

Zastosowanie cyfrowej analizy obrazu jako metody oceny postępu karbonatyzacji zapraw cementowych – wpływ dystorsji na wyniki badań próbek rzeczywistych oraz modelowych

Application of digital image analysis as a method of assessing the of carbonation process of cement binders – impact of distortion on the results of real and model samples

Jakub Szydłowski^{1*}

¹AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland

*Corresponding author: J. Szydłowski, e-mail: szydlows@agh.edu.pl

Streszczenie

Obecnie, ze względu na stosowanie aktywnych dodatków do cementu, badania postępu karbonatyzacji są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji. Proces pomiarowy zakłada użycie suwmiarki do wyznaczenia frontu karbonatyzacji. Tak wyznaczone wartości uśrednia się i na ich podstawie szacuje postęp korozji. Ze względu na to, że podejście normowe zakłada użycie metody nieciągłej wyznaczenia głębokości karbonatyzacji, pomiar może być obarczony błędem. Ponadto jego wykonanie, szczególnie dla wielu próbek, jest czasochłonne. Alternatywną metodą wyznaczania głębokości karbonatyzacji może być pomiar ciągły, z użyciem komputerowej analizy obrazu, który wyznacza rzeczywistą głębokość karbonatyzacji, ponieważ analizie poddawany jest cały obszar próbki. Komputerowa analiza obrazu jest zatem podejściem bardziej precyzyjnym i wygodnym. Nie jest ona natomiast podejściem ujętym w normach, jednak może stanowić pomoc w ocenie poprawności wyznaczenia głębokości karbonatyzacji. Głównym problemem proponowanej metody może okazać się błąd wynikający ze sferyczności obrazu, związany z dokładnością aparatu fotograficznego. Brak również prostopadłości układu optycznego aparatu względem próbki przy utrwalaniu jej obrazu, związanej z niewłaściwym ustawieniem aparatu fotograficznego. Problemem przy wykorzystaniu analizy komputerowej może okazać się również jakość uzyskanego obrazu. W przeprowadzonych badaniach analizowano wpływ dystorsji obrazu na wyznaczenie powierzchni analizowanego obszaru, wykorzystując program ImageJ. Uzyskane wyniki pokazują, że komputerowa analiza obrazu jest dokładniejsza niż tradycyjna, a dystorsja spowodowana pochyleniem obrazu nie wpływa na uzyskiwane wartości w stopniu większym niż dokładność pomiaru tradycyjnego.

Summary

Nowadays, because of the use of active additives in cement, studies on carbonation progress are crucial to ensure the safety of structures. Carbonation depth measurement involves the use of a calliper to determine the front of the carbonation. The values determined in this way are averaged, and the corrosion progress is estimated based on these values. Due to the fact that the standard approach assumes the use of a discrete method for determining the carbonation depth, the measurement may be subject to error, and its execution, especially for many samples, is time-consuming. An alternative method for determining the depth of carbonation may be continuous measurement, which determines the actual depth of carbonation since the entire sample area is analysed. Therefore, digital image analysis is the more precise and convenient approach. Unfortunately, it is not an approach, covered by the standards, but may help to assess the correctness of the determination, the carbonation depth. The problem with the use of digital analysis in proposed method may be the quality of the image obtained. The main problem may be the sphericity of the image, related to the nature of the camera, but also the lack of perpendicularity of the optical system of the camera to the sample when fixing its image, related to incorrect positioning by the camera operator. The results show that the digital image analysis is more accurate than the traditional approach, and that the distortion caused by the tilt of the image does not affect the obtained values to a greater degree than the measurement accuracy of the traditional approach.

Keywords: carbonation, carbonation depth measurement, cement, digital image analysis, SCM

1. Wprowadzenie

Rozważne gospodarowanie surowcami i materiałami jest kluczowe dla zrównoważonego rozwoju współczesnej gospodarki. Dlatego w procesach produkcyjnych podejmowane jest wiele działań, przyczyniających się do zmniejszenia zużycia energii potrzebnej do wytworzenia poszczególnych dóbr. W produkcji cementu powszechnego użytku stosuje się, na masową skalę składniki nieklinkierowe jako składniki główne - EN 197. W produkcji betonu nazywane są one dodatkami mineralnymi - EN 206. Na szczególną uwagę zasługują dodatki pucolanowe, które w reakcji z wodorotlenkiem wapnia, powstałym podczas hydratacji krzemianów wapnia pochodzących z klinkieru, tworzą dodatkowe ilości fazy C-S-H oraz uwodnionych glinianów wapnia (1,2). To niewątpliwie proekologiczne działanie pociąga za sobą zmniejszoną odporność na karbonatyzację faz wykonanych z omawianych spoiw.

Kolejnym podejmowanym działaniem, zmniejszającym zapotrzebowanie materiałowe, a tym samym obciążenie środowiska, jest racjonalizacja konstrukcji. Obliczenia architektoniczne koncentrują się na zmniejszeniu zapotrzebowania materiałowego. Pociąga to za sobą zmniejszenie poszczególnych faz, zwłaszcza, najbardziej narażonych na destrukcję, tworzących ściany nośne. Równoczesne zmniejszanie przekroju konstrukcji wraz ze zmniejszaniem udziału klinkieru portlandzkiego w spoiwie sprawia, że problem karbonatyzacji faz w materiale konstrukcji staje się szczególnie aktualny.

Karbonatyzacja jest procesem naturalnym, zachodzącym wewnątrz matrycy cementowej, pod wpływem znajdującego się w atmosferze CO₂ (3). Proces wnikania gazu do matrycy odbywa się drogą dyfuzji. Następnie gaz rozpuszcza się w fazie ciekłej zaczynu i zachodzi reakcja z jonami wapniowymi, prowadząca do powstania CaCO₃. Po lokalnym wyczerpaniu się jonów wapniowych pochodzących z wodorotlenku wapnia, reakcja przebiega z udziałem wapnia pochodzącego z rozpuszczania fazy C-S-H (4-6). Karbonatyzacja jest coraz większym zagrożeniem, ze względu na zwiększanie się udziału CO₂ w atmosferze (7-10). Tym większego znaczenia nabierają badania nad szybkością procesu karbonatyzacji, zwłaszcza w odniesieniu do cementów niskoemisyjnych. Obecnie oceny stopnia karbonatyzacji dokonuje się na podstawie normy EN 12390-12:2020 (11), pokrywając badaną powierzchnię roztworem fenoloftaleiny bądź w przypadku odejścia od tej normy, innym wskaźnikiem. Głębokość frontu karbonatyzacji określa się przy pomocy suwmiarki z dokładnością do 0,5 mm.

Zaczyny z dodatkami pucolanowymi, ze względu na mniejszą zawartość wodorotlenku wapnia, często wapnia w ogólności, posiadają przeważnie, mimo zwiększenia szczelności mikrostruktury, mniejszą odporność na karbonatyzację (12). Czynnikiem, wpływającym na szybkość karbonatyzacji, jest pojemność buforowa CO₂ (13), która dla kompozytów wykonanych ze spoiw z udziałem

1. Introduction

The prudent management of raw materials has been crucial for the sustainable development of the modern economy. This is why many measures have been taken in the production processes that contribute to reducing the energy consumption needed to produce individual goods. In the production of general-purpose cement, non-clinker components are used on a mass scale as the main components according to EN 197. In the production of concrete called mineral additions according to EN 206. Particular attention should be paid to the pozzolanic additives, which react with calcium hydroxide produced during the hydration of calcium silicates derived from clinker, to form additional amounts of the C-S-H phase and hydrated calcium aluminates (1,2). This undoubtedly pro-ecological action entails a reduced resistance to carbonation of phases made of these binders. Another measure taken to reduce the material demand and thus the burden on the environment is the rationalisation of the structure. Architectural calculations focus on reducing material demand. This entails the reduction of individual phases, especially, the most sensitive to destruction, load-bearing walls. Simultaneously reducing the matrix of the structure along with reducing the proportion of Portland clinker in the binder, the elements have a limited safe carbonation zone, which does not affect safety.

Carbonation is a process that takes place inside the cement matrix under the influence of atmospheric CO₂ (3). The process of gas entering the matrix takes place by diffusion. The gas is then dissolved in the liquid phase of the slurry and reacts with calcium ions to form CaCO₃. After local exhaustion of calcium ions from calcium hydroxide, the reaction is processed with calcium from the dissolution of the C-S-H phase (4-6). Carbonation is a growing threat due to the increasing share of CO₂ in the atmosphere (7-10). This makes it even more important to study the rate of the process, especially in relation to low-emission carbon cements. Currently, the degree of carbonation is assessed based on EN 12390-12:2020 (11) by wetting the test area with a phenolphthalein solution or, in case of deviation from the standard approach, another indicator. The depth of the carbonation front is then determined with a calliper with an accuracy of 0.5 mm.

Due to the lower content of calcium hydroxide and calcium in general, pastes with pozzolanic supplementary cementitious materials [SCMs] generally have, despite the increased tightness of the microstructure, lower carbonation resistance (12). An important factor that influences the rate of carbonation is the CO₂ buffer capacity (13), which, in binders made with SCMs, is generally lower than in the analogous binders made without SCMs (14-16).

