urban} ma rozkład normalny ze średnią 1,15 i współczynnikiem zmienności (CV) 0,10.

2. Cel badań

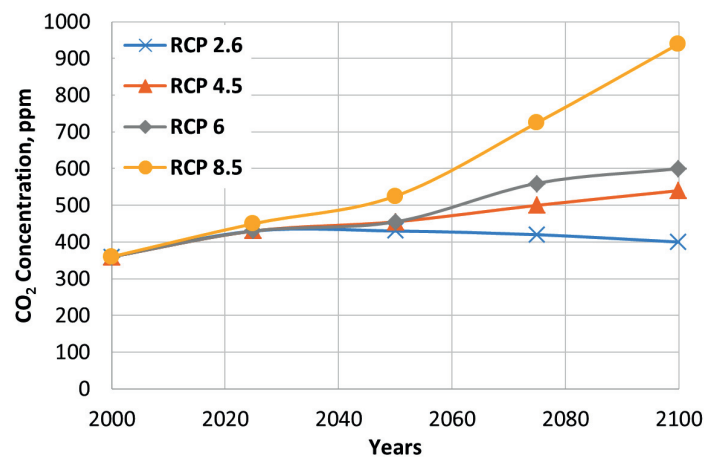
Celem niniejszej pracy badawczej jest określenie efektywnej głębokości karbonatyzacji dla różnych zawartości cementu [400 kg/m³, 350 kg/m³ i 250 kg/m³] i różnego wskaźnika wodno-cementowego [0,45; 0,55], dla różnych scenariuszy RCP. Ponadto przeprowadzono porównanie między równaniem Yoon'a a równaniem Stewart dla różnych zawartości cementu i określono procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji przy użyciu równania Yoon'a w porównaniu do równania Stewart, dla różnych RCP. Ponadto przeprowadzono kolejne badania parametryczne nad wpływem głębokości karbonatyzacji dla różnych wytrzymałości na ściskanie. Na koniec przeprowadzono analizę prawdopodobieństwa inicjacji korozji dla karbonatyzacji za pomocą symulacji Monte Carlo [SMC] i metody niezawodności pierwszego rzędu [FORM] dla różnych zawartości cementu dla RCP 8.5. Ponadto z metody FORM dla różnych zawartości cementu dla RCP 8.5 wyciągnięto wnioski, dotyczące wskaźnika niezawodności.

3. Metody

Model głębokości karbonatyzacji zalecany przez DuraCrete (17), Yoon'a i in. (14) oraz innych autorów uwzględnia szeroki zakres parametrów wpływających, a głębokość karbonatyzacji [x_c w cm] jest przewidywana jako proces dyfuzji, t jest definiowane w latach począwszy od 2000 r., co ilustrują równania 1-3.

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a}} K_{urban} C_{CO_2}(t - 1999) \left(\frac{t_0}{t - 1999} \right)^{n_m} \quad t \geq 2000 \quad [1]$$

$$D_{CO_2}(t) = D_1(t - 1999)^{-n_d} \quad [2]$$



Rys. 1. Przewidywana emisja dwutlenku węgla dla różnych scenariuszy RCP (10,13)

Fig. 1. Future projection of carbon dioxide emission for different RCPs (10,13)

xide concentration (14). Yoon et al. (14) deduced that corrosion may occur when the distance between the carbonation front and the reinforcement bar surface, is less than 1–5 mm.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for the year 2007, indicated a significant increase in CO₂ concentration in the atmosphere from 280 ppm in 1750 to 380 ppm in 2005 with an increasing trend. Stewart et al. (15) observed CO₂ concentrations of up to 575 ppm in the Czech Republic, with CO₂ concentrations higher near the street level. George et al. (16) found that CO₂ concentrations in an urban site (Baltimore), were about 16% higher than in a rural site. Therefore, a new factor [K_{urban}] was considered for infrastructure that is located in urban environments. Similar to Stewart et al. (15), this paper assumed K_{urban} to be normally distributed with a mean of 1.15 and a coefficient of variation (CV) of 0.10.

2. Research Objective

The objective of this research study is to investigate the carbonation depth considering different RCPs, at different cement contents (400 kg/m³, 350 kg/m³ and 250 kg/m³) and different water to cement ratios [0.45-0.55]. In addition, a comparison study has been conducted between Yoon's and Stewart's models and the percentage increase in the carbonation depth, has been estimated for different RCPs. Moreover, another parametric study has been conducted on the effect of different compressive strengths on the carbonation depth. Finally, the probability of carbonation-induced corrosion was conducted using Monte Carlo simulation [MCS] and the first-order reliability method [FORM] at different cement contents, for the highest emission scenario of CO₂. In addition, the reliability index was estimated from FORM at different cement contents for RCP 8.5.

3. Research Methodology

In this research, Yoon's and Stewart's equations are used to predict the carbonation depth. The carbonation depth model recommen-

$$a = 0,75 C_e C_a \alpha_h \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad [3]$$

gdzie:

$C_{CO_2}(t)$ to zależne od czasu stężenie masowe CO_2 ponieważ 1ppm $CO_2 = 1.94 \text{ mg/m}^3$, stąd wzór przeliczający stężenie CO_2 z [ppm] na $[kg/m^3]$ wynosi $[1 \text{ ppm} = 0.0019 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3]$,

k_{urban} to współczynnik uwzględniający podwyższony poziom CO_2 w środowisku miejskim,

$D_{CO_2}(t)$ to współczynnik dyfuzji CO_2 w betonie,

D_1 to współczynnik dyfuzji CO_2 po roku,

n_d to współczynnik wieku dla współczynnika dyfuzji CO_2 ,

t_0 to jeden rok

C_e to zawartość cementu, kg/m^3 ,

CaO to zawartość CaO w cemencie [0,65],

α_h to stopień hydratacji,

M_{CaO} to masa molowa CaO [56 g/mol]

M_{CO_2} to masa molowa CO_2 [44 g/mol].

Współczynnik wieku dla warunków mikroklimatycznych n_m wynosi $n_m = 0$ dla osłoniętego miejsca na zewnątrz i $n_m = 0,12$ dla niezadaszonego miejsca na zewnątrz. W niniejszej pracy badawczej za warunki mikroklimatyczne uznano osłonięte miejsce na zewnątrz.

Wartości średnie dla D_1 i n_d są przedstawione w tabelicy 2. Yoon i in (14) podali szacunkowe wartości maksymalne [95. percentyl] dla D_1 i n_d . Współczynnik dyfuzji D_1 jest mniejszy niż $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, co jest odpowiednie dla betonu dobrej jakości (18). Założone warunki to $T = 20^\circ\text{C}$ i $RH = 65\%$.

Stopień hydratacji dla cementu portlandzkiego po ponad 400 dniach szacuje się na podstawie równania 4 według de Larrarda (19).

$$\alpha_h \approx 1 - e^{-3.38w/c} \quad [4]$$

Ponadto wyższa temperatura powoduje wzrost współczynnika dyfuzji, co prowadzi do zwiększenia głębokości karbonatyzacji (20). Wpływ temperatury na współczynnik dyfuzji jest modelowany za pomocą prawa Arrheniusa (21), gdzie zależna od czasu zmiana współczynnika dyfuzji w porównaniu z temperaturą 20°C , jest wyrażona równaniem 5.

$$F_T(t) = e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{av}(t)} \right)} \text{ and } T_{av}(T) = \frac{\sum_{i=2000}^t T(t)}{t - 1999} \quad [5]$$

gdzie:

$T(t)$ to temperatura w czasie t , $^\circ\text{C}$,

E to energia aktywacji procesu dyfuzji [40 kJ/mol],

R jest stałą gazową [$8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ/mol K}$].

Ponadto równanie 1, zaproponowane przez Yoona i in. (14), jest modelem predykcyjnym dla punktu w czasie, obliczając głębokość karbonatyzacji w czasie t zakłada się, że stężenie $CO_2(t)$ jest stałe przez cały czas do czasu t . Ponadto spowoduje to przeszacowa-

ny przez DuraCrete (17), Yoon, et al. (14), and others, consider a wide range of parameters. The carbonation depth [x_c in cm] is predicted as a diffusion process, where t is defined in years starting from the year 2000, as per equation 1 to equation 3.

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a}} K_{urban} C_{CO_2}(t - 1999) \left(\frac{t_0}{t - 1999} \right)^{n_m} \quad t \geq 2000 \quad [1]$$

$$D_{CO_2}(t) = D_1(t - 1999)^{-n_d} \quad [2]$$

$$a = 0.75 C_e C_a \alpha_h \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad [3]$$

where:

$C_{CO_2}(t)$ is the time-dependent mass concentration of CO_2 [the concentration of 1ppm of $CO_2 = 1.94 \text{ mg/m}^3$], thus the formula that is used to convert the concentration of CO_2 from [ppm] to $[kg/m^3]$ is $[1 \text{ ppm} = 0.0019 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3]$,

k_{urban} is a factor to account for increased CO_2 levels in urban environments,

$D_{CO_2}(t)$ is the CO_2 diffusion coefficient in concrete,

D_1 is CO_2 diffusion coefficient after one year,

n_d is the age factor for the CO_2 diffusion coefficient,

t_0 is one year,

C_e is the cement content, kg/m^3 ,

CaO is the CaO content in cement [0.65],

α_h is the degree of hydration,

M_{CaO} is the molar mass of CaO [56 g/mol],

M_{CO_2} is the molar mass of CO_2 [44 g/mol].

The age factor for microclimatic conditions n_m is $n_m = 0$ for sheltered outdoor and $n_m = 0.12$ for unsheltered outdoor. This research study considers the microclimatic conditions as sheltered outdoor.

The mean values for D_1 and n_d are shown in Table 1. Yoon et al. (14) provided estimates of the maximum 95th percentile values for D_1 and n_d . The diffusion coefficient D_1 is less than $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ which is appropriate for good quality concrete (18). These parameters are based on temperature $T = 20^\circ\text{C}$ and relative humidity $RH = 65\%$.

Moreover, the degree of hydration for ordinary Portland cement after more than 400 days is investigated from equation 4, according to de Larrard, (19).

$$\alpha_h \approx 1 - e^{-3.38w/c} \quad [4]$$

Tablica 1 / Table 1

ŚREDNIE WARTOŚCI PARAMETRÓW DLA WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI I WSPÓŁCZYNNIKA WIEKU (14)

MEAN PARAMETER VALUES FOR DIFFUSION COEFFICIENT AND AGE FACTOR (14)

w/c	$D_1 \times 10^{-4} \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	n_d
0.45	0.65	0.218
0.50	1.24	0.235
0.55	2.22	0.240

nie głębokości karbonatyzacji, ponieważ stężenie CO₂ będzie stopniowo wzrastać w czasie, aż do szczytowej wartości CO₂(t). Stewart i in. (15) obliczyli głębokości karbonatyzacji spowodowane zwiększonym stężeniem CO₂ w atmosferze, na podstawie średniego stężenia CO₂ w tym okresie. Ponadto równanie 1 można przekształcić do równania 6.

$$X_c = \sqrt{\frac{2f_T(t) \cdot D_{CO_2}(t)}{a} K_{urban} J_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{1}{t-1999} \right)^{n_m}} \quad t \geq 2000 \quad [6]$$

W niniejszej pracy badawczej wybrano statystyczny model karbonatyzacji zaproponowany przez Silva i in. (23) oraz Mizzi i in. (24). Ponadto, jest to model rudymenarny, łączy w sobie zarówno stężenie CO₂, jak i wytrzymałość betonu na ściskanie. Współczynnik karbonatyzacji jest definiowany jako zmienna zależna, zmienia się w zależności od właściwości betonu, warunków dojrzewania i ekspozycji środowiskowej, i jest przedstawiony w równaniach 7 i 8.

$$h = k_w \times t^{1/2} \text{ dla } RH > 70\% \quad [7]$$

$$k_w = (3.355 \times c) - (0.019 \times C) - (0.042 \times f_c) + 10.83 \quad [8]$$

gdzie:

h - głębokość karbonatyzacji, mm,

k_w - współczynnik karbonatyzacji, mm/rok^{0.5},

t - czas ekspozycji na CO₂, lata,

c - zawartość CO₂, %,

f_c - wytrzymałość betonu na ściskanie, MPa,

C - zawartość klinkieru, kg/m³.