The assessment of the degree of carbonation, as mentioned earlier, is the subject of EN 12390-12:2020 (11). According to the standard, the depth of carbonation is measured in 12 points, 3 on each of the

dodatków mineralnych, jest przeważnie mniejsza niż w analogicznych kompozytach wykonanych z cementu portlandzkiego (14-16).

Ocena stopnia karbonatyzacji, jak wspomniano wcześniej, jest przedmiotem normy EN 12390-12:2020 (11). Zgodnie z normą, głębokość karbonatyzacji mierzona jest w 12 punktach po 3 na każdym z czterech boków przełamu. Możliwe są również inne niż normowe podejścia, np. pomiar na dwóch krawędziach, w przypadku, gdy dwie ściany próbki są zabezpieczone przez wnikiem dwutlenku węgla i penetracja próbki przez dwutlenek węgla odbywa się z dwóch przeciwległych stron. W każdym przypadku pomiar jest nieciągły oraz obarczony błędem zaokrągleń, a sam pomiar narażony jest na implikację błędów, np. błędne dobranie punktów pomiarowych. Jednym ze sposobów zmniejszenia niedokładności może być analiza całego obszaru próbki, co przekłada się na zapewnienie ciągłości pomiarowej. Taką analizę można wykonać przy pomocy komputerowej analizy obrazu [KAO]. Podejście takie, mimo iż nie jest przewidziane przez normę EN 1230-12:2020 (11), znalazło zastosowanie w innych obszarach badawczych, m. in. przy spisie biomasy (17,18), czy szacowaniu masy bezkręgowców (19). KAO w opisywanym przykładzie pozwoliła na zwiększenie dokładności pomiarowej analizowanej powierzchni a ponadto na określenie ilościowe zawartości betonu, zamiast, jak przed zastosowaniem KAO, półilościowego (20-22). Dlatego określenie wielkości powierzchni, która uległa procesowi karbonatyzacji pod wpływem KAO, wydaje się atrakcyjną metodą badawczą. Niestety, dystorsje obrazu mogą powodować utrudnienia w prawidłowej ocenie głębokości karbonatyzacji, co wpływać może na uzyskiwane wyniki. Dystorsja jest to jedna z wad układu optycznego, objawiająca się zniekształceniami geometrycznymi obrazu. Jej występowanie jest szczególnie szkodliwe w geodezyjnych obiektach fotograficznych i fotogrametrii; zapobieganie dystorsji jest ograniczane do stosowania układów optycznych [układy ortoskopowe] (23). Potrzeba uogólnienia metody i wyznaczenia parametrów brzegowych KAO, była poruszana również w Foster i in. (24,25), co w przypadku zastosowania KAO w innych obszarach badawczych, było ważne do wprowadzenia tej metody, jako równoległej z tradycyjnym pomiarem.

W niniejszej pracy podjęto próbę odpowiedzi na pytanie jak dystorsja obrazu, spowodowana względną zmianą kąta pochylenia próbki względem aparatu oraz modyfikacją centryczności umieszczenia próbki, wpływa na uzyskiwane wyniki analizy oznaczonej powierzchni. Badania przeprowadzono na przykładach modelowych, gdzie powierzchnia badana, jak i ta, która nie uległa karbonatyzacji symulowana była przy pomocy obrazów kwadratów, które zostały wydrukowane, jak również na próbkach rzeczywistych, czyli przełamach belek z zapraw cementowych. Badania wykazały, że metoda cyfrowej analizy obrazu jest bardziej skuteczna, niż tradycyjny pomiar z użyciem suwmiarki.

2. Materiały i metody

Do wyznaczania badanych powierzchni metodą KAO posłużono się programem ImageJ, który należy do oprogramowania „Open Source”. Program ten umożliwia automatyczny pomiar zaznaczonej

four sides of the fracture. Other non-standard approaches are also possible, e.g. measurement on two sides, in the case when two walls of the sample are protected against the penetration of carbon dioxide and the penetration of the sample by carbon dioxide takes place from two opposite sides. In any case, the measurement is discrete and subjected to rounding errors, and the measurement itself is subject to the implication of errors, e. g. incorrect selection of measuring points. One way to reduce inaccuracies may be to analyse the entire sample area, which translates into ensuring measurement continuity. This analysis can be performed using Digital Image Analysis - DIA. This approach, although not foreseen by EN 1230-12:2020 (11), has been applied in other research areas such as marine benthos inventory (17,18) or invertebrate mass estimation (19). In the example described, the DIA made it possible to improve the measurement accuracy of the analysed area and also to quantify the marine concrete content instead of the semiquantitative content as before the DIA (20-22). Therefore, the determination of the size of the area that has undergone the carbonation process with the use of DIA seems to be an attractive research method. Unfortunately, image distortions may make it difficult to correctly assess the depth of carbonation, which can translate into results. Distortion is one of the defects of the optical system, manifested by geometric distortions of the image. Its occurrence is particularly harmful in photographic survey lenses and photogrammetry. The prevention of distortion is limited by the use of optical systems [orthoscopic systems] (23). The need to generalise the method and to determine the boundary parameters of the DIA was also addressed in (24,25), which, in the case of the application of the DIA in other research areas, was crucial for the introduction of the method as an equal with traditional measurement.

In this paper, efforts were made to answer the question of how image distortion, caused by the relative change of the inclination angle of the sample with respect to the camera and modification of the centricity of the sample placement, affects the obtained results of the analysis of the measured surface. The research was carried out on model examples, in which the surface to be tested and that which was noncarbonated were simulated using images of squares, which were printed, as well as on real samples, this is on cement mortar fractures. Studies have shown that digital image analysis is more effective than traditional calliper measurement.

2. Experimental

For the DIA method, ImageJ software was used, which belongs to Open Source software. This programme enables automatic measurement of the selected area, showing the results of the area [e.g., as the number of pixels] occupied by the analysed area. When the ratios of the determined areas, that is, the non-carbonated area of the real or simulated samples were compared to the area of the whole sample, it was possible to calculate the carbonation depth. The study of the relationship of both surfaces also made it possible to determine the dependence of the change in the determined surface on the angle of inclination and the location of the tested surfaces. The view of the programme is shown in Fig.

powierzchni, przedstawiając wyniki powierzchni [m.in. w ilości pikseli] zajmowanej przez analizowany obszar. Porównując stosunki wyznaczonych powierzchni, to jest powierzchni, która nie uległa karbonatyzacji lub symulowała tę powierzchnię [obszar zabarwiony] do obszaru całej próbki, możliwe było obliczenie głębokości karbonatyzacji. Badanie stosunków obu powierzchni umożliwiło również określenie zależności zmiany wyznaczonej powierzchni od kąta nachylenia i położenia badanych powierzchni. Widok programu przedstawiono na rys. 1. Program, w podstawowej jego konfiguracji, wyświetla 3 okna, oznaczone numerami 1-3: z paskiem zadań – okno nr 1, z analizowanym obrazem – okno nr 2 oraz z wynikami – okno nr 3. Przy pomocy okna nr 1A możliwe jest dokonanie zaznaczenia obszaru w zależności od jego regularności, od kształtu regularnego [kwadratu, elipsy] po obszar niejednorodny [np. powierzchnia próbki, która uległa karbonatyzacji], przykładowe zaznaczenie powierzchni pokazano w obszarze 3C. Okno 1B służy do ustawiania zdjęcia w polu 3 do analizy. Zbliżenia obszaru analizowanego można dokonać z menu lub używając skrótu „ctrl +”, natomiast klawisz „m” służy do pomiaru powierzchni [lub innych analizowanych wartości], które wyświetlają się w polu nr 2. Warto zaznaczyć, że możliwości programu są szersze, a zastosowanie tego programu wykracza poza używany w tym artykule.

Do wykonania zdjęć posłużył aparat zintegrowany ze smartfonem Xiaomi RedmiNote 10 Pro, o rozdzielczości aparatu głównego, ultra szerokokątnego, makro oraz czujności głębi odpowiednio: 108, 8, 2,2 i 2,4 Mpix. Aparat umieszczony był na wypoziomowanym i obciążonym statywie. Obrazy nie były retuszowane. Wyzwolenie migawki aparatu następowało zdalnie, co zapewniało stateczność urządzenia.

Badania, przedstawione w artykule, przeprowadzono w trzech niezależnych od siebie kierunkach:

1. Wyznaczenia błędu dystorsyjnego, popełnianego poprzez KAO dla próbek wyidealizowanych, pochylonych względem aparatu oraz w zmiennej centryczności obszaru wyznaczenia.
2. Wyznaczenia wpływu powierzchni zajmowanej przez oznaczany obszar na błąd wyznaczenia jego powierzchni w warunkach najbardziej narażonych na dystorsję.
3. Wyznaczenia korelacji wyników KAO oraz pomiarów tradycyjnych [T - przy pomocy suwmiarki], na przykładzie głębokości karbonatyzacji próbek rzeczywistych.