4. Wyniki

4.1. Wpływ różnej zawartości cementu na głębokość karbonatyzacji

Badanie parametryczne przeprowadzone w ramach tej pracy ma na celu określenie wpływu różnych zawartości cementu przy wskaźniku wodno-cementowym 0,45 na głębokość karbonatyzacji, która jest obliczana przy użyciu równania Yoona, dla wszystkich mieszanek betonowych. Z rys. 2(a) wynika, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 wynosi 6,44 mm w roku 2025 przy zawartości cementu 400 kg/m³ i wskaźniku wodno-cementowym 0,45, natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 wynosi 16.18 mm dla roku 2100 przy zawartości cementu równej 400 kg/m³ i wskaźniku wodno-cementowym równym 0,45.

Ponadto na rys. 2(b) zauważono, że głębokość karbonatyzacji dla RCP 2.6 jest równa 6.88 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej 350 kg/m³, natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 17,30 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 350 kg/m³, a wskaźnik wodno-cementowy jest równy 0,45.

Furthermore, a higher temperature will cause an increase in diffusion coefficient, leading to increased carbonation depths (20). The effect of temperature on diffusion coefficient is modeled using the Arrhenius Law (21), where the time-dependent change in diffusion coefficient compared to a temperature of 20°C, is expressed in equation 5.

$$F_T(t) = e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T_{av}(t)} \right)} \text{ and } T_{av}(T) = \frac{\sum_{i=2000}^t T(t)}{t-1999} \quad [5]$$

where:

T(t) is the temperature at time t, °C

E is the activation energy of the diffusion process [40 kJ/mol]

R is the gas constant [8.314 × 10⁻³ kJ/mol K].

Moreover, equation (1) proposed by Yoon et al. (14) is a point-in-time predictive model, the carbonation depth at the time (t) assumes that CO₂(t) is constant for all times, up to time (t). In addition, it will result in an overestimate of the carbonation depth as CO₂ concentration will be gradually increasing with time, up to the peak value of CO₂(t). Stewart et al. (22) calculated the carbonation depths due to enhanced atmospheric CO₂ concentration, using the average CO₂ concentration over the period. Moreover, equation 1 can be rewritten as in equation 6.

$$X_c = \sqrt{\frac{2f_T(t) \cdot D_{CO_2}(t)}{a} K_{urban} J_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{1}{t-1999} \right)^{n_m}} \quad t \geq 2000 \quad [6]$$

The statistical model of carbonation proposed by Silva et al. (23) and Mizzi et al. (24) is chosen for the current study to deduct the carbonation depth, at different compressive strengths of concrete. Moreover, it is a rudimental model, it combines both CO₂ concentrations and the compressive strength of concrete. The carbonation coefficient is defined as the dependent variable, and varies according to concrete properties, curing conditions, and environmental exposure, as shown in equations 7 and 8.

$$h = k_w \times t^{1/2} \text{ dla } RH > 70\% \quad [7]$$

$$k_w = (3.355 \times c) - (0.019 \times C) - (0.042 \times f_c) + 10.83 \quad [8]$$

where:

h - carbonation depth, mm,

k_w - carbonation coefficients, mm/year^{0.5},

T - CO₂ exposure time, years,

C - CO₂ content, %,

f_c - concrete compressive strength, MPa,

C - clinker content, kg/m³.

Ponadto z rys. 2(c) wynika, że głębokość karbonatyzacji dla RCP 2.6 wynosi 8,15 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej 250 kg/m³, natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 20,47 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 250 kg/m³, a wskaźnik wodno-cementowy jest równy 0,45.

Ostatecznie stwierdzono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 [zawartość cementu = 250 kg/m³] zwiększyła się o 26,5 % w porównaniu ze scenariuszem RCP 2.6 dla zawartości cementu 400 kg/m³, w różnych latach. Ponadto zauważono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5 dla zawartości cementu wynoszącej 250 kg/m³, również zwiększyła się o 26,5 % w porównaniu do zawartości cementu równej 400 kg/m³, w różnych latach. Dodatkowo, gdy wzrasta zawartość cementu w mieszance betonowej, oznacza to, że w mikrostrukturze betonu może powstać mniej porów kapilarnych, co może prowadzić do mniejszej głębokości karbonatyzacji, jak wspomniano w wynikach wcześniej.

Badanie parametryczne przeprowadzone w ramach tego badania ma na celu określenie wpływu różnej zawartości cementu dla różnych mieszanek betonowych przy wskaźniku wodno-cementowym 0,55 na głębokość karbonatyzacji, która jest obliczana przy użyciu równania Yoon, dla wszystkich mieszanek betonowych. Z rys. 3(a) wynika, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 jest równa 11,05 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej 400 kg/m³ i wskaźniku wodno-cementowym równym 0,55, natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 27,35 mm w roku 2100, przy zawartości cementu równej 400 kg/m³ i wskaźniku wodno-cementowym równym 0,55.

Ponadto na rys. 3(b) stwierdzono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 jest równa 11,81 mm w roku 2025, przy zawartości cementu równej 350 kg/m³, natomiast głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5 jest równa 29,24 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 350 kg/m³, a wskaźnik wodno-cementowy jest równy 0,55.

Ponadto z rys. 3(c) wynika, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 wynosi 13,97 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej 250 kg/m³, natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 34,60 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 250 kg/m³, a wskaźnik wodno-cementowy jest równy 0,55.

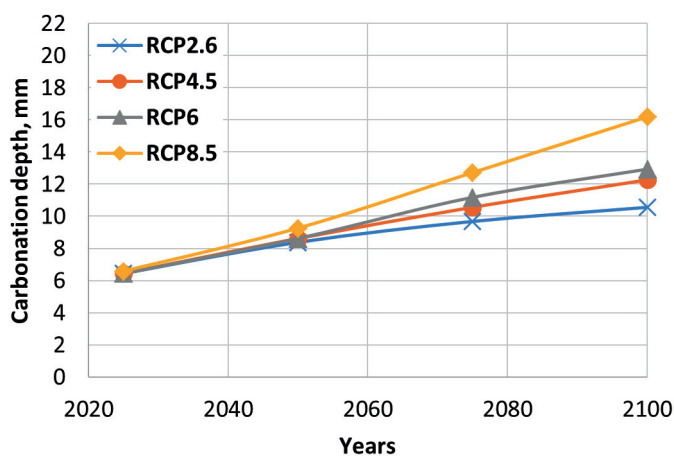
Ostatecznie stwierdzono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 dla zawartości cementu równej 250 kg/m³ zwiększyła się o 26,5 %, w porównaniu z zawartością cementu wynoszącą 400 kg/m³ w różnych latach. Ponadto zauważono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5 dla zawartości cementu równej 250 kg/m³ zwiększyła się o 26,5 %, w porównaniu do 400 kg/m³ w różnych latach.

W miarę wzrostu wskaźnika wodno-cementowego w mieszance, w mikrostrukturze betonu zwiększa się udział porów kapilarnych. W efekcie zwiększa to możliwość karbonatyzacji. Ponadto stwierdzono, że procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji wynosi 71,5% zarówno dla scenariuszy RCP 2.6 i RCP 8.5 przy w/c = 0,55, w porównaniu z w/c = 0,45 dla scenariuszy RCP 2.6 i RCP

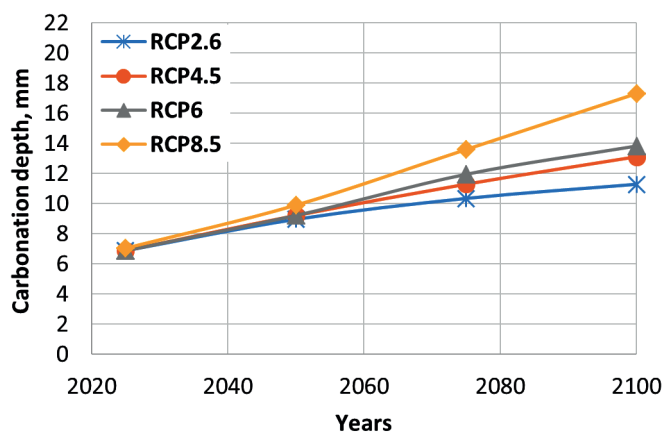
4. Analysis of results

4.1. Effect of different cement contents on the carbonation depth

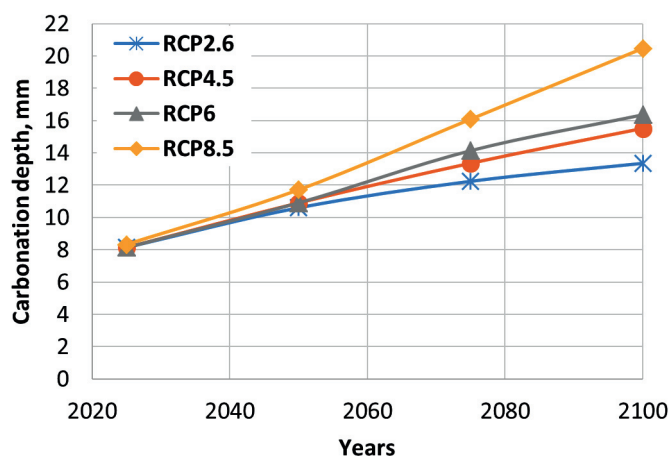
The parametric study was conducted through this research to investigate the effect of different cement contents with a water to cement ratio of 0.45 on the carbonation depth, which was calcula-



(a) Cement content / Zawartość cementu = 400 kg/m³



(b) Cement content / Zawartość cementu = 350 kg/m³



(c) Cement content / Zawartość cementu = 250 kg/m³

Rys. 2. Głębokość karbonatyzacji dla różnych zawartości cementu przy różnych RCPs dla w/c = 0,45

Fig. 2. Projection of carbonation depth at different RCPs [different cement contents and w/c = 0.45] using Yoon's equation

8.5 odpowiednio dla roku 2025. Ponadto zaobserwowano, że procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji wynosi 70.3% zarówno dla RCP 2.6 i RCP 8.5 przy $w/c = 0,55$ w porównaniu z $w/c = 0,45$ dla RCP 2.6 i RCP 8.5, odpowiednio dla roku 2050.