Wszystkie pomiary wykonywano na specjalnie przygotowanych stanowiskach badawczych. Powierzchnia, na której umieszczano próbkę posiadała jednolite tło i była każdorazowo oświetlona bezcieniowo. Dla badań ujętych w punktach 1 i 2 stanowisko miało możliwość regulacji położenia fotografowanej powierzchni, aby uzyskiwać pożądane pochylecia względem aparatu. Regulacja nachylenia odbywała się ręcznie, a kąty wyznaczane były z prostych zależności trygonometrycznych. Prawidłowość pochylecia sprawdzano każdorazowo mierząc niezbędne odległości z dokładnością do 10 mm. Do badań stosowano pochylecia od 0 do 60° z krokiem co 15°. Odległość aparatu od środkowej części powierzchni do zdjęć wynosiła 520 mm ±10 mm, jak to pokazano na rys. 2.

1. The programme, in its basic view, displays 3 windows, marked with numbers 1-3: with taskbar – window 1, with analysed image – window 2 and with results – window 3. Using window no. 1A, it is possible to select an area depending on its regularity, from a regular shape [square, ellipse] to a heterogeneous area [e.g. carbonated sample surface]. An example of a surface selection is shown in area 3C. Window 1B serves to set the image in field 3 for analysis. Zooming in on the analysed area can be done from the menu or using the “ctrl +” shortcut, while the “m” key is used to measure the area [or other analysed values], which are displayed in field 2. It is worth noting that the capabilities of the programme are wider, and the application of this programme goes beyond the one used in this paper.

The photos were taken with the camera integrated with the Xiaomi RedmiNote 10 Pro smartphone, with the resolution of the main camera, ultra wide-angle, macro and depth sensitivity respectively: 108, 8, 2.2 and 2.4 Mpix. The camera was placed on a levelled and weighed down tripod. The images were not retouched. The camera shutter was triggered remotely, which ensured the stability of the device.

The research presented in the article was carried out in three independent directions:

1. Determination of distortion error, made by DIA for idealized samples, inclined with respect to the apparatus and in the variable centricity of the area of determination.
2. Determination of the influence of the area occupied by the stained area on the error of determining its area in conditions most exposed to distortion..
3. Determination of the correlation of KAO results and traditional measurements [T - using callipers], on the example of carbonation depth of real samples.

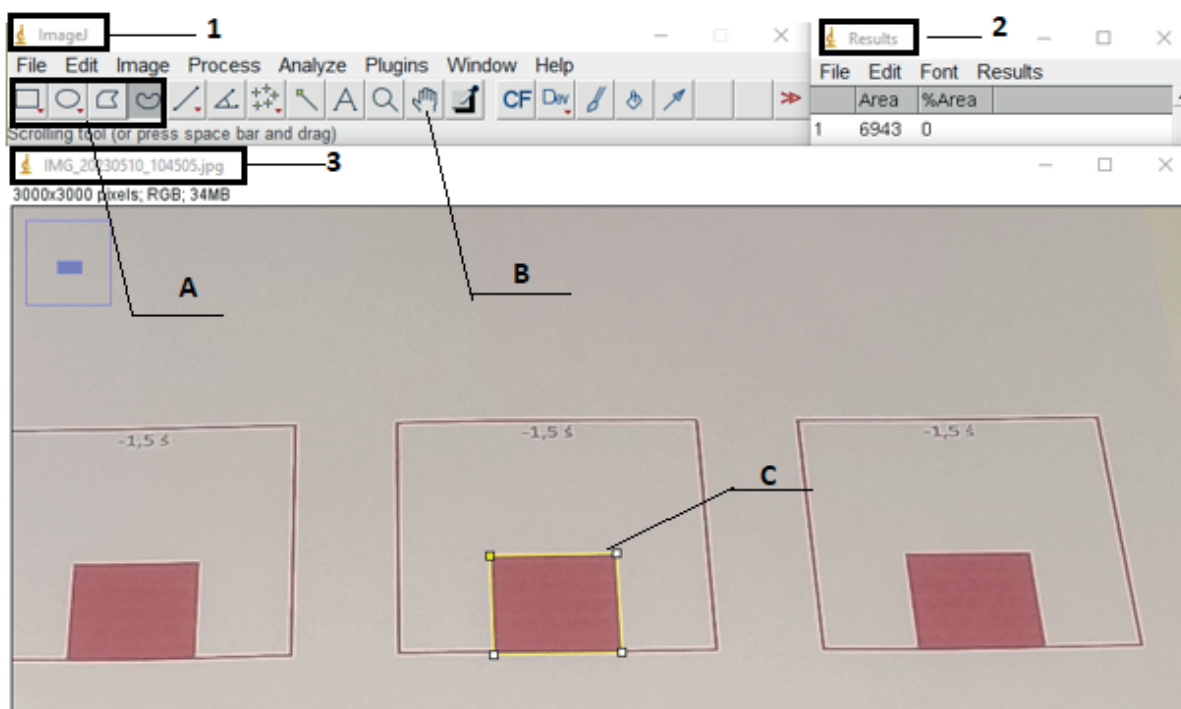
All measurements were carried out on specially prepared test stands. The surface on which the sample was placed had a uniform background and was always illuminated without shadow. For the tests in points 1 and 2, the test stand had the ability to adjust the position of the photographed surface to obtain the desired inclination relative to the camera. The tilt adjustment was done manually, and the angles were determined from simple trigonometric dependencies. The correctness of the inclination was checked each time by measuring the necessary distances with an accuracy of up to 10 mm. For the tests, inclinations of 0 ° to 60 ° were used with steps of 15 °. The distance of the camera from the central of the image area was 520 mm ±10mm, as shown in Fig. 2.

In the first stage, idealised images, generated in a computer programme, were used to ensure the constancy of certain dimensions. A square with a side of 50.00 mm was used for the tests, on which a red square [hereafter referred to as “red”] with a side of 20.00 mm was printed centrally [along the symmetry axis]. The ratio of the area of the red square to the total area of the sample [hereafter referred to as ‘white’] was constant during this phase of the test and was 16.00 % ±0.02% [the uncertainty was determined by measuring the corresponding printed objects with a calliper].

W pierwszym etapie użyto wyidealizowanych obrazów, generowanych w programie komputerowym, zapewniającym stałość określonych wymiarów. Do badań zastosowano kwadrat o boku 50,00 mm, na którym naniesiono centrycznie [wzdłuż osi symetrii] kwadrat w kolorze czerwieni, zwany dalej „czerwony”, o boku 20,00 mm. Stosunek powierzchni kwadratu czerwonego do całej powierzchni próbki [zwany dalej „białym”] był stały podczas tego etapu badań i wynosił $16,00\% \pm 0,02\%$. Niepewność została wyznaczona na podstawie pomiarów zadrukowanych arkuszy, mierząc wymiary rzeczywiste wydrukowanych obiektów suwmiarką. Aby wyznaczyć zależność nachylenia i położenia kwadratu czerwonego względem białego od wyznaczanej za pomocą KAO powierzchni zastosowano 5 kątów nachylenia oraz zmieniano położenie kwadratu czerwonego względem środkowej osi symetrii kwadratu białego przesuwać go o 5,00, 10,00 i 15,00 mm w obu kierunkach, co oznaczono symbolami: „+” dla przesunięcia w górę każdego kwadratu białego, „-” ku dołowi każdego kwadratu białego, „0,5;1,0;1,5” dla przesunięcia odpowiednio 5; 10; 15 [mm] wzdłuż osi symetrii. Sposób przygotowania próbek przedstawiono na rys. 3. Celem zwiększenia istotności uzyskanych wyników i zakresu ich stosowności, dla każdego położenia i nachylenia analizowano po trzy rzędy kwadratów w różnych obszarach powierzchni przeznaczonych do umieszczania zdjęć, co zaznaczono jako „dół/środek/góra” [zastosowano skróty t/m/d]. Położenie poszczególnych próbek przedstawia rys. 3., a wszystkie właściwości analizowanych obrazów zestawione są w tabelicy 1. Zastosowano również w każdym obszarze po trzy próbki, co podnosiło wartość statystyczną, a także eliminowało dystorsję poziomą wykonywanych analiz. Każdy przedstawiony wynik jest średnią trzech powierzchni próbek w jednym poziomie. Dla przykładu, oznaczenie 15/-1,5/góra oznacza, że analizie podlegały próbki umieszczone na fotografii wykonanej pod nachyleniem