Określono wpływ różnej zawartości cementu w mieszankach betonowych o stosunku wodno-cementowym 0,45 na głębokość karbonatyzacji, za pomocą równania Stewarta i in. (22) dla mieszanek betonowych, przy którym to równaniu stężenie dwutlenku węgla zmienia się w czasie. Z rys. 4(a) wynika, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 jest równa 4,89 mm dla roku 2025, przy zawartości cementu równej 250 kg/m^3 i wskaźniku wodno-cementowym równym 0,45, natomiast głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5 jest równa 10,72 mm dla roku 2100, przy zawartości cementu równej 250 kg/m^3 i wskaźniku wodno-cementowym równym 0,45.

Ponadto na rys. 4b zauważyć można, że dla stosunku wodno-cementowego równego 0,45, głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 jest równa 4.13 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej 350 kg/m^3 , natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 9,06 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 350 kg/m^3 .

Z danych pokazanych na rys. 4c wynika, że dla stosunku wodno-cementowego równego 0,45, głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 wynosi 3,86 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej 400 kg/m^3 , natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 8,48 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 400 kg/m^3 .

Co więcej stwierdzono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 przy zawartości cementu równej 250 kg/m^3 zwiększyła się o 26,5% w porównaniu do zawartości cementu wynoszącej 400 kg/m^3 w różnych latach. Podobnie zauważono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5 dla zawartości cementu 250 kg/m^3 zwiększyła się o 26,5%, w porównaniu do zawartości cementu 400 kg/m^3 w różnych latach.

Zbadano wpływ różnej zawartości cementu dla mieszanek betonowych o stosunku wodno-cementowym 0,55 na głębokość karbonatyzacji, przy użyciu równania Stewart i in. (22) dla mieszanek betonowych. Z rys. 5a wynika, że dla stosunku wodno-cementowego 0,55, głębokość karbonatyzacji dla RCP 2.6 jest równa 8,39 mm dla roku 2025, przy zawartości cementu równej 250 kg/m^3 , natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 jest równa 18,12 mm dla roku 2100, przy zawartości cementu równej 250 kg/m^3 .

Z danych pokazanych na rys. 5b wynika, że głębokość karbonatyzacji dla RCP 2.6 wynosi 7,09 mm w roku 2025, przy zawartości cementu równej 350 kg/m^3 , natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 wynosi 15,31 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 350 kg/m^3 , przy wskaźniku wodno-cementowym 0,55.

Ponadto z rys. 5c wynika, że głębokość karbonatyzacji dla RCP 2.6 wynosi 6,63 mm w roku 2025 przy zawartości cementu równej

ted using Yoon's equation for all concrete mixes. It was observed that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 6.44 mm for the year 2025, and cement content is equal to 400 kg/m^3 , while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 16.18 mm for the year 2100 including cement content equal to 400 kg/m^3 , as shown in Fig. 2(a). Moreover, the carbonation depth for RCP 2.6 would be 6.88 mm for the year 2025 including cement content equal to 350 kg/m^3 , while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 17.30 mm for the year 2100 including cement content equal to 350 kg/m^3 , as shown in Fig. 2(b).

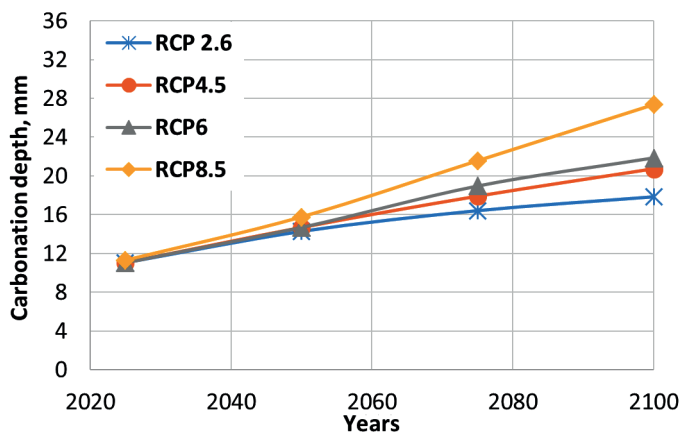
Furthermore, it was deduced that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 8.15 mm for the year 2025 including cement content equal to 250 kg/m^3 , while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 20.47 mm for the year 2100 including cement content equal to 250 kg/m^3 as shown in Fig. 2 (c).

Finally, the carbonation depth for the RCP 2.6 scenario including cement content equal to 250 kg/m^3 has been increased by 26.5% compared to the carbonation depth for the RCP 2.6 scenario, including cement content equal to 400 kg/m^3 at different years. In addition, the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 250 kg/m^3 has been increased by 26.5% compared to the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 400 kg/m^3 at different years.

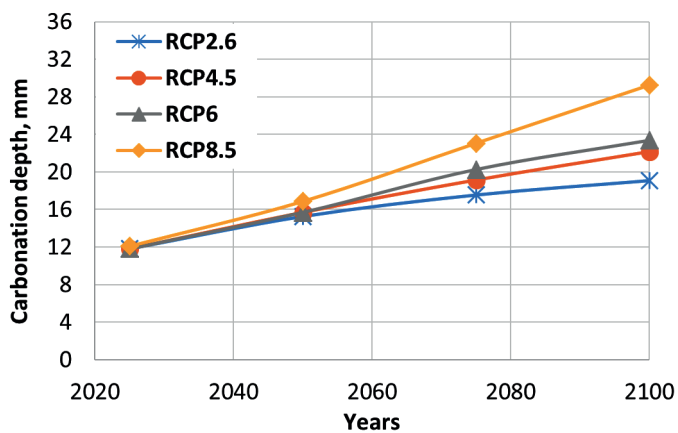
Moreover, another parametric study was conducted through this study to investigate the effect of different cement contents for different concrete mixes with a water to cement ratio of 0.55 on the carbonation depth, which was calculated using Yoon's equation. It was concluded that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 11.05 mm for the year 2025 at which cement content equal to 400 kg/m^3 , while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 27.35 mm for the year 2100 that including cement content equal to 400 kg/m^3 , as shown in Fig. 3(a). In addition, the carbonation depth for RCP 2.6 would be 11.81 mm for the year 2025 including a cement content equal to 350 kg/m^3 , while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 29.24 mm for the year 2100, including cement content equal to 350 kg/m^3 , as shown in Fig. 3(b).

Furthermore, it was deduced that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 13.97 mm in 2025 including cement content equal to 250 kg/m^3 , while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 34.6 mm for the year 2100 including cement content equal to 250 kg/m^3 , as shown in Fig. 3(c).

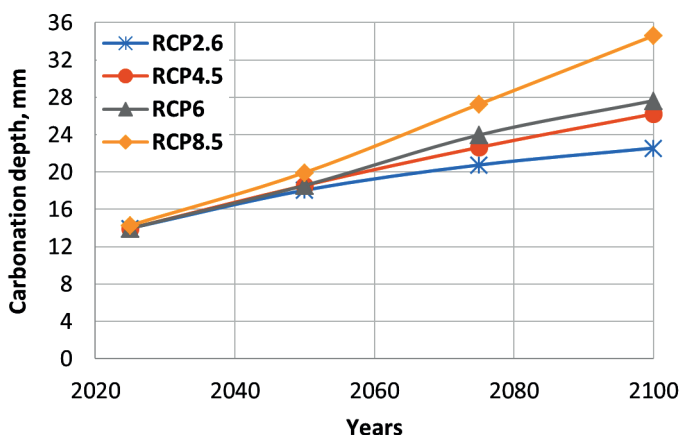
Additionally, the carbonation depth for the RCP 2.6 scenario including cement content equal to 250 kg/m^3 has been increased by 26.5% compared to the carbonation depth for the RCP 2.6 scenario including cement content equal to 400 kg/m^3 at different years. Moreover, the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 250 kg/m^3 has been increased by 26.5%, compared to the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 400 kg/m^3 at different years. Finally, as the cement content increases in the concrete mix, this means fewer capillary pores can be produced inside the



(a) Cement content / Zawartość cementu = 400 Kg/m³



(b) Cement content / Zawartość cementu = 350 Kg/m³



(c) Cement content / Zawartość cementu = 250 Kg/m³

Rys. 3. Głębokość karbonatyzacji dla różnych zawartości cementu przy różnych RCPs dla $w/c = 0,55$

Fig. 3. Projection of carbonation depth at different RCPs [different cement contents and $w/c = 0.55$] using Yoon's equation

400 kg/m³, natomiast głębokość karbonatyzacji dla RCP 8.5 wynosi 14,33 mm w roku 2100, zawartość cementu jest równa 400 kg/m³, a stosunek wodno-cementowy wynosi 0,55.

Co więcej stwierdzono, że głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 dla 250 kg/m³ cementu, zwiększyła się o 26,5% w porównaniu z zawartością cementu równą 400 kg/m³ w różnych latach. Głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5 dla 250 kg/m³ cementu zwiększyła się o 26,4% w porównaniu z zawartością cementu równą 400 kg/m³ w różnych latach.

microstructure of concrete which can lead to the reduction of the carbonation depth, as mentioned in the previous results.

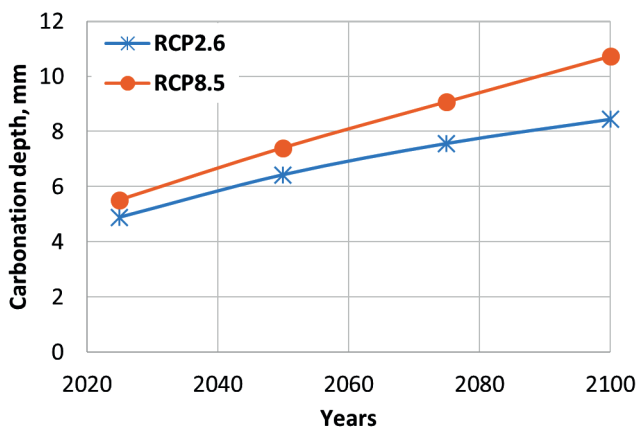
It is clear from the above investigations that as the water to cement ratio increases in the mix, the capillary pores increase, inside the microstructure of concrete. Then, it results in increasing the possibility of CO₂ attacking the concrete through its pores. Moreover, it was observed that the percentage increase in the carbonation depth would be 71.5% for both RCP 2.6 and RCP 8.5 for $w/c = 0.55$, compared to $w/c = 0.45$ for both RCP 2.6 and RCP 8.5 respectively for the year 2025. In addition, the percentage increase in the carbonation depth would be 70.3% for both RCP 2.6 and RCP 8.5 including $w/c = 0.55$ compared to $w/c = 0.45$ for both RCP 2.6 and RCP 8.5, respectively for the year 2050.

In addition, another parametric study was conducted also in this research to investigate the effect of different cement contents for concrete mixes with a water to cement ratio of 0.45 on the carbonation depth, which was calculated using Stewart's equation (22). It was concluded that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 4.89 mm for the year 2025 including cement content equal to 250 kg/m³, while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 10.72 mm for the year 2100 at which cement content is equal to 250 kg/m³, as shown in Fig. 4(a).

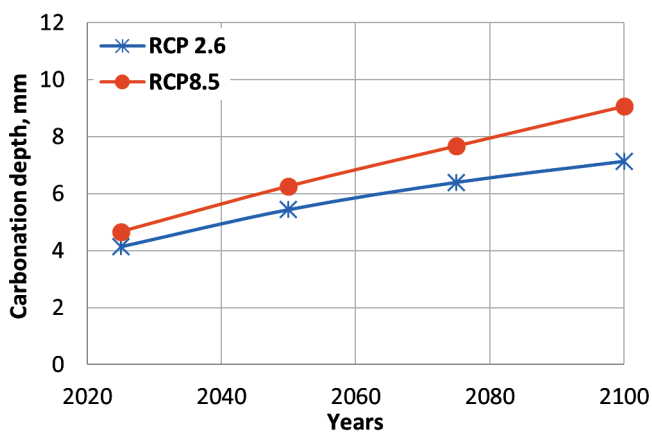
Moreover, the carbonation depth for RCP 2.6 would be 4.13 mm for the year 2025 including cement content equal to 350 kg/m³. While the carbonation depth for RCP 8.5 would be 9.06 mm for the year 2100, including cement content equal to 350 kg/m³ as shown in Fig. 4(b). Furthermore, the carbonation depth for RCP 2.6 would be 3.86 mm for the year 2025 including cement content equal to 400 kg/m³. While the carbonation depth for RCP 8.5 would be 8.48 mm, including cement content equal to 400 kg/m³ for the year 2100, as shown in Fig. 4(c).

Finally, it was observed that the carbonation depth for the RCP 2.6 scenario including cement content equal to 250 kg/m³, has been increased by 26.5% compared to the carbonation depth for RCP 2.6 including cement content equal to 400 kg/m³, at different years. In addition, the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 250 kg/m³ has been increased by 26.5% compared to the carbonation depth for the RCP 8.5 including cement content equal to 400 kg/m³ at different years.

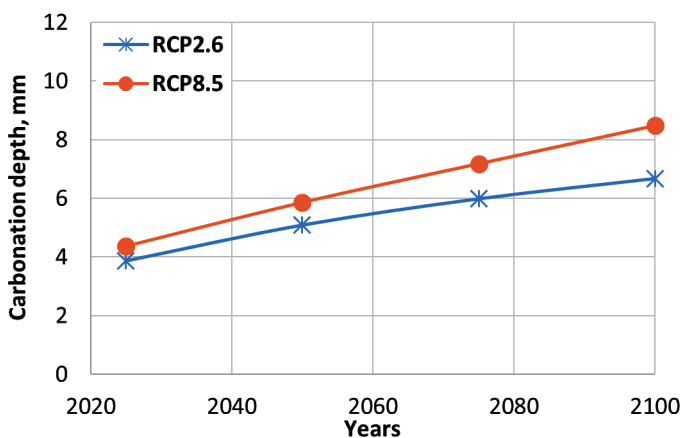
Moreover, the effect of different cement contents for concrete mixes with a water to cement ratio of 0.55 on the carbonation depth was calculated using Stewart's equation for concrete mixes (22). It was concluded that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 8.39 mm for the year 2025 including cement content equal to 250 kg/m³, while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 18.12 mm for the year 2100 including cement content equal to 250 kg/m³ as shown in Fig. 5a. Moreover, the carbonation depth for RCP 2.6 would be 7.09 mm for the year 2025 including cement content equal to 350 kg/m³, while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 15.31 mm for the year 2100, including cement content equal to 350 kg/m³ as shown in Fig. 5b.



(a) Cement content / Zawartość cementu = 250 kg/m³



(b) Cement content / Zawartość cementu = 350 kg/m³



(c) Cement content / Zawartość cementu = 400 kg/m³

Rys. 4. Głębokość karbonatyzacji dla różnych zawartości cementu przy różnych scenariuszy RCP dla w/c = 0,45 z użyciem równania Stewarta

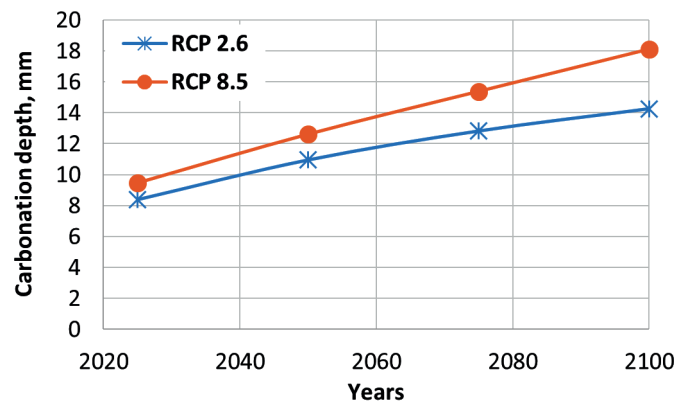
Fig. 4. Projection of carbonation depth at different RCPs [different cement contents and w/c = 0.45] using Stewart's equation

Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji między równaniami Yoona i Stewarta, obliczono zgodnie z równaniem 9.

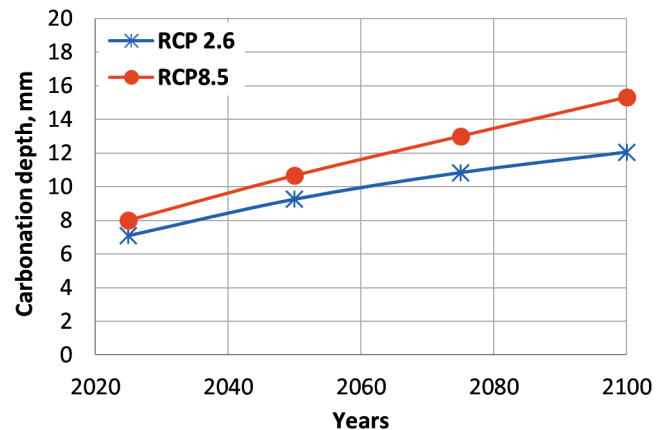
$$\% \text{ wzrostu głębokości karbonatyzacji} = \frac{CD_{\text{Yoona's}} - CD_{\text{Stewart's}}}{CD_{\text{Stewart's}}} \times 100$$

gdzie:

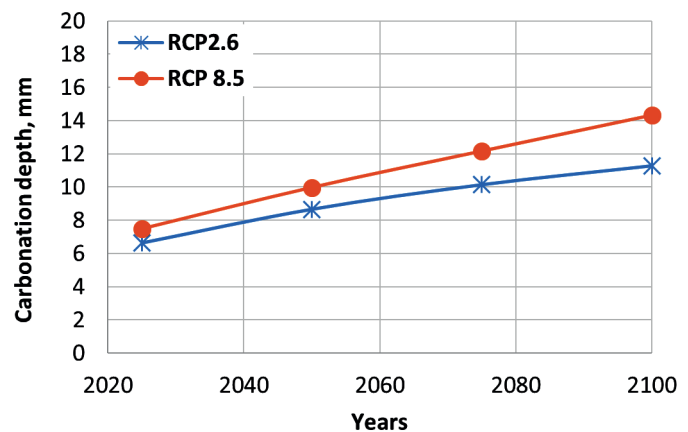
CD_{Yoona} to głębokość karbonatyzacji obliczona za pomocą równania Yoona,



(a) Cement content / Zawartość cementu = 250 kg/m³



(b) Cement content / Zawartość cementu = 350 kg/m³



(c) Cement content / Zawartość cementu = 400 kg/m³

Rys. 5. Głębokość karbonatyzacji obliczone za pomocą równania Stewarta dla różnych zawartości cementu przy różnych scenariuszy RCP dla w/c = 0,55

Fig. 5. Projection of carbonation depth at different RCPs [different cement contents and w/c = 0.55] using Stewart's equation

Furthermore, it was concluded that the carbonation depth for RCP 2.6 would be 6.63 mm for the year 2025 including cement content equal to 400 kg/m³, while the carbonation depth for RCP 8.5 would be 14.33 mm for the year 2100, including cement content equal to 400 kg/m³ as shown in Fig. 5c.

Finally, it was observed that the carbonation depth for the RCP 2.6 scenario including cement content equal to 250 kg/m³ has been increased by 26.5%, compared to the carbonation depth for the

$CD_{Stewart}$ to głębokość karbonatyzacji obliczona za pomocą równania Stewarta.

Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji dla równania Yoon, w porównaniu do równania Stewarta dla mieszanek betonowych o $w/c = 0,55$ i różnych zawartości cementu dla lat 2025 i 2100 wynosi odpowiednio 66,5% i 58,2% dla scenariusza RCP 2.6, jak pokazano w tablicy 2. Co więcej stwierdzono, że procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji dla równania Yoon w porównaniu do równania Stewarta dla mieszanek betonowych o $w/c = 0,45$ i różnych zawartości cementu dla lat 2025 i 2100 wynosi odpowiednio 66,8% i 58,3% dla RCP 2.6, jak pokazano w tablicy 2.

Wreszcie stwierdzono, że procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji dla równania Yoon w porównaniu do równania Stewarta dla mieszanek betonowych, które składają się z $w/c = 0,55$ i różnych zawartości cementu dla lat 2025 i 2100 wynosi odpowiednio 51,3% i 91,6% dla scenariusza RCP 8.5, jak pokazano w tablicy 3.

Ponadto stwierdzono, że procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji dla równania Yoon w porównaniu do równania Stewarta dla mieszanek betonowych o $w/c = 0,45$ i różnych zawartości cementu dla lat 2025 i 2100, wynosi odpowiednio 50,9% i 91,6% dla RCP 8.5, jak pokazano w tablicy 4.

Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji oblicza się również z równania 10, gdzie jest on porównywany z punktem odniesienia [linią bazową]. Ponadto, poniższe równanie zależy tylko od zmiennych klimatycznych $f_T(t)$ i koncentracji dwutlenku węgla (C_{CO_2}), jak pokazano w równaniu (9) [15].

$$P_c(t) = \left[\left(\frac{\int_{2000}^t \sqrt{f_T(t)} C_{CO_2}(t) dt}{\sqrt{f_T(t=2000)} C_{CO_2}(2000) \sqrt{t-1999}} \right) - 1 \right] \cdot 100 \quad [10]$$

Tablica 2 / Table 2

PROCENTOWY WZROST GŁĘBOKOŚCI KARBOATYZACJI DLA RÓWNANIA YOON W PORÓWNIANIU DO RÓWNANIA STEWART DLA RCP 2,6
DIFFERENCE BETWEEN YOON'S AND STEWART'S INVESTIGATION OF CARBONATION DEPTH FOR RCP 2.6

	(Yoon et al. 2007) (w/c = 0.55)			(Stewart et al. 2002) (w/c = 0.55)			% Increases in Carbonation Depth
	Głębokość karbonatyzacji / Carbonation depth, mm						
Years	400	350	250	400	350	250	
	kg/m ³			kg/m ³			
2025	11.0	11.8	14.0	6.6	7.1	8.4	66.7% _(400kg/m³) 66.2% _(350kg/m³) 66.7% _(250kg/m³)
2100	17.8	19.1	22.6	11.3	12.1	14.3	57.5% _(400kg/m³) 57.9% _(350kg/m³) 58.0% _(250kg/m³)
	(Yoon et al. 2007) (w/c = 0.45)			(Stewart et al. 2002) (w/c = 0.45)			% Increases in Carbonation Depth (mm)
	Głębokość karbonatyzacji / Carbonation depth, mm						
Years	400	350	250	400	350	250	
	kg/m ³			kg/m ³			
2025	6.4	6.9	8.1	3.9	4.1	4.9	64.1% _(400kg/m³) 68.3% _(350kg/m³) 65.3% _(250kg/m³)
2100	10.6	11.3	13.4	6.7	7.1	8.4	58.2% _(400kg/m³) 59.2% _(350kg/m³) 59.5% _(250kg/m³)

RCP 2.6 scenario including cement content equal to 400 kg/m³, at different years. In addition, the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 250 kg/m³ has been increased by 26.4% compared to the carbonation depth for the RCP 8.5 scenario including cement content equal to 400 kg/m³, at different years.