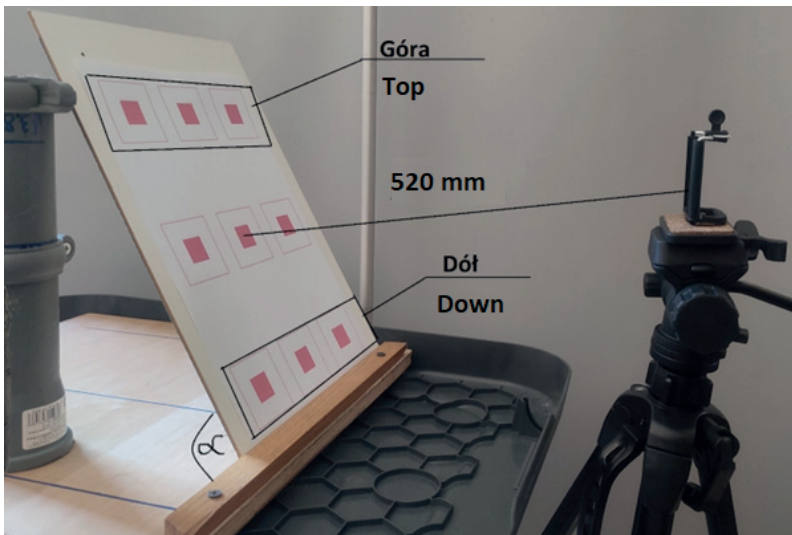
To determine the dependence of the inclination and position of the red square against the white square on the surface determined by DIA, five angles of inclination were used. The position of the red square relative to the central axis of symmetry of the white square was also changed by moving it by 5.00 mm, 10.00 mm and 15.00 mm in both directions, which is marked with the symbols: “+” for moving up each white square, “-” for moving each white square downward as “0.5; 1.0; 1.5” for removals, respectively, 5; 10; 15 [mm] along the axis of symmetry. The method of samples preparation is shown in Fig. 3. To obtain each of the measurement results, in order to increase the significance of the tests and the scope of its applicability, three rows of squares were used for each position and inclination in different areas of the surface intended for placing photos, which was marked as “bottom/middle/top” [abbreviations t/m/d]. The location of individual samples is shown in Fig. 3, and all the properties of the analysed images are listed in Table 1. Three samples were also used in each area, which increased the statistical value and eliminated the horizontal distortion in the analyses performed. Each result shown is the average of three sample areas at one level. For example, the designation 15/-1.5/top means that samples placed in a photograph taken at an inclination of 15° to the camera were analysed, the horizontal axis of symmetry of the red square was 15 mm down from the horizontal axis of symmetry of the white square, and the row of 3 samples from which the average ratio of the area of the red to white square was taken was located in the upper part of the test sheet.

In the second stage of the investigation, variable ratios of red squares to white squares were used. Each time, the red squares were placed in the same position and angle, respectively, $+1.5$ and 60° . These are the conditions in which the exposure to distortion is greatest. At this stage, for the samples in the upper row [marked



Rys. 1 Widok z programu ImageJ.

Fig. 1. View from the ImageJ Source.



Rys. 2. Stanowisko badawcze wraz z najważniejszymi parametrami i oznaczeniami.

Fig. 2. Test stand with the most important parameters and markings.

Tablica 1 / Table 1

ZESTAWIENIE ZMIENNYCH BADANYCH W ETAPIE 1.

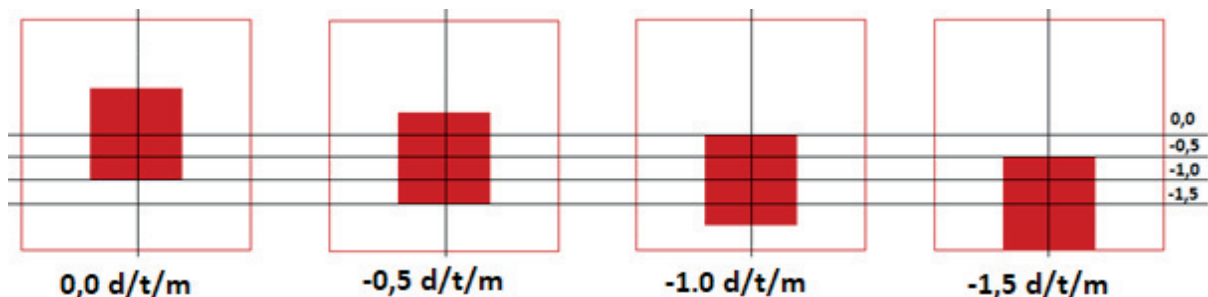
LIST OF VARIABLES TESTED IN STAGE 1.

	Kąt pochylenia α Angle of inclination α , °	Centryczność Centricity, cm	Położenie* Orientation*
Wartości Values	0; 15; 30; 45; 60	-1.5; -1.0; -0.5; 0.0; +0.5; +1.0; +1.5	górze/top [t]; środek middle [m]; dół/down [d]

*Średnia z trzech obrazów; z lewej, na środku i z prawej strony względem aparatu / Average of three images; left, centre and right of the camera

15° względem aparatu, pozioma oś symetrii kwadratu czerwonego znajdowała w przesunięciu 15 mm w dół od poziomej osi symetrii kwadratu białego, a rząd 3 próbek z których wyciągnięto średni stosunek powierzchni kwadratu czerwonego do białego znajdował się w górnej części podłoża do badań.

W drugim etapie badań stosowano zmienne stosunki powierzchni czerwonych kwadratów do białych. Zawsze kwadraty czerwone umieszczane były w tym samym położeniu i kącie, odpowiednio +1,5 i kącie nachylenia 60°. Są to warunki, w których narażenie



Rys. 3. Zasada oznaczeń próbek do badań. Opis próbki „-1,0 m” wskazuje na przesunięcie wzdłuż pionowej osi symetrii kwadratu białego oraz na położenie względem podłoża powierzchni do badań. Symbole liczbowe odpowiadają przesunięciu poziomej osi symetrii kwadratu czerwonego względem poziomej osi symetrii kwadratu białego, zwaną dalej centrycznością.

Fig. 3. Principle of denotation of test samples. The description of the sample “-1.0 m” indicates a shift along the vertical symmetry axis of the white square and the location of the test surface relative to the ground. The numerical symbols correspond to the shift of the horizontal axis of symmetry of the red square relative to the horizontal axis of symmetry of the white square, hereinafter referred to as centricity.

as ‘t’. Three samples were used to increase the statistical value of the results. The ratios of the red to white square area were: 4.00; 7.62; 16.00; 29.52; 48.00; 64.00%.

The tests in part 3 were carried out directly on mortar samples subjected to accelerated carbonation in the carbonation chamber. Samples of 3 series of Portland cement mortars were used and marked as A, B and C, 4 samples each. The cement:standard sand ratio was equal to 1:3. Four different water/cement ratios were used: 0.45; 0.50; 0.55 and 0.60. After fracture, the samples were covered with a 1% phenolphthalein solution. At this stage of the research, the more detailed composition of the mortar, water maturation time, and carbonation time are not important, because the purpose of this stage was to compare the results obtained for the same series of samples using different methods: digital image analysis [DIA] and traditional measurement using calliper [T]. The surface areas that did not undergo the carbonation process were examined by traditionally marking them with callipers and the proposed method of digital image analysis [DIA]. Measurements were made while maintaining the centricity of placing the sample in relation to the camera, placed on a tripod, at an angle of 0°.

3. Results

The relative error value B in % of the determined red square values was calculated as follows:

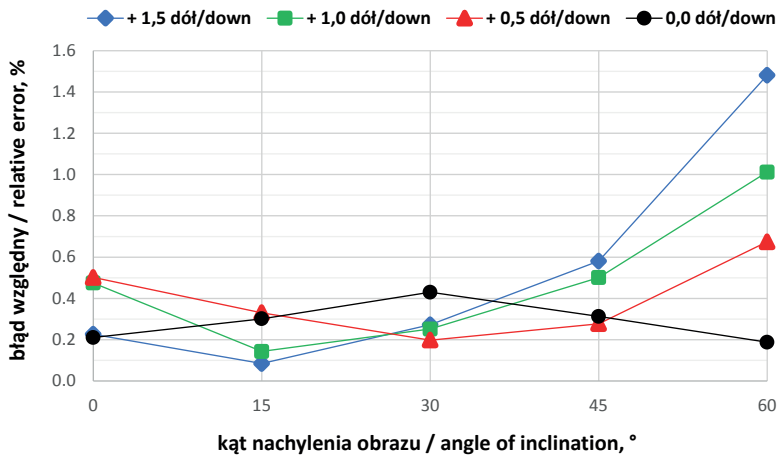
$$B = \frac{|x - 16|}{16} \cdot 100\% \quad [1]$$

where:

x – the average area of the red square for a row of samples determined using DIA, %

16 – target value of the red square area, %

The paper focuses on determining the surface, while the carbonation depth G can be determined after a simple transformation



Rys. 4. Wartości błędu względnego oznaczeń powierzchni dla próbek z dolnego rzędu.

Fig. 4. Values of relative error of surface determinations for samples from the down position.

na dystorsję jest największe. W etapie tym, dla próbek z górnego rzędu [oznaczone jako t] zastosowano, celem zwiększenia wartości statystycznej wyników, po trzy próbki. Stosunki pól kwadratów czerwonych do białych wyniosły: 4,00; 7,62; 16,00; 29,52; 48,00; 64,00%.

Badania w części 3 przeprowadzane były bezpośrednio na próbkach zapraw poddanych przyspieszonej karbonatyzacji w komorze karbonatyzacyjnej. Próbki 3 serii zapraw, oznaczonych jako A, B i C, po 4 próbki każda, składały się z cementu portlandzkiego CEM I, piasku normowego i wody w stosunkach 1:3:(0,45;0,5;0,55;0,60). Próbki po przełamaniu zostały pokryte 1% roztworem fenoloftaleiny. Na tym etapie badań nie jest ważny bardziej szczegółowy skład zaprawy, czas dojrzewania w wodzie oraz karbonatyzacji, ponieważ celem tego etapu było porównanie wyników uzyskanych dla tych samych serii próbek stosując dwie analizowane w pracy metody. Badano pola powierzchni przełamów, które nie uległy procesowi karbonatyzacji, wyznaczając ją tradycyjnie suwmiarką oraz proponowaną metodą komputerowej analizy obrazu - KAO. Pomiar wykonany był z zachowaniem centryczności umieszczenia próbki względem aparatu, umieszczonego na statywie, pod kątem 0°.

3. Wyniki

Wartość błędu względnego - B w %, wyznaczonych wartości czerwonego kwadratu została obliczona według wzoru [1]:

$$B = \frac{|x - 16|}{16} \cdot 100\% \quad [1]$$

gdzie:

of the obtained surface. The formula assumes parallel carbonation for 4 sides of the sample.

$$G = \frac{d - d \sqrt{\frac{A_z}{A}}}{2} \quad [2]$$

where:

d – sample size [side length], mm

A_z – area that has not been carbonated, %

A – sample area, %

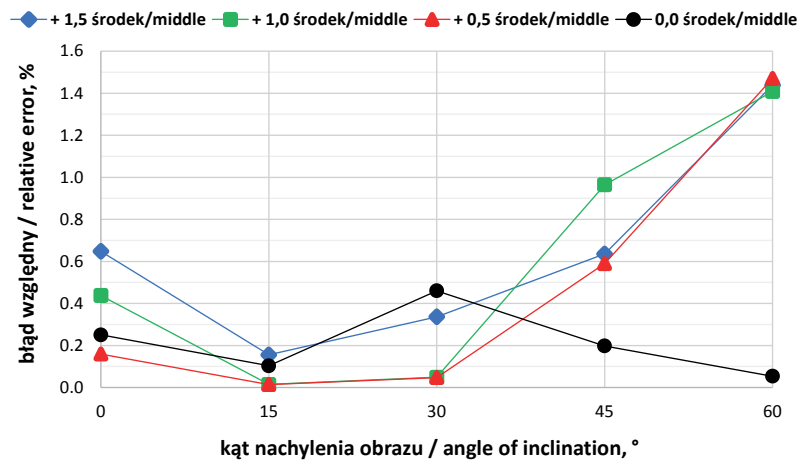
For the approach, where two fronts are subjected to corrosion, the formula for determining the depth of carbonation G_N takes the following form:

$$G_N = \frac{A_z d}{2} \quad [3]$$

where:

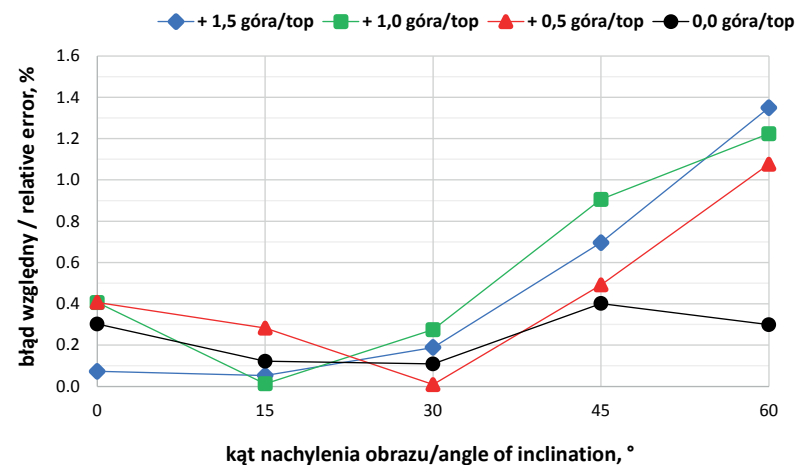
d – dimension of the base of the rectangle, mm

The need to use the square root in equation [2] results from the



Rys. 4a. Wartości błędu względnego oznaczeń powierzchni dla próbek ze środkowego rzędu.

Fig. 4a. Values of relative error of surface determinations for samples from the middle position.



Rys. 4b. Wartości błędu względnego oznaczeń powierzchni dla próbek z górnego rzędu.

Fig. 4b. Values of relative error of surface determinations for samples from the top position.

x – średnia powierzchnia kwadratu czerwonego dla rzędu próbek wyznaczona za pomocą KAO, %

16 – docelowa wartość powierzchni kwadratu czerwonego, %

W artykule skoncentrowano się na wyznaczaniu powierzchni, natomiast głębokość karbonatyzacji G można wyznaczyć po prostym przekształceniu uzyskanej powierzchni. Wzór [2] zakłada karbonatyzację równoległą dla 4 stron próbki.

$$G = \frac{d - d\sqrt{\frac{A_z}{A}}}{2} \quad [2]$$

gdzie:

G – głębokość karbonatyzacji, mm

d – wymiar próbki - bok kwadratu, mm

A_z – powierzchnia obszaru, który nie uległ karbonatyzacji, %

A – powierzchnia próbki, %.

Dla podejścia nienormowego, w którym działaniu korozji poddane są dwa fronty, wzór do wyznaczania głębokości karbonatyzacji G_N przyjmuje postać:

$$G_N = \frac{A_z d}{2A} \quad [3]$$

gdzie:

d – wymiar podstawy prostokąta, mm.

Potrzeba stosowania w równaniu [2] działania pierwiastkowania wynika z założenia, iż próbka oraz obszar, który nie uległ karbonatyzacji, są kwadratami. Usunięcie działania pierwiastkowania w równaniu [3] wynika z wysokości boku prostokąta próbki i obszaru, który nie uległ karbonatyzacji, które są takie same, co oznacza, że iloraz A_z/A zawiera, wspólny czynnik - wysokość próbki, który ulega zmniejszeniu.

Z analizy wykresów wynika, że środkowe umieszczenie analizowanego obszaru w próbce nie wpływa na zmianę wartości uzyskiwanej powierzchni, a błąd względny dla wszystkich pomiarów nie przekracza 0,5%, niezależnie od kąta nachylenia próbki względem aparatu. Należy zatem stwierdzić, że wyznaczenie wielkości powierzchni, która uległa karbonatyzacji, może być przeprowadzane nawet przy dużych nachyleniach aparatu względem obrazu [karbonatyzacja przeważnie zachodzi symetrycznie wewnątrz próbki badanej]. Oczywiście jest natomiast, że fotografia powinna zostać wykonana starannie, najlepiej prostopadłe do powierzchni, aby wartości uzyskiwane przy jej pomocy nie budziły wątpliwości. Podejście takie pozwoli również na zwiększenie szybkości i ułatwienie analizy. Przesunięcia analizowanego obszaru wzdłuż pionowej osi symetrii próbki są powodem uzyskiwania odmiennych, od rzeczywistej, powierzchni. Przyczyną tego jest dystorsja obrazu niesymetrycznego, przez co proporcje kwadratów czerwonego i białego ulegają zmianie. Jest to jednak zmiana mieszcząca się poniżej 1,6 %, nawet w najbardziej zakłóconych warunkach pomiaru [60° nachylenia, położenie góra lub dół, centryczność 1,5, co należy uznać za satysfakcjonującą wartość odchyłki. Podkreślić należy,

assumption that the sample and the area that has not been carbonated are squares. The removal of the square root in equation [3] is due to the heights of the side of the sample and the area that has not been carbonated are the same, which means that the A_z/A quotient implicitly contains a common factor [height of the sample], which is decreased.

The analysis of the graphs shows that the central location of the analysed area in the sample does not change the value of the surface obtained, and the relative error for all measurements does not exceed 0.5%, regardless of the inclination of the angle of the sample relative to the camera. It should therefore be concluded that the determination of the size of the surface that has undergone carbonation [carbonation usually takes place symmetrically inside the test sample] can be carried out even with large inclinations of the camera relative to the image. However, it is obvious that the photograph should be taken carefully, preferably perpendicular to the surface, so that the values obtained using it do not raise any doubts. This approach will also increase the speed and ease of analysis. Shifts in the analysed area along the vertical axis of symmetry of the sample are the reason for obtaining surfaces different from the real one. The reason for this is the distortion of the asymmetric image, which changes the proportions of the red and white squares. However, this is a change of less than 1.6%, even in the most disturbed measurement conditions [60 ° inclination, up or down position, centricity 1.5], which should be considered a satisfactory value of the deviation. It should be emphasised that the inclination of the sample up to 30 ° in each case did not disturb the obtained surface values, and the relative error of the determined surface did not exceed 0.6%. Differences in the analysed surfaces are manifested only after exceeding 30 ° of inclination with the acentricity of the analysed surface. Generally, the farther the image centricity is from the vertical axis of symmetry, the greater the error. However, as proved in the next part of the article, the error of the determined surface is not greater than the error of determination for the traditional measurement.

Fig. 5 shows the obtained area of the analysed sample, depending on the change in the dimension of the side of the red square. The length of the side of the entire sample did not change and was always 50 mm. The calculations are presented to illustrate the error that occurs during the T analysis and to compare this error with the errors resulting from the use of DIA. The calliper measurement is made with an accuracy of 0.5 mm. Thus, if the maximum error value for the red square is applied, which means that its value is increased or decreased by 0.5 mm, and the ratio of the red square area thus changed to the unchanged sample area is compared, the area values instead of the target 16% will change to 15.21% or 16.81%, respectively. During the DIA, no such designation was recorded in any case. This means that when using DIA, regardless of the measurement conditions, the error exposure values are lower than the traditional measurement.