The percentage increase in carbonation depth between Yoon's and Stewart's equations is calculated as shown in equation 9.

$$\% \text{ Increase in Carbonation Depth} = \frac{CD_{Yoon's} - CD_{Stewart's}}{CD_{Stewart's}} \times 100$$

where:

$CD_{Yoon's}$ is the carbonation depth calculated using Yoon's equation;

$CD_{Stewart's}$ is the carbonation depth calculated using Stewart's equation.

Moreover, it was found that the percentage increase in carbonation depth for Yoon's equation compared to Stewart's equation for concrete mixes which consist of $w/c = 0.55$ and different cement contents for years 2025 and 2100 would be 66.7% and 58.0% respectively for RCP 2.6, as shown in Table 2. Finally, the percentage increase in the carbonation depth for Yoon's equation compared to Stewart's equation at different cement contents which includes $w/c = 0.45$ for years 2025 and 2100 would be 68.3% and 59.5% respectively for RCP 2.6, as shown in Table 2.

Moreover, the percentage increase in the carbonation depth for Yoon's equation compared to Stewart's equation for concrete mixes which consist of $w/c=0.55$ at different cement contents for years 2025 and 2100 would be 51.3% and 91.6% respectively for RCP 8.5, as shown in Table 3.

Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji dla lat 2025, 2050, 2075 i 2100 wynosi odpowiednio 32,9%, 40,4%, 48,3% i 57,6% w porównaniu z referencyjną linią bazową [rok 2000], jak pokazano na rys. 6.

4.2. Wpływ wytrzymałości na ściskanie na głębokość karbonatyzacji

Wpływ wytrzymałości na ściskanie na głębokość karbonatyzacji został w tym badaniu oceniony przy użyciu równania Silvy i in. (23), przy zawartości cementu równej 300 kg/m³. Ponadto zaobserwowano, że gdy wytrzymałość betonu na ściskanie wynosi 20 MPa, głębokość karbonatyzacji jest równa 22,17 mm i 44,24 mm odpowiednio dla roku 2025 i 2100 dla scenariusza RCP 2.6, jak pokazano na rys. 7a. Dodatkowo stwierdzono, że gdy wytrzymałość betonu na ściskanie wynosi 60 MPa, głębokość karbonatyzacji jest równa 13,77 mm i 7,44 mm odpowiednio dla roku 2025 i 2100 dla scenariusza RCP 2.6, jak pokazano na rys. 7a.

Gdy wytrzymałość betonu na ściskanie wynosi 20 MPa, głębokość karbonatyzacji jest równa 22,2 mm i 46,5 mm odpowiednio dla roku 2025 i 2100 dla scenariusza RCP 8.5, zaś gdy wytrzymałość betonu na ściskanie wynosi 60 MPa, głębokość karbonatyzacji jest równa 13,80 mm i 29,6 mm odpowiednio dla roku 2025 i 2100 dla tego samego scenariusza RPC, jak pokazano na rys. 7b.

Ostatecznie uznano, że nie ma dużej różnicy między wartościami głębokości karbonatyzacji uzyskanymi dla RCP 2.6 i RCP 8.5, przy czym różnice w głębokości karbonatyzacji dla scenariusza RCP 8.5, obliczone z równania Silvy i in., są większe niż głębokość karbonatyzacji dla scenariusza RCP 2.6 o 1-2 mm. Ponadto, głębokość karbonatyzacji wzrasta o 61,2% i 57,4%, gdy wytrzymałość na ściskanie wynosi 20 MPa, w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie równą 60 MPa w roku 2100, odpowiednio dla scenariuszy RCP 2.6 i RCP 8.5.

4.3. Wpływ różnych zawartości cementu na prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją

Ogólnie rzecz biorąc, korozja będzie miała miejsce, gdy głębokość karbonatyzacji osiągnie powierzchnię pręta zbrojeniowego,

Tablica 3 / Table 3

PROCENTOWY WZROST GŁĘBOKOŚCI KARBONATYZACJI DLA RÓWNIANIA YOON W PORÓWNIANIU DO RÓWNIANIA STEWART DLA RCP 8,5 PRZY W/C=0,55 I RÓŻNEJ ZAWARTOŚCI CEMENTU
DIFFERENCE BETWEEN YOON'S AND STEWART'S ESTIMATE OF CARBONATION DEPTH FOR RCP 8.5 [C=0.55]

Years	(Yoon et al. 2007)			(Stewart et al. 2002)			% wzrostu głębokości karbonatyzacji Increases in carbonation depth, %
	Głębokość karbonatyzacji / Carbonation depth, mm						
	400	350	250	400	350	250	
	kg/m ³			kg/m ³			
2025	11.3	12.1	14.3	7.5	8.0	9.5	50.7% _(400kg/m³) 51.3% _(350kg/m³) 50.5% _(250kg/m³)
2100	27.4	29.2	34.6	14.3	15.3	18.1	91.6% _(400kg/m³) 90.8% _(350kg/m³) 91.2% _(250kg/m³)

Tablica 4 / Table 4

PROCENTOWY WZROST GŁĘBOKOŚCI KARBONATYZACJI DLA RÓWNIANIA YOON W PORÓWNIANIU DO RÓWNIANIA STEWART DLA RCP 8,5 PRZY w/c = 0,45
DIFFERENCE BETWEEN YOON'S AND STEWART'S ESTIMATE OF CARBONATION DEPTH FOR RCP 8.5 (w/c = 0.45)

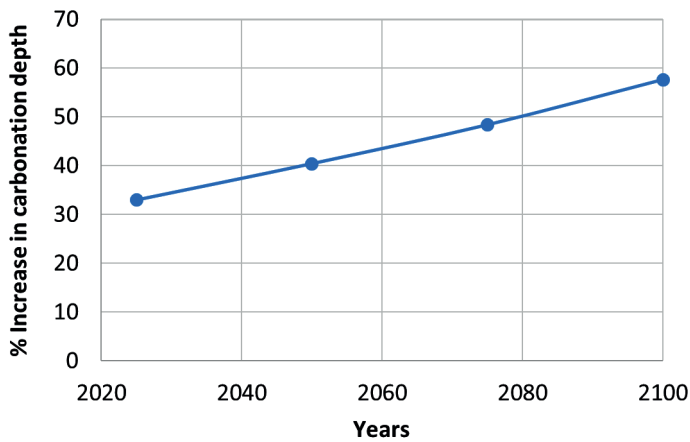
Years	(Yoon et al. 2007)			(Stewart et al. 2002)			% wzrostu głębokości karbonatyzacji Increases in carbonation depth, %
	Głębokość karbonatyzacji / Carbonation depth, mm						
	400	350	250	400	350	250	
	kg/m ³			kg/m ³			
2025	6.6	7.0	8.3	4.4	4.7	5.5	50% _(400kg/m³) 48.9% _(350kg/m³) 50.9% _(250kg/m³)
2100	16.2	17.3	20.5	8.5	9.1	10.7	90.6% _(400kg/m³) 90.1% _(350kg/m³) 91.6% _(250kg/m³)

Furthermore, the percentage increase in the carbonation depth for Yoon's equation compared to Stewart's equation at different cement contents for the years 2025 and 2100 would be 50.9% and 91.6% respectively for RCP 8.5, as shown in Table 4.

The percentage increase in the carbonation depth is also calculated from equation 10, compared to the reference baseline. In addition, equation 10 depends only on climate variables $f_t(t)$ and concentration of carbon dioxide (C_{CO_2}) (15).

$$P_c(t) = \left[\left(\frac{\int_{2000}^t \sqrt{f_T(t)} C_{CO_2}(t) dt}{\sqrt{f_T(t=2000)} C_{CO_2}(2000) (t-1999)} \right) - 1 \right] \cdot 100 \quad [10]$$

Furthermore, it was observed that the percentage increase in the carbonation depth for the years 2025, 2050, 2075, and 2100 would be 32.9%, 40.4%, 48.3%, and 57.6% respectively compared to a reference baseline [year 2000] as shown in Fig. 6.



Rys. 6. Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji

Fig. 6. Percentage increase in the carbonation depth

a skumulowane prawdopodobieństwo inicjacji korozji w czasie t jak pokazano w równaniu (10).

$$P_i(t) = \Pr [\text{Cover} - x_c(t) \leq 0] \quad [11]$$

gdzie $x_c(t)$ jest głębokością karbonatyzacji, otrzymaną z równania (8). Ponadto parametry równania głębokości karbonatyzacji (dwutlenek węgla jest zależny od czasu) mają rozkład normalny, jak pokazano w tablicy 5.

4.4. Przewidywanie prawdopodobieństwa korozji wywołanej karbonatyzacją metodą symulacji Monte Carlo

Najczęściej stosowaną metodą obliczania prawdopodobieństwa korozji na skutek karbonatyzacji jest metoda symulacji Monte Carlo (26-28). Metoda symulacji Monte Carlo [MSMC] to metoda numeryczna, która rozwiązuje problemy poprzez symulację zmiennych losowych. MSCM wymaga generatora wielu liczb losowych (27). MSCS składa się z trzech podstawowych kroków: (1) Wybór typu rozkładu dla każdej zmiennej losowej, (2) Generowanie liczb losowych na podstawie wybranego rozkładu, (3) Przeprowadzenie symulacji na podstawie wygenerowanych liczb losowych (29).

Funkcja stanu granicznego [LSF] jest oceniana dla wygenerowanych liczb losowych, tak aby każda liczba losowa odpowiadała wartości LSF. W związku z tym, zliczając liczbę punktów danych mniejszych od zera i dzieląc je przez całkowitą liczbę punktów danych, uzyskuje się oszacowanie prawdopodobieństwa korozji.

Metodę symulacji Monte Carlo użyto do oszacowania prawdopodobieństwa korozji wywołanej karbonatyzacją, biorąc pod uwagę 10000 i 20000 próbek. LSF oblicza się zgodnie z równaniem 12. Korozja może być zdefiniowana jako zdarzenie, w którym głębokość karbonatyzacji przekracza pokrywą betonu.

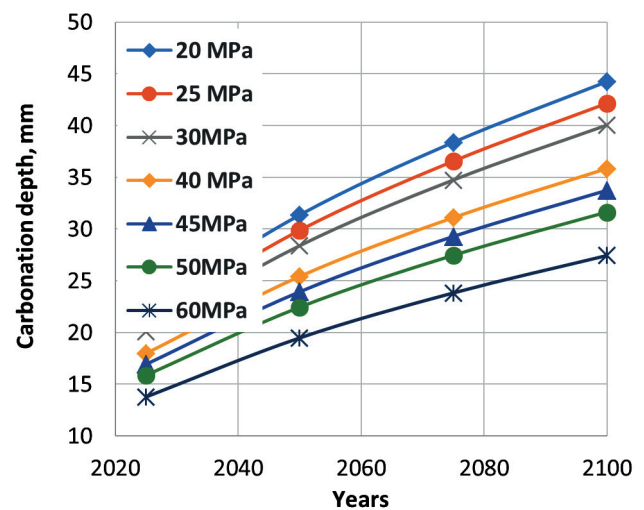
$$LSF = \text{Cover} - \sqrt{\frac{2f_T(t) \cdot D_{CO_2}(t)}{a} K_{urban} \int_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt} \left(\frac{1}{t - 1999} \right)^{n_m} \quad [12]$$

gdzie: Cover , D_1 , n_d i K_{urban} są zmiennymi losowymi, zgodnymi z rozkładem normalnym.