An important aspect of the research is the applicability of the DIA method. DIA, while maintaining the centricity of the sample and a small angle of inclination of the camera in relation to the sample,

że pochylenie próbki do 30°, w każdym przypadku nie wpływało na pogorszenie uzyskiwanych wartości powierzchni, a błąd względny wyznaczonej powierzchni nie przekraczał 0,6%. Różnice analizowanych powierzchni przejawiają się dopiero po przekroczeniu 30° nachylenia przy acentryczności analizowanej powierzchni. Generalnie, im centryczność obrazu jest bardziej oddalona od pionowej osi symetrii tym wyznaczony błąd większy. Jednak, jak udowodniono w dalszej części pracy, błąd wyznaczonej powierzchni nie jest większy niż błąd dla pomiaru tradycyjnego.

Na wykresie 5 przedstawiono uzyskiwaną powierzchnię analizowanego obszaru w zależności od zmiany wymiaru boku kwadratu czerwonego. Długość boku całej próbki nie zmieniała się i wynosiła zawsze 50 mm. Obliczenia przedstawiono dla zobrazowania błędu, jaki popełniany jest podczas analizy tradycyjnej [dokładność suwmiarki odpowiada zakresowi osi X wykresu, czyli 20,00 mm ±0,50 mm] oraz porównania tego błędu z błędami wynikającymi ze stosowania KAO. Pomiar suwmiarką ma dokładność do 0,5 mm. Jeżeli zastosowana zostanie zatem maksymalna wartość błędu w przypadku czerwonego kwadratu, co oznacza, że jego wartość zostanie zwiększona lub zmniejszona o 0,5 mm i porównany zostanie stosunek tak zmienionej powierzchni kwadratu czerwonego względem niezmienionego obszaru próbki, wartości powierzchni zamiast docelowych 16% zmienią się odpowiednio na 15,21% lub 16,81%. Podczas KAO w żadnym przypadku nie odnotowano takiego oznaczenia. Oznacza to, że stosując KAO, niezależnie od warunków pomiarowych, wartości narażenia na błąd są mniejsze od pomiaru tradycyjnego.

Istotnym aspektem badań jest zakres stosowalności metody KAO. KAO, przy zachowaniu centryczności próbki i niewielkiego kąta pochylenia aparatu w stosunku do próbki, nie ma ograniczeń, o ile zdjęcie jest w jakości, która pozwala na wykonanie analizy. W praktyce analiza zdjęcia jest możliwa, jeżeli fotografia jest możliwa do wyraźnego wyświetlenia na ekranie. Służy do wyznaczenia szukanych powierzchni. W przypadku tej pracy parametry zdjęcia wynosiły: rozmiar – od 3 do 5 MB, rozdzielczość 3000 × 3000 pikseli. Dla najbardziej niekorzystnych warunków pomiarowych [60° pochylenia oraz duża asymetryczność +1,5 obszaru analizowanego] błąd jest ściśle związany z powierzchnią analizowanego obszaru. Wnioskiem z przeprowadzonego badania jest stwierdzenie, że im powierzchnia mniejsza, tym błąd większy. Na rys. 6 przedstawiono błąd względny wyznaczonej powierzchni kwadratu w funkcji rzeczywistej powierzchni kwadratu. I tak dla powierzchni 4,00% wyznaczona wartość oznaczenia wynosiła 3,76%, co przekłada się na błąd względny 6,0%. Im powierzchnia większa, tym błąd mniejszy, dla powierzchni rzeczywistej wynoszącej 16%, błąd oznaczenia wynosi niecałe 1,4%. Natomiast 29,5% rzeczywistej wartości przyczynia się tylko do 0,3% błędu względnego; dla więk-

Tablica 2 / Table 2

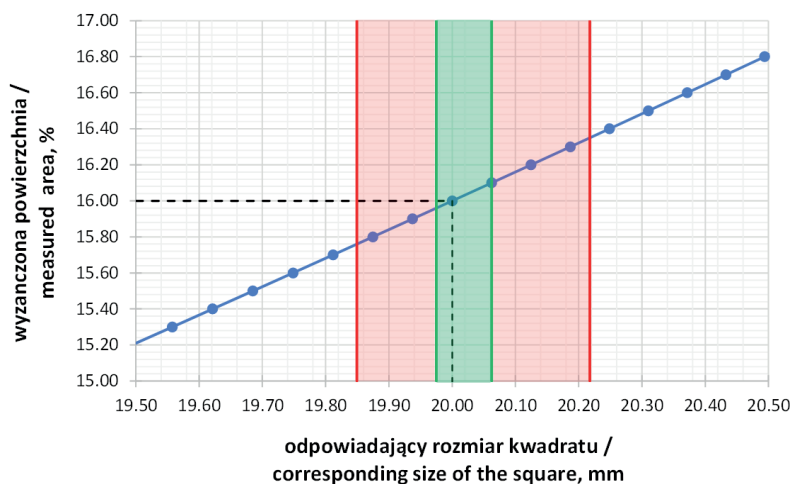
BEZPOŚREDNIA WARTOŚĆ POWIERZCHNI [%] KWADRATU CZERWONEGO WYZNACZONA PRZY POMOCY KAO.

THE DIRECT VALUE OF THE AREA [%] OF THE RED SQUARE DETERMINED WITH THE USE OF DIA.

Centryczność Centricity	pochylenie/położenie inclination / orientation	0.0 °	15.0 °	30.0 °	45.0 °	60.0 °
-1.5	d	16.03	16.01	16.02	16.34	16.34
	m	16.05	16.09	16.01	16.32	16.35
	t	16.00	16.05	16.02	16.25	16.25
-1.0	d	16.00	16.06	16.08	16.18	16.18
	m	16.06	16.06	16.04	16.16	16.16
	t	16.07	16.06	16.10	16.13	16.11
-0.5	d	16.03	16.00	16.07	16.13	16.11
	m	16.06	16.03	16.00	16.08	16.01
	t	15.96	16.01	16.04	16.10	16.07
0.0	d	16.03	16.05	16.07	16.05	16.03
	m	16.04	16.02	16.07	16.03	16.01
	t	16.05	16.02	15.98	16.06	15.95
+0.5	d	16.08	16.05	16.03	15.96	15.89
	m	16.03	16.00	15.99	15.91	15.76
	t	16.07	16.05	16.00	15.92	15.83
+1.0	d	16.08	16.02	15.96	15.92	15.84
	m	16.07	16.00	16.01	15.85	15.77
	t	16.07	16.00	16.04	15.86	15.80
+1.5	d	16.04	15.99	16.04	15.91	15.76
	m	16.10	15.98	15.95	15.90	15.77
	t	16.01	16.01	16.03	15.89	15.78

has no limitations, as long as the photo is of a quality that allows for analysis. In practise, the analysis of a photo is possible if it can be clearly displayed on the screen used to determine the searched areas. In the case of this article, the photo parameters were: size - from 3 to 5 MB, area 3000 × 3000 pix. For the most unfavourable measurement conditions [60° inclination and a high asymmetry of +1.5 of the analysed area], the error is closely related to the surface of the analysed area. The conclusion of the study is that the smaller the area, the greater the error. Fig. 6 shows the relative error of the determined area as a function of the actual area. Therefore, for the area of 4.00%, the determination value was 3.76%, which translates into a relative error of 6.0%. The larger the area, the smaller the error, for a real area of 16.00%, the relative error is less than 1.4%, while for the area of 29.50% the relative error is only 0.3%. For larger values of the area, the error asymptotically tends to 0. This means that if the non-carbonated area exceeds 16% of the total area of the sample, it can be tested in virtually any distortion conditions.

Fig. 7 shows the depth of carbonation calculated on the basis of DIA for three series of mortars [4 samples per each series]. The series were marked as A, B, and C. The analysis was carried out



Rys. 5. Zależność wielkości wyznaczonej powierzchni zabarwionego kwadratu [% całości próbki] od długości boku kwadratu. Zielone linie pokazują zakres wyników uzyskanych dla pomiaru bez pochylenia aparatu [tablica 2], zakres ograniczony liniami czerwonymi to wyniki uzyskane w pomiarze przy maksymalnym pochyleniu aparatu [65°]. Odchylenia od wartości rzeczywistej [20 mm – ilustrowane czarną przerywaną linią] są miarą błędów wyznaczenia głębokości karbonatyzacji.

Fig. 5. The dependence of the size of the determined area of the coloured square [% of the total sample] on the length of the side of the square. The green lines show the range of results obtained for the measurement without tilting the camera [Table 2], the range limited by red lines are the results obtained in the measurement with the camera at maximum inclination [65°]. Deviations from the actual value [20 mm - illustrated with a black dashed line] are a measure of the error in determining the carbonation depth.

Tablica 3 / Table 3

ZESTAWIENIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA KORELACJI R^2 DLA 3 SERII PRÓBEK PODDANYCH ANALIZIE KAO I T.

SUMMARY OF THE VALUES OF THE CORRELATION COEFFICIENT R^2 FOR 3 SERIES OF SAMPLES ANALYZED BY DIA AND T.

Sample:	A/KAO/DIA	A/T	B/KAO/DIA	B/T	C/KAO/DIA	C/T
r^2 coefficient	0.977	0.763	0.975	0.946	0.971	0.937

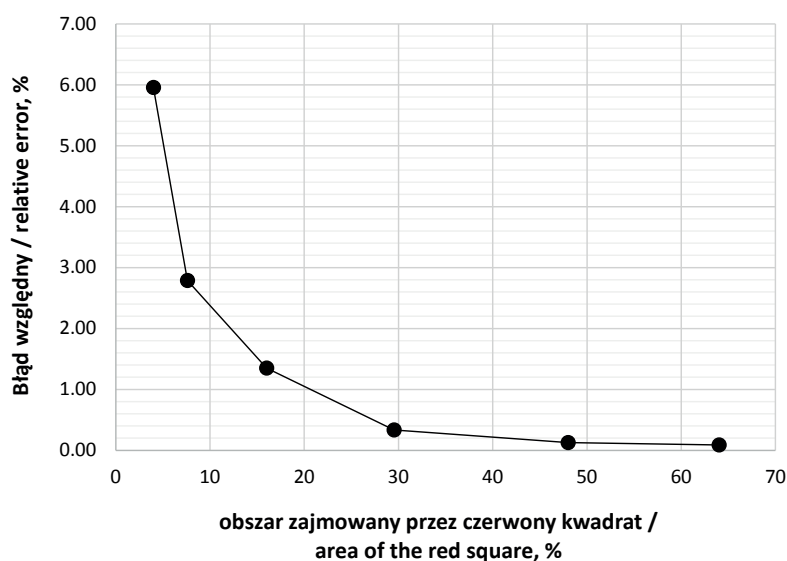
szych wartości powierzchni błąd asymptotycznie dąży do 0. Oznacza to, że powierzchnia badanego obszaru, jeżeli przekracza 16% może być badana praktycznie w dowolnych warunkach dystorsyjnych.

Na wykresie 7 przedstawiono porównanie obliczonych na podstawie KAO głębokości karbonatyzacji, dla trzech serii zapraw - po 4 próbki każda. Serie zostały oznaczone jako A, B i C. Analizę przeprowadzono metodami komputerowej analizy obrazu i tradycyjną. W tablicy 3 zestawiono wartości współczynnika r^2 dla prostej regresji przybliżającej zależność głębokości karbonatyzacji – stosunek w/c dla poszczególnych serii zapraw dla obu użytych metod pomiaru głębokości karbonatyzacji. Postęp karbonatyzacji, dla przedstawionych serii powinien zależeć od stosunku w/c (26,27), dlatego krzywe powinny być funkcjami liniowymi, a współczynnik korelacji dążyć do 1. Postawiona teza będzie słuszna w wąskim, stosowanym w badaniach zakresie stosunków w/c. Jak wiadomo postęp karbonatyzacji uzależniony jest od mikrostruktury, również

using the DIA and T methods. Table 3 lists the values of the coefficient r^2 for a simple regression approximating the dependence carbonation depth - w/c ratio for individual series of mortars for both methods used to measure the carbonation depth. The progress of carbonation, for the investigated series, should linearly depend from the w/c ratio (26,27), therefore the curves should be linear, and the ideal correlation coefficient to be pursued to 1. The proposed thesis will be correct in the narrow range of w/c ratios used in current research. As is known, the progress of carbonation depends on the microstructure and correlates more strongly with w/c, which in narrow ranges is linearly responsible for the properties of binders (28-30). Generally, the results obtained by applying the KAO method have higher values of the coefficient r^2 . A higher correlation means a better approximation [fitting] of the value to the linear function. In general, the values obtained from the KAO analysis, thanks to the continuous analysis, have higher regression-to-line fit than the traditional measurement with calliper, and the analysis of the KAO methods is simpler and faster. When analysing the entire area that has not been carbonated, the measurement removes the uncertainty associated with the selection of measurement points, as well as the error associated with the heterogeneity of the area covered by carbonation.

5. Conclusions

1. Digital Image Analysis [DIA], can be successfully used in carbonation depth measured. DIA helps by eliminate traditional method (T) abnormalities and identifying samples for which the analysis may have been performed



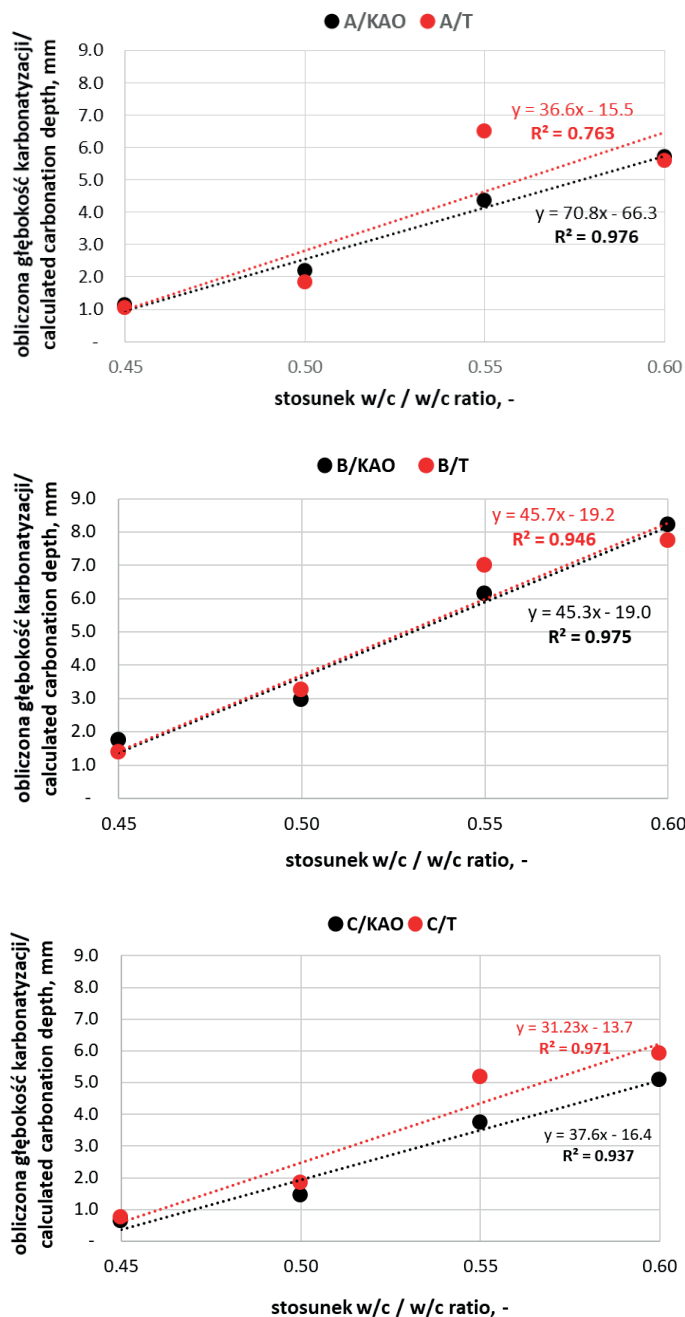
Rys. 6. Wpływ obszaru zajmowanego przez kolorowy kwadrat na błąd wyznaczonej powierzchni w warunkach najbardziej narażonych na dystorsję

Fig. 6. The influence of the red area on the error of the determined surface in conditions most exposed to distortion

silnie uzależnionej od stosunku w/c, który w wąskich zakresach odpowiada liniowo za właściwości spoiw (28-30). Generalnie uzyskiwane, poprzez zastosowanie metody KAO, wyniki mają większe wartości współczynnika r^2 . Większa korelacja oznacza lepsze przybliżanie [dopasowanie] wartości do funkcji liniowej. Generalnie wartości uzyskane z analizy KAO, dzięki analizie ciągłej, mają większe, od analizy T, dopasowania regresji do prostej, a analiza metod KAO jest prostsza i szybsza. Analizując cały obszar, który nie uległ karbonatyzacji pomiar usuwa niepewność związaną z doбором punktów pomiarowych, a także błąd związany z niejednorodnością obszaru objętego karbonatyzacją.

4. Wnioski

1. Komputerowa analiza obrazu [KAO], może z powodzeniem zostać wykorzystana do analizy głębokości karbonatyzacji. KAO pomaga wyeliminować nieprawidłowości związane z analizą tradycyjną [T] wykonywaną za pomocą suwmiarki, wskazując próbki dla których analiza mogła zostać przeprowadzona nieprawidłowo, albo proces karbonatyzacji został zaburzony niepożądanymi czynnikami zewnętrznymi.
2. KAO jest metodą dokładniejszą, prostszą i szybszą, zwłaszcza przy dużej liczbie próbek, niż metoda tradycyjna. Pomiar ciągły, możliwy przy wykorzystaniu KAO, zapewnia przewagę nad pomiarem punktowym analizy T przez ocenę całej badanej powierzchni, a nie pojedynczych punktów, czyniąc pomiar odporny na niejednorodność frontu karbonatyzacji.
3. Dystorsja, pojawiająca się przy wykonywaniu fotografii w metodzie KAO wpływa na uzyskiwane wielkości powierzchni, jednak statystycznie pomijalne. KAO nawet w przypadku zastosowania warunków najbardziej narażonych na dystorsję [60° pochylenia, $\pm 1,5$ cm przesunięcia, położenie w górnej lub dolnej części podłoża do badań] implikować może maksymalny błąd, porównywalny z błędem wynikającym z niepewnością pomiaru T. Warunkiem uzyskania niezmięnionej, oryginalnej powierzchni jest, niezależnie od pochylenia obrazu względem próbki, centryczność powierzchni analizowanej - czerwonego kwadratu, powierzchni która nie uległa karbonatyzacji lub pochylenie obrazu względem aparatu nieprzekraczające 30°.
4. Wyznaczanie analizowanej powierzchni nie jest czynnikiem limitującym możliwości KAO. Przy pomocy KAO można, po prostych przekształceniach, wyznaczyć bezpośrednio lub pośrednio głębokość frontu karbonatyzacji, nie tylko dla próbek w kształcie kwadratu, ale również m.in. dla próbek prostokątnych.
5. Błąd, związany z analizą KAO jest uzależniony również od pola analizowanej powierzchni próbki, zwłaszcza w warunkach sprzyjających dystorsji. Im analizowana [zabarwiona fenoloftaleina] powierzchnia zajmuje większą część próbki, tym błąd jej wyznaczenia jest mniejszy. Warto podkreślić, że jeżeli stosunek analizowanej powierzchni względem próbki wynosi minimum 30%, to błąd związany z wyznaczeniem tego stosunku jest pomijalny, nawet dla najbardziej dystorsyjnych warunków analizy KAO.