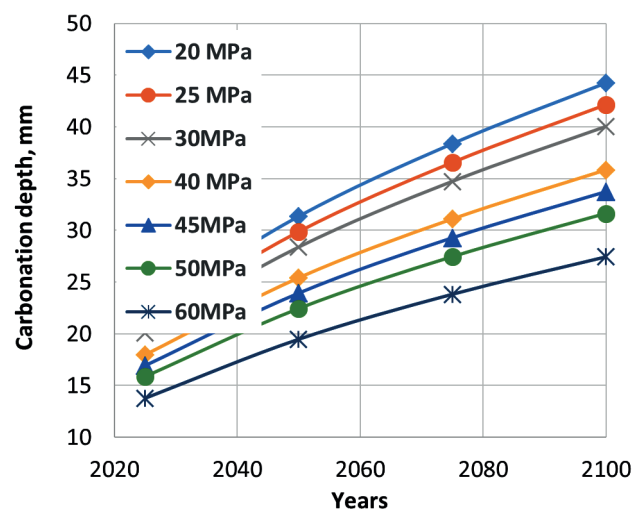
4.2. Effect of different compressive strengths on the carbonation depth

The effect of different compressive strengths on the carbonation depth was conducted in this research using Silva's equation, for cement content of 300 kg/m³ (23). It was observed that when the compressive strength for concrete is 20 MPa, the carbonation depth would be 22.17 mm and 44.24 mm for the years 2025 and 2100 respectively for RCP 2.6, as shown in Fig. 7a. In addition, it was concluded that when the compressive strength for concrete is 60 MPa, the carbonation depth would be 13.77 mm and 27.44 mm for the years 2025 and 2100 respectively for RCP 2.6 as shown in Fig. 7a.

Moreover, when the compressive strength is 20 MPa, the carbonation depth would be 22.2 mm and 46.5 mm for the years 2025 and 2100, respectively for RCP 8.5 as shown in Fig. 7b. In addition, it was concluded that when the compressive strength is 60 MPa, the carbonation depth would be 13.8 mm and 29.6 mm for the years 2025 and 2100, respectively for RCP 8.5 as shown in Fig. 7b.



(a) RCP 2.6



(b) RCP 8.5

Rys. 7. Głębokość karbonatyzacji dla różnej wytrzymałości na ściskanie przy różnych scenariuszach RCPs

Fig. 7. Carbonation depth for different compressive strengths at different RCPs

Tablica 5 / Table 5

SPECYFIKACJE PROJEKTOWE DOTYCZĄCE TRWAŁOŚCI (25), ŚREDNIA I WSPÓLCZYNNIK ZMIENNOŚCI DLA PARAMETRÓW ZWIĄZANYCH Z MODELEM KARBONATYZACJI (15).

DURABILITY DESIGN SPECIFICATIONS (25), MEAN AND COEFFICIENT OF VARIATIONS FOR THE PARAMETERS RELATED TO DETERIORATION CARBONATION MODEL (15).

Ekspozycja / Exposure	Otulina / Cover, mm	F'c, MPa	w/c	D ₁	n _d	K _{urban}
Nadmorskie [z wyłączeniem stref pływów i rozbryzgów] / Coastal [excluding tidal and splash zones]	45 Mean = C _{norm} + 6 mm / Średnia = C _{norm} + 6 mm σ = 11.5 mm	40	0.45	Mean = 0.65 σ = 0.15	Mean = 0.218 CV = 0.12	1.15 CV = 0.1

where σ: standard deviation; CV: coefficient of variation / Gdzie σ: odchylenie standardowe; CV: współczynnik zmienności

4.4.1. Sekwencja modelowania symulacji Monte Carlo

(i) Cztery zmienne losowe Cover, D₁, n_d i K_{urban} są wygenerowane dla 10000 i 20000 próbek. Wygenerowane liczby losowe dla Cover, D₁, n_d i K_{urban} są wywoływane w modelowaniu odpowiednio jako u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, u_{i4}.

(ii) Dla każdej liczby losowej u_{i1} wygenerowano odpowiednią wartość Cover, Cover_i i to samo zrobiono dla innych zmiennych losowych. W tym celu zestaw standardowych-normalnych zmiennych losowych [Zi] został najpierw wygenerowany z u_{i1} przy użyciu odwrotności skumulowanej funkcji gęstości standardowego rozkładu normalnego, jak pokazano w równaniu 13.

$$Z_i = \Phi^{-1}(u_i) \quad [13]$$

(iii) LSF obliczono przy użyciu programu Excel.

(iv) Na koniec prawdopodobieństwo LSF < 0 jest obliczane przy użyciu równania 14, gdzie n jest liczbą przypadków mniejszych od zera, a N jest całkowitą liczbą próbek.

$$P = n/N \quad [14]$$

Wywnioskowano, że prawdopodobieństwo inicjacji korozji dla karbonatyzacji przeprowadzono w tym badaniu przy użyciu symulacji Monte Carlo dla 10000 próbek i stwierdzono, że prawdopodobieństwo inicjacji korozji wynosi 0,0001 i 0,0003 dla lat 2050 i 2100, odpowiednio przy zawartości cementu 250 kg/m³ dla RCP 8.5, jak pokazano na rys. 8-a. Ponadto stwierdzono, że prawdopodobieństwo inicjacji korozji w tym badaniu za pomocą symulacji dla 10000 próbek, wynosi 0 i 0,0003 odpowiednio dla lat 2050 i 2100, jak pokazano na rys. 8a przy zawartości cementu 350 kg/m³ dla scenariusza RCP 8.5. Ponadto prawdopodobieństwo inicjacji korozji przy zawartości cementu 400 kg/m³ wynosi 0 i 0,0003 odpowiednio dla lat 2050 i 2100, jak pokazano na Rys. 8a. Ponadto stwierdzono, że prawdopodobieństwo inicjacji korozji przy użyciu symulacji dla 20000 próbek wynosi 0,0001 i 0,00015 dla lat 2050 i 2100, odpowiednio przy zawartości cementu 250 kg/m³ dla scenariusza RCP 8.5, jak pokazano na Rys. 8b. Ponadto stwierdzono, że prawdopodobieństwo inicjacji korozji przy użyciu symulacji Monte Carlo dla 20000 próbek, wynosi 0,0001 dla lat 2050 i 2100, jak pokazano na rys. 8b przy zawartości cementu równej 350 kg/m³ dla scenariusza RCP 8.5. Wreszcie stwierdzono, że prawdopodobieństwo inicjacji korozji dla karbonatyzacji przy

Finally, it was concluded that the variation of the values for the carbonation depth at different compressive strengths are insignificant for RCP 2.6 compared to RCP 8.5, the variations for carbonation depth for RCP 8.5 which is obtained by Silva's equation is higher than the carbonation depth for RCP 2.6 by 1-2 mm. Moreover, the carbonation depth has been increased by 61.2% and 57.4% when the compressive strength is 20 MPa compared to compressive strength equal to 60 MPa for the year 2100 for both RCP 2.6 and RCP 8.5, respectively.

4.3. Effect of different cement contents on the probability of carbonation-induced corrosion

Generally, the corrosion would take place when the carbonation depth reaches the surface of the reinforcing bar and the cumulative probability of corrosion initiation at the time t is shown in equation 11.

$$P_i(t) = \Pr [\text{Cover} - xc(t) \leq 0] \quad [11]$$

where xc(t) is the carbonation depth obtained from equation 6. Moreover, the parameters of the carbonation depth equation [carbon dioxide is dependent on time] follow a normal distribution function, as shown in Table 5.

4.4. Predicting the probability of carbonation-induced corrosion using the MCS method

The most common method used for calculating the probability of corrosion due to carbonation is the Monte Carlo simulation method (26, 27, 28). The Monte Carlo simulation (MCS) method is a numerical method that solves problems by simulating random variables. MCS method requires the generator of many random numbers (27). MCS has three basic steps: (1) Select the distribution type for each random variable; (2) Generate random numbers based on the selected distribution; (3) Conduct simulations based on the generated random numbers (29).

The Limit State Function (LSF) is evaluated for the generated random numbers, so that each random number corresponds to the LSF value. Therefore, by counting the number of less-than-zero data points and dividing the count by the total number of data points, an estimation of the probability of corrosion is obtained.

The Monte Carlo simulation method is used to estimate the probability of carbonation-induced corrosion by considering 10000

zawartości cementu 400 kg/m³ wynosi 0,0001 dla lat 2050 i 2100, jak pokazano na rys. 8b.

4.5. Przewidywanie prawdopodobieństwa korozji wywołanej karbonatyzacją za pomocą FORM

Metoda analizy niezawodności pierwszego rzędu [z ang. First-order reliability method – FORM] składa się z aproksymacji funkcji stanu granicznego do hiperpłaszczyzny przy użyciu aproksymacji funkcji stanu granicznego szeregiem Taylora pierwszego rzędu, w celu wyrażenia prawdopodobieństwa uszkodzenia jako funkcji wskaźnika niezawodności β . FORM jest opisywana jako przybliżona metoda półanalityczna. Tak więc przekształcenie przestrzeni zmiennych fizycznych w nową przestrzeń statystycznie niezależnych zmiennych gaussowskich U_i nazywamy zmiennymi zredukowanymi o zerowej średniej i jednostkowych odchyleniach standardowych (30). Punkt wartości średniej w przestrzeni fizycznej jest odwzorowywany na początek przestrzeni U_i , a powierzchnia korozji w przestrzeni fizycznej jest odwzorowywana na odpowiadającą jej powierzchnię (30, 31).

Prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją zostało obliczone za pomocą FORM, jak pokazano w równaniach 15 i 16.

$$Pf = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{-\beta} e^{-\frac{u_1^2}{2}} du_1 = \Phi(-\beta) \quad [15]$$

$$P_{iFORM} = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad [16]$$

Wskaźnik niezawodności Hasofer-Linda jest określany przez rozwiązanie problemu optymalizacji nieliniowej, jak pokazano w równaniu 17.

$$\beta_{HL} = \min \left(\sqrt{\sum_i u_i^2} \right); \text{ z zastrzeżeniem, że } h(U_1, U_2) < 0 \quad [17]$$

gdzie: $h(U_1, U_2)$ jest przekształconą funkcją stanu granicznego w przestrzeni standardowej (30, 31).

Prawdopodobieństwo korozji spowodowanej karbonatyzacją zostało obliczone przy użyciu analizy FORM i stwierdzono, że prawdopodobieństwo korozji spowodowanej karbonatyzacją dla zawartości cementu 250 kg/m³ jest równe 2,53·10⁻⁴ dla roku 2100, jak pokazano na rys. 9 dla RCP 8.5. Ponadto zaobserwowano, że prawdopodobieństwo korozji z powodu karbonatyzacji dla zawartości cementu 400 kg/m³ jest równe 1,16·10⁻⁴ dla roku 2100, jak pokazano na rys. 9 dla scenariusza RCP 8.5. Ostatecznie stwierdzono, że prawdopodobieństwo korozji przy inicjacji karbonatyzacji dla zawartości cementu równej 250 kg/m³ zwiększyło się o 118% w porównaniu z prawdopodobieństwem korozji przy inicjacji karbonatyzacji dla zawartości cementu równej 400 kg/m³ w 2100 r. przy uwzględnieniu.