Rys. 7. Zależność głębokości karbonatyzacji od stosunku w/c dla trzech serii zapraw wyznaczona za pomocą komputerowej analizy obrazu [KAO] oraz pomiaru suwmiarką [T]

Fig. 7. The relationship between carbonation depth and w/c ratio for three series of mortars based on digital image analysis [DIA] and measured using calliper [T]

incorrectly or the carbonation process may have been disrupted by undesirable external factors.

2. DIA is a simpler, faster, and easier method than the traditional method. Continuous measurement, possible with the use of DIA, provides an advantage over point measurement of traditional analysis by evaluating the whole surface area, rather than individual points, making the measurement resistant to carbonation depth heterogeneity.
3. The influence of distortion, during the photographing for the DIA method is statistically negligible. DIA, even under the conditions most susceptible to distortion [60° inclination, $\pm 1,5$ offset, po-

Podziękowania

Badania zrealizowano w ramach projektu AGH IDUB „Inicjatywa Doskonałości Uczelnia Badawcza”, projekt nr 4176 „Badania aktywowanych termicznie minerałów ilastych jako składników niskoemisyjnych spoiw mineralnych do zastosowania w zrównoważonym budownictwie“(16.16.160.7998).

Literatura / References

1. E. Vejmelková, M. Pavlíková, Z. Keršner, et al., High performance concrete containing lower slag amount, A complex view of mechanical and durability properties. *Constr. Build. Mater.* **23**, 2237–2245 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.018>
2. Y. Kim, A. Hanif, M. Usman et al., Slag waste incorporation in high early strength concrete as cement replacement, Environmental impact and influence on hydration & durability attributes. *J. Clean. Prod.* **172**, 3056–3065 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.105>
3. R. Mi, G. Pan, Y. Li, T. Kuang, Carbonation degree evaluation of recycled aggregate concrete using carbonation zone widths. *J. CO₂ Util.* **43**, 101366 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.JCOU.2020.101366>
4. R. Mi, G. Pan, Y. Li, et al., Distinguishing between new and old mortars in recycled aggregate concrete under carbonation using iron oxide red. *Constr. Build. Mater.* **222**, 601–609 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.171>
5. R. Mi, G. Pan, Q Shen, Carbonation modelling for cement-based materials considering influences of aggregate and interfacial transition zone. *Constr. Build. Mater.* **229**, 116925 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116925>
6. X. Xian, Y. Shao, Microstructure of cement paste subject to ambient pressure carbonation curing. *Constr. Build. Mater.* **296**, 123652 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123652>
7. S. Cloete, A. Giuffrida, MC. Romano, A. Zaabout, The swing adsorption reactor cluster for post-combustion CO₂ capture from cement plants. *J. Clean. Prod.* **223**, 692–703 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.109>
8. A. Kóliö A, T.A. Pakkala, J. Lahdensivu, M. Kiviste, Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate. *Eng. Struct.* **62–63**, 42–52 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.032>
9. S. Zhang, Q. Wang, P. Puthiaraj, WS. Ahn, MgFeAl layered double hydroxide prepared from recycled industrial solid wastes for CO₂ fixation by cycloaddition to epoxides. *J. CO₂ Util.* **34**, 395–403 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.035>
10. J.I. Santos, A.E. Cesarin, C.A. Sales, M.B. Triano, P. Martins, A.F. Braga NJN, Increase of atmosphere CO₂ concentration and its effects on culture/weed interaction. *Int. J. Agric. Biosystem. Eng.* **11**, 419–426 (2017). waset.org/Publication/10007219
11. CEN Technical report EN 12390-12:2018: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method
12. K. Sisomphon, L. Franke, Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. *Cem. Concr. Res.* **37**, 1647–1653 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.014>
13. A. Leemann, P. Nygaard, J. Kaufmann, R. Loser R, Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. *Cem. Concr. Compos.* **62**, 33–43 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.020>

sition at the top or bottom of the test substrate] may imply only a maximum error comparable to the error resulting from the uncertainty of traditional measurement. The condition to obtain an unchanged original area is, regardless of the inclination of the image with respect to the sample, either the centricity of the analysed area [red square, carbonation area] or an inclination of the image with respect to the camera of not more than 30°.

4. Determining the analysed area is not a limiting factor for DIA capabilities. With the help of DIA, after simple transformations, the depth of the carbonation front can be determined directly or indirectly, not only for square samples but also for rectangular samples.
5. The error associated with the DIA analysis may also depend on the area of the non-carbonated part of the sample, especially under conditions conducive to distortion. The larger the sample area to be analysed, the smaller the error of its determination. It is worth mentioning that if the ratio of the analysed area to the sample is at least 30%, the error associated with the determination of this ratio is negligible, even under the most distortive conditions of the DIA analysis.

Acknowledgements

The work was supported by the AGH University of Science and Technology Excellence Initiative – Research University (IDUB), project no. 4176 „Research on calcined clay minerals as components of low-carbon mineral binders for use in sustainable construction industry“(16.16.160.7998).

14. E. Rozière, A. Loukili, F. Cussigh, A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. *Constr. Build. Mater.* **23**, 190–199 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.006>
15. E. Gruyaert, P. Van Den Heede, N. De Belie, Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient - Effect of carbonation on the pore structure. *Cem. Concr. Compos.* **35**, 39–48 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024>
16. A. Younsi, P. Turcry, E. Rozire, et al., Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. *Cem. Concr. Compos.* **33**, 993–1000 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.005>
17. FA. Labra, E. Hernández-Miranda, RA. Quiñones, Dynamic relationships between body size, species richness, abundance, and energy use in a shallow marine epibenthic faunal community. *Ecol. Evol.* **5**, 391–408 (2015). <https://doi.org/10.1002/ece3.1343>
18. KW. Holmes, KP. Van Niel, B. Radford, et al., Modelling distribution of marine benthos from hydroacoustics and underwater video. *Cont. Shelf Res.* **28**, 1800–1810 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.016>
19. D. Pech, AR. Condal, E. Bourget, P-L. Ardisson, Abundance estimation of rocky shore invertebrates at small spatial scale by high-resolution digital photography and digital image analysis. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **299**, 185–199 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.08.017>
20. JD. Gage, BJ. Bett, Deep-Sea Benthic Sampling. In: *Methods for the Study of Marine Benthos*. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK, pp 273–325 (2005). <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/21041>
21. AD. McIntyre, The use of trawl, grab and camera in estimating marine benthos. *J. Mar. Biol. Assoc. United Kingdom* **35**, 419–429 (1956). <https://doi.org/10.1017/S0025315400010249>
22. KJ. Morris, BJ. Bett, JM. Durden, et al., A new method for ecological surveying of the abyss using autonomous underwater vehicle photography. *Limnol. Oceanogr. Methods* **12**, 795–809 (2014). <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.795>
23. PWN S.A. **Dystorsja** (distortion). PWN
24. MS. Foster, C. Harrold, DD. Hardin, Point vs. photo quadrat estimates of the cover of sessile marine organisms. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **146**, 193–203 (1991). [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(91\)90025-R](https://doi.org/10.1016/0022-0981(91)90025-R)
25. JS. Whorff, L. Griffing, A video recording and analysis system used to sample intertidal communities. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **160**, 1–12 (1992). [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(92\)90106-K](https://doi.org/10.1016/0022-0981(92)90106-K)
26. CQ. Lye, RK. Dhir, GS. Ghataora, Carbonation resistance of GGBS concrete. *Mag. Concr. Res.* **68**, 936–969 (2016). <https://doi.org/10.1680/JMACR.15.00449>
27. D. Zhang, M. Mao, Q. Yang, KS.Lim, Carbonation Resistance of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **712**, 012044 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012044>
28. Z. Huo, L. Wang, Y. Huang, Predicting carbonation depth of concrete using a hybrid ensemble model. *J. Build. Eng.* **76**, 107320 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107320>
29. H. Mehdizadeh, X. Jia, KH. Mo, T-C. Ling, Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the accelerated carbonation of cement pastes. *Environ. Pollut.* **280**, 116914 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116914>
30. J. Sim, C. Park, Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Manag.* **31**, 2352–2360 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>