Wskaźnik niezawodności dla prawdopodobieństwa korozji spowodowanej karbonatyzacją przy użyciu analizy FORM dla różnych zawartości cementu: 250 kg/m³, 350 kg/m³ i 400 kg/m³ jest równy 4,43 w 2000 roku. Ponadto, wskaźnik niezawodności dla prawdopodobieństwa inicjacji korozji jest równy 3,47; 3,63 i 3,68

and 20000 samples. The LSF is calculated as shown in equation 12. Corrosion can be defined as the event when the carbonation depth exceeds the cover of the concrete.

$$LSF = Cover - \sqrt{\frac{2f_T(t) \cdot D_{CO_2}(t)}{a} K_{urban} \int_{2000}^t C_{CO_2}(t) dt} \left(\frac{1}{t-1999} \right)^{n_m} \quad [12]$$

where (Cover, D_1 , n_d , and K_{urban}) are random variables following normal distribution function.

4.4.1. Sequence for modeling Monte Carlo Simulation

(i) Four random variables of 10000, and 20000 samples were generated for Cover, D_1 , n_d , and K_{urban} . The generated random numbers for (Cover, D_1 , n_d , and K_{urban}) are called in the modeling (u_{i1} , u_{i2} , u_{i3} , u_{i4}) respectively.

(ii) For each random number, u_{i1} , a corresponding value of Cover, $Cover_i$ was generated and the same was done for other random variables. For this purpose, a set of standard-normal random variables (Z_{is}) were first generated from u_{i1} using inverse for the cumulative density function of the standard normal distribution function, as shown in equation 13.

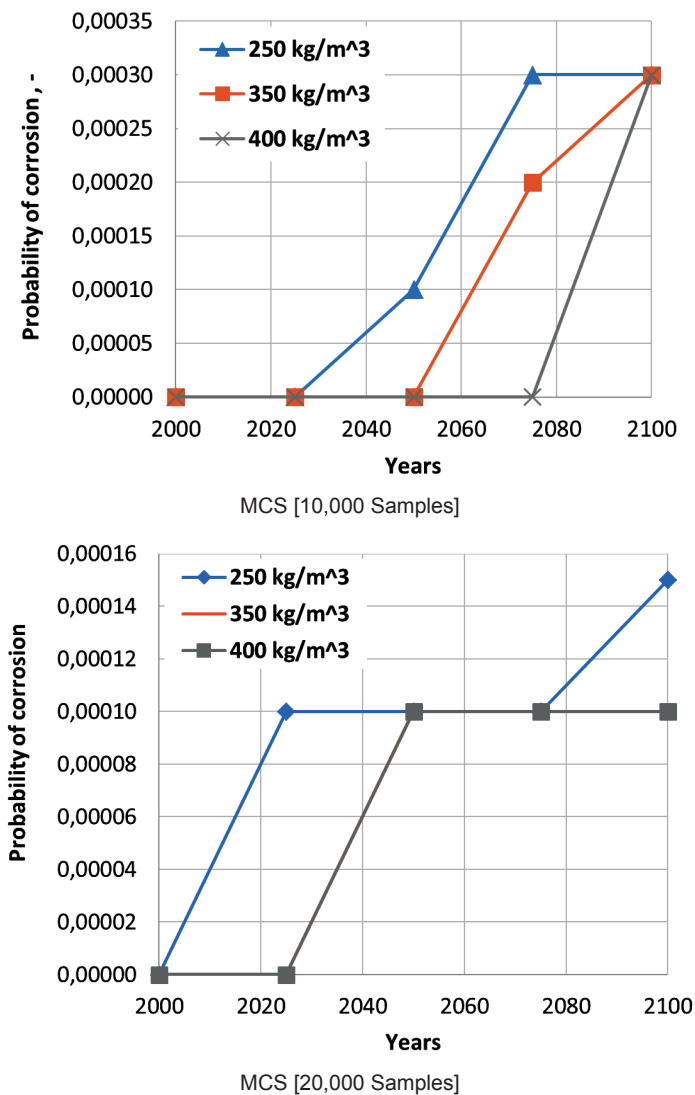
$$Z_i = \Phi^{-1}(u_i) \quad [13]$$

(iii) LSF was calculated using Excel.

Finally, the probability of $LSF < 0$ is calculated using equation 14, where n is the number of less-than-zero cases and N is the total number of samples.

$$P = n/N \quad [14]$$

The probability of carbonation-induced corrosion was conducted in this research using Monte Carlo simulation for 10,000 samples and it was observed that the probability of carbonation-induced corrosion would be 0.0001 and 0.0003 for the years 2050 and 2100 respectively including cement content equal to 250 kg/m³ for RCP 8.5 as shown in Fig. 8a. Moreover, the probability of carbonation-induced corrosion would be 0 and 0.0003 for the years 2050 and 2100 respectively including cement content equal to 350 kg/m³ for RCP 8.5 as shown in Fig. 8a. The probability of carbonation-induced corrosion including cement content equal to 400 kg/m³ would be 0 and 0.0003 for the years 2050 and 2100 respectively, as shown in Fig. 8 (a). Moreover, the probability of carbonation-induced corrosion using Monte Carlo simulation of 20.000 samples would be 0.0001 and 0.00015 for the years 2050 and 2100 respectively including cement content equal to 250 kg/m³ for RCP 8.5 as shown in Fig. 8b. In addition, the probability of carbonation-induced corrosion would be 0.0001 for the years 2050 and 2100 including cement content equal to 350 kg/m³ for RCP 8.5 as shown in Fig. 8b. The probability of carbonation-induced corrosion including cement content equal to 400 kg/m³ would be 0.0001 for both the year 2050 and the year 2100 as shown in Fig. 8b. Finally, the probability of carbonation-induced corrosion conducted using (MCS = 20000 samples) including cement content



Rys. 8. Prawdopodobieństwo korozji powodowanej karbonatyzacją wyznaczone przy użyciu symulacji Monte Carlo dla scenariusza RCP 8.5 w przyszłości przy różnej zawartości cementu

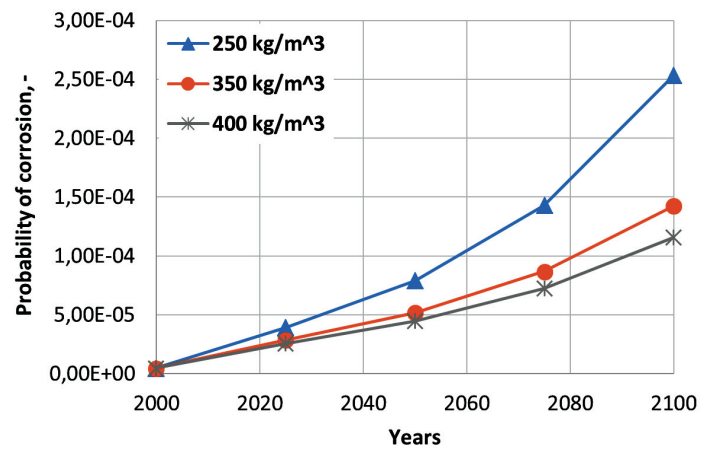
Fig. 8. Probability of carbonation-induced corrosion using MCS at different samples for RCP 8.5

dla zawartości cementu równej 250 kg/m³, 350 kg/m³ i 400 kg/m³ odpowiednio dla roku 2100, jak pokazano na rys. 10.

5. Wnioski

Karbonatyzacja betonu jest uważana za najbardziej krytyczny przypadek wpływający na płyty mostów żelbetonowych, prowadzący do korozji stalowego zbrojenia. Zmiany stężenia dwutlenku węgla w badaniach przyjęto według różnych scenariuszy emisji, takich jak RCP 2.6 [scenariusz niskiej emisji] i RCP 8.5 [scenariusz wysokiej emisji]. Przeprowadzono badania parametryczne w celu zbadania głębokości karbonatyzacji betonu przy różnych zawartościach cementu [400 kg/m³, 350 kg/m³ i 250 kg/m³] oraz przy różnych stosunkach wodno-cementowych 0,45 i 0,55, a wyniki są następujące:

- Głębokość karbonatyzacji dla scenariuszy RCP 2.6 i RCP 8.5 przy zawartości cementu równej 250 kg/m³ jest większa niż głębokości karbonatyzacji dla scenariuszy RCP 2.6 i RCP 8.5 przy 400 kg/m³ o 26,5% w różnych latach dla stosunku wody do cementu 0,45 oraz 0,55.



Rys. 9. Prawdopodobieństwo inicjacji korozji wskutek karbonatyzacji przy użyciu FORM dla RCP 8,5 dla różnej zawartości cementu

Fig. 9. Probability of carbonation-induced corrosion using FORM at different cement contents for RCP 8.5

equal to 250 kg/m³ has been increased by 50% compared to the probability of carbonation-induced corrosion including cement content equal to 400 kg/m³ for the year 2100.

4.5. Predicting the probability of carbonation-induced corrosion using FORM

First-order reliability method [FORM] consists of the approximation of the limit-state function into a hyperplane using a first-order Taylor series approximation of the limit state function to express the probability of failure as a function of the reliability index β . FORM is described as an approximate semi-analytical method. Thus, a transformation of the physical variable space into a new space of statistically independent Gaussian variables U_i is called reduced variates with zero mean and unit standard deviations (30). The mean value point in the physical space is mapped into the origin of the U_i space and the corrosion surface in the physical space is mapped onto its corresponding surface (30, 31).

The probability of carbonation-induced corrosion is also calculated in this research using the FORM as shown in equations 15 and 16.

$$P_f = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-\frac{u_1^2}{2}} du_1 = \Phi(-\beta) \quad [15]$$

$$P_{f,FORM} = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad [16]$$

The Hasofer-Lind's reliability index is determined by solving the following nonlinear optimization problem, as shown in equation 17.

$$\beta_{HL} = \min \left(\sqrt{\sum_i u_i^2} \right); \text{ subject to } h(U_1, U_2) < 0 \quad [17]$$

where $h(U_1, U_2)$ is the transformed limit state function in the standard space (30), (31).

The probability of carbonation-induced corrosion calculated using FORM including cement content of 250 kg/m³ would be $2.53 \cdot 10^{-4}$ for the year 2100 for RCP 8.5 as shown in Fig. 9. In addition, it was observed that the probability of carbonation-induced corrosion

- Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji wyniósłby 71,5% dla scenariuszy niskiej i wysokiej emisji dla $w/c = 0,55$ w porównaniu do $w/c = 0,45$ odpowiednio dla scenariuszy niskiej i wysokiej emisji w roku 2025.
- Ponadto procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji wyniósłby 70,3% dla scenariuszy niskiej i wysokiej emisji dla $w/c = 0,55$ w porównaniu do $w/c = 0,45$ odpowiednio dla scenariuszy niskiej i wysokiej emisji w roku 2050.
- Wraz ze wzrostem stosunku wody do cementu w mieszance zwiększa się udział porów kapilarnych wewnątrz mikrostruktury betonu, co prowadzi do zwiększenia głębokości karbonatyzacji.
- Procentowy wzrost głębokości karbonatyzacji przy użyciu równania Yoona w porównaniu z równaniem Stewarta dla mieszanek betonowych o różnych proporcjach wody do cementu i zawartości cementu dla lat 2025 i 2100 wynosiłby dla scenariusz RCP 2.6 68,3% i 59,5%, zaś dla scenariusza RCP 8.5 odpowiednio 51,3% i 91,6%.
- Głębokość karbonatyzacji została zwiększona o 61,22% i 57,41%, gdy wytrzymałość na ściskanie wynosi 20 MPa w porównaniu do 60 MPa w roku 2100 odpowiednio dla RCP 2.6 i RCP 8.5.

Prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją zostało przeprowadzone w niniejszych badaniach przy użyciu zarówno MCS, jak i FORM, a wyniki są następujące:

- Prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją przy różnych zawartościach cementu jest niskie.
- Prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją wyznaczonej przy użyciu metody Monte Carlo dla betonu o zawartości cementu równej 250 kg/m^3 wzrosło o 50% w porównaniu z prawdopodobieństwem korozji wywołanej karbonatyzacją z uwzględnieniem zawartości cementu równej 400 kg/m^3 , za rok 2100.
- Wreszcie prawdopodobieństwo korozji wywołanej karbonatyzacją prowadzonej przez FORM z zawartością cementu równą 250 kg/m^3 wzrosło o 118% w porównaniu z prawdopodobieństwem karbonatyzacji z zawartością cementu równą 400 kg/m^3 w roku 2100.

Podziękowania

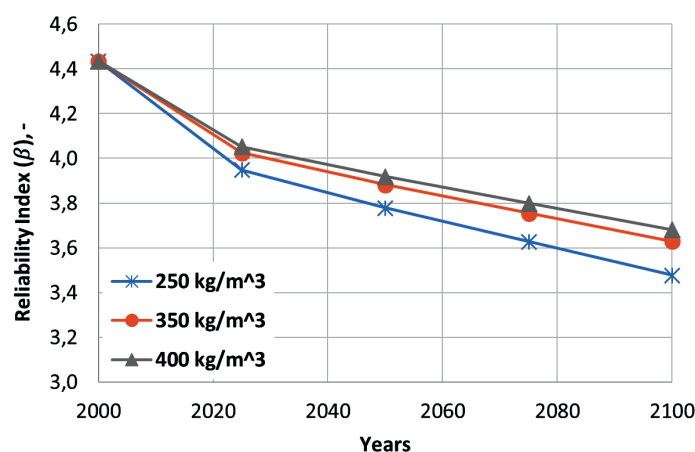
Autorzy chcieliby podziękować National Research Council Canada [NRCC] we współpracy z Uniwersytetem Ryerson, który sfinansował to i powiązane badania.

Konflikt interesów

The authors declare no conflict of interest.

Literatura / References

1. G.Verbeck, Carbonation of hydrated Portland cement, ASTM Spec. Tech. Publ. **205**, 17–36 (1958).



Rys. 10. Wskaźnik niezawodności dla scenariusza RCP 8.5

Fig. 10. Reliability indexes at different cement contents for RCP 8.5

including cement content of 400 kg/m^3 would be $1.16 \cdot 10^{-4}$ for the year 2100 for RCP 8.5 as shown in Fig. 9. Finally, the probability of carbonation-induced corrosion including cement content equal to 250 kg/m^3 has been increased by 118% compared to the probability of carbonation-induced corrosion including cement content equal to 400 kg/m^3 for the year 2100.

The reliability indexes conducted from FORM at different cement contents: 250 kg/m^3 , 350 kg/m^3 and 400 kg/m^3 were equal to 4.43 for the year 2000. In addition, the reliability indexes conducted from FORM would be 3.47, 3.63, and 3.68 for cement content equal to 250 kg/m^3 , 350 kg/m^3 and 400 kg/m^3 respectively for the year 2100, as shown in Fig. 10.

5. Conclusions

Carbonation of concrete is considered the most critical case affecting the decks for reinforced concrete bridges leading to the corrosion of the steel reinforcement. RCPs for carbon dioxide were taken for different emission scenarios such as RCP 2.6 [low emission scenario], and RCP 8.5 [high emission scenario]. A parametric study was conducted to investigate the carbonation depth of concrete, at different cement contents: 400 kg/m^3 , 350 kg/m^3 and 250 kg/m^3 , and different water-cement ratios of 0.45 and 0.55 and the results are as follows:

- Carbonation depths for both RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios consisting of cement content equal to 250 kg/m^3 are higher than the carbonation depths for both RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios including cement content equal to 400 kg/m^3 by 26.5% at different years either for 0.45 or 0.55 water to cement ratio.
- The percentage increase in the carbonation depth would be 71.5% for both low and high emission scenarios for $w/c = 0.55$ compared to $w/c = 0.45$ for both low and high emission scenarios respectively for the year 2025.
- In addition, the percentage increase in the carbonation depth would be 70.3% for both low and high emission scenarios for $w/c = 0.55$ compared to $w/c = 0.45$ for both low and high emission scenarios respectively for the year 2050.

2. F. Bouchaala, C. Payan, V. Garnier, J.P. Balayssac, Carbonation assessment in concrete by nonlinear ultrasound. *Cem. Concr. Res.* **41**, 557–559 (2011).

3. J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using the accelerated testing method. *J. Mar. Sci. Technol.* **10**, 14–20 (2002).

4. T. Bier, J. Kropp, H. Hilsdorf, Formation of silica gel during carbonation of cementitious systems containing slag cement. *Procc. 3rd Int. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway; American Concrete Institute: Farmington Hills1, MI, USA, (1989).

5. V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, M.G. Fardis, Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Mater. J.* **88** (4), 363–373 (1991).

6. A. Bentur, S. Diamond, N.S. Berke. *Steel Corrosion in Concrete*. CRC Press: London, UK, ISBN 9781482271898, 158 (1997).

7. C. Alonso, C. Andrade, J.A. Gonzalez, Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cem. Concr. Res.* **18**, 687–698 (1988).

8. D.J. Anstice, C.L. Page, M.M. Page, The pore solution phase of carbonated cement pastes. *Cem. Concr. Res.* **35**, 377–383(2005).

9. X. Wang, M.G. Stewart, M. Nguyen. Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia. *Climatic Change.* **110**, 941–957 (2012).

10. C. Jones, E. Robertson, V. Arora, P. Friedlingstein, E. Shevliakova, L. Bopp, V. Brovkin, T. Hajima, E. Kato, M. Kawamiya, S. Liddicoat, K. Lindsay, C.H. Reick, C. Roelandt, J. Segsneider, J. Tjiputra, Twenty-first-century compatible CO₂ emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 earth system models under four Representative Concentration Pathways. *J. Climate* **26**, 4398–4413 (2013).

11. G. Myhre, D. Shindell, F.M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura H. Zhang, Anthropogenic and natural radiative forcing; in *Climate Change. The Physical Science Basis (Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 659–740 (2013). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>.

12. M. Collins, R. Knutti, J. Arblaster, J.L. Dufresne, T. Fichet, S.P. Friedling, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver M. Wehner, Long-term climate change: projections. commitments and irreversibility in *Climate Change. The Physical Science Basis (Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 1029–1136 (2013).

13. D.P. van Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith, S.K. Rose, The representative concentration pathways. An overview of *Climatic Change.* **109**, 5–31 (2011).

14. I.S. Yoon, O. Copuroglu, K.B. Park, Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete. *Atmos. Environ.* **41**, 7274–7285 (2007).

15. M.G. Stewart, X. Wang, M.N. Nguyen, Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. *Eng. Struct.* **33**, 1326–1337 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.010>.

16. K. George, L.H. Ziska, J.A. Bunce, B. Quebedeaux, Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect. *Atmos. Environ.* **41**, 7654–7665 (2007).

- As the water to cement ratio increases in the mix, the amount of capillary pores increase inside the microstructure of concrete, and this lead to an increase in the carbonation depth.
- The percentage increase in the carbonation depth using Yoon’s equation compared to Stewart’s equation for concrete mixes at different water to cement ratios and cement contents for the years 2025 and 2100 would be 68.3% and 59.5% for RCP 2.6 and 51.3% and 91.6% for RCP 8.5, respectively.
- The carbonation depth has been increased by 61.2% and 57.4% when the compressive strength is 20 MPa compared to 60 MPa for the year 2100 for both RCP 2.6 and RCP 8.5, respectively.

The probability of carbonation-induced corrosion was conducted in this research using both MCS and FORM and the results are as follows:

- The probability of carbonation-induced corrosion at different cement contents is low.
- The probability of carbonation-induced corrosion conducted using (MCS) consisting of 20000 samples for cement content equal to 250 kg/m³ has been increased by 50% compared to the probability of carbonation-induced corrosion including cement content equal to 400 kg/m³ for the year 2100.
- Finally, the probability of carbonation-induced corrosion conducted by FORM including cement content equal to 250 kg/m³ has been increased by 118% compared to the probability of carbonation including cement content equal to 400 kg/m³ for the year 2100.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the National Research Council Canada (NRCC) in partnership with Ryerson University, which has funded this and related research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

17. DuraCrete. Modeling of degradation, DuraCrete—probabilistic performance-based durability design of concrete structures, EU—Brite EuRam III. Contract BRPR-CT95-0132. Project BE95-1347/R4-5. **174** (1998).
18. M.A. Sanjuan, C. del Olmo, Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. *Build. Environ.* **36**(8), 949–953 (2001).
19. F. de Larrard, Concrete mixtures proportioning a scientific approach. London: E & FN Spon, (1999).
20. M.A. Baccay, N. Otsuki, T. Nishida, S. Maruyama, Influence of cement type and temperature on the rate of corrosion of steel in concrete exposed to carbonation. *Corrosion* **62**(6), 811–821 (2006).
21. DuraCrete. Statistical quantification of the variables in the limit state functions. DuraCrete—probabilistic performance-based durability design of concrete structures, EU—Brite EuRam III. Contract BRPR-CT95-0132. Project BE95-1347/R9. 130 (2000).
22. M.G. Stewart, B. Teply, H. Kralova, The effect of temporal and spatial variability of ambient carbon dioxide concentrations on carbonation of RC structures. 9th Int. Conf. Durability of Building Materials and Components. CSIRO. 246 (2002).
23. A. Silva, R. Neves, J. de Brito, Statistical modeling of carbonation in reinforced concrete. *Cem. Concr. Comp.* **50**, 73–81 (2014).
24. B. Mizzi, Y. Wang, R. Paul Borg, Effects of climate change on structures; analysis of carbonation-induced corrosion in Reinforced Concrete Structures in Malta. FIB Conference: Sustainable Concrete: Materials and Structures. 442. (2018). DOI: 10.1088/1757-899X/442/1/012023
25. AS3600. Concrete structures, Sydney: Standards Australia, (2009).
26. I.M. Sobol, A Primer for the Monte Carlo Method, CRC Press, (1994).
27. D.P. Kroese, T. Brereton, T. Taimre, Z.I. Botev, Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, **6** (6): 386–392 (2014).
28. M.H. Kalos, P.A Whitlock. Monte Carlo Methods. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2nd ed. (2008).
29. S.K. Choi, R.V. Grandhi, R.A. Canfield, Reliability-Based Structural Design. Springer, New York, USA (2007).
30. A. Hasofer, N. Lind, Exact and invariant second-moment code format. *J. Eng. Mech. Div. ASCE (EM1)*. **21**,100-111 (1974).
31. E. Bastidas-Arteaga, A. Soubra, Reliability Analysis Methods, Michael A. Hicks; Cristina Jommi. ALERT Doctoral School 2014 - Stochastic Analysis and Inverse Modelling. 53-77 (2014).