

M.Sc. Eng. Tomasz Benedysiuk^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8870-0225

Dr. Eng. Wioletta Jackiewicz-Rek¹⁾

ORCID: 0000-0001-6056-5458

Prof. Eng. Andrzej Garbacz¹⁾

ORCID: 0000-0002-5229-7884

The application of computer image analysis for assessment of surface porosity of architectural concrete

Zastosowanie komputerowej analizy obrazu do oceny porowatości powierzchni betonu architektonicznego

DOI: 10.15199/33.2024.10.04

Abstract. This article presents the results of research on an innovative method for assessing the porosity of architectural concrete surfaces using image analysis techniques. The method utilizes local thresholding algorithms and morphological operations to minimize the influence of surface color and roughness on the measurement results. The use of model samples with controlled color and surface topography allowed for verification of the method's accuracy in assessing surface porosity and its applicability for evaluating the surface quality of smooth architectural concrete.

Keywords: architectural concrete; concrete porosity; image analysis; thresholding algorithms; morphological operations.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań nad innowacyjną metodą oceny porowatości powierzchni betonu architektonicznego z zastosowaniem technik analizy obrazu. Metoda wykorzystuje algorytmy progowania lokalnego i operacje morfologiczne w celu minimalizacji wpływu koloru i chropowatości powierzchni na wynik pomiaru. Zastosowanie próbek modelowych, o kontrolowanych parametrach kolorystyki i struktury geometrycznej powierzchni, pozwoliło na przeprowadzenie weryfikacji dokładności metody oceny porowatości powierzchni i możliwości jej zastosowania do badania jakości powierzchni gładkiego betonu architektonicznego.

Słowa kluczowe: beton architektoniczny; porowatość betonu; analiza obrazu; algorytmy progowania; operacje morfologiczne.

For the past several years, architectural concrete has gained increasing popularity among architects and investors. Alongside its structural function, this material is expected to meet stringent aesthetic requirements, posing challenges for contractors [1]. One of the key parameters in assessing the quality of architectural concrete surfaces is its surface porosity. In this context, a significant challenge lies in developing a research method that enables rapid and accurate counting of surface pores, irrespective of prevailing lighting conditions.

The aim of the work presented in this article was to develop and verify a new method for the automated assessment of surface porosity using computer image analysis. The proposed method distinguishes itself through the use of a custom-designed DARK-BOX device, which ensures controlled and repeatable lighting conditions during measurements, eliminating one of the main limitations of existing solutions. A key element of the method is the application of local thresholding algorithms and morphological operations, which minimize the impact of discolorations and roughness on the measurement results, thus enhancing its accuracy. The research involved conducting experiments on specially prepared model samples with controlled color, roughness, and porosity.

Od kilkunastu lat beton architektoniczny jest coraz bardziej popularny wśród architektów i inwestorów. Obok funkcji konstrukcyjnej, materiał ten powinien spełniać rygorystyczne wymagania estetyczne, co stawia wyzwania przed wykonawcami [1]. Jednym z kluczowych parametrów oceny jakości powierzchni betonu architektonicznego jest jego porowatość powierzchniowa. W tym kontekście istotnym wyzwaniem jest opracowanie takiej metody badawczej, za pomocą której możliwe byłoby szybkie zliczanie porów powierzchniowych z dużą dokładnością, niezależnie od zastanych warunków oświetleniowych.

Celem pracy zaprezentowanej w artykule było opracowanie i weryfikacja nowej metody zautomatyzowanej oceny porowatości powierzchni z wykorzystaniem komputerowej analizy obrazu. Proponowana metoda wyróżnia się zastosowaniem autorskiego urządzenia DARK-BOX, które zapewnia kontrolowane i powtarzalne warunki oświetleniowe podczas pomiarów, eliminując tym samym jedną z głównych barier dotychczasowych rozwiązań. Kluczowym elementem metody jest wykorzystanie algorytmów progowania lokalnego i operacji morfologicznych, które minimalizują wpływ przebarwień i chropowatości na wynik pomiaru, zwiększając jej dokładność. W ramach pracy przeprowadzono badania na specjalnie przygotowanych próbkach modelowych o kontrolowanej kolorystyce, chropowatości i porowatości.

¹⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering

^{*)} Correspondence address: tomasz.benedysiuk.dokt@pw.edu.pl

Standard Requirements

The evaluation of architectural concrete surfaces is addressed in numerous standards [1 ÷ 6] and guidelines [7 ÷ 9], which deal with the assessment of surface porosity. In Poland, evaluation criteria outlined in the book by K. Kuniczuk [10] are commonly used in contract documents.

These sources can be divided into two groups based on their approach to surface porosity assessment. The first group relies on visual evaluation through comparison with a porosity reference chart [2, 7]. This method raises concerns due to its inherent subjectivity. The second group involves counting air voids and determining the acceptable number based on their size. The most common evaluation criterion involves specifying the maximum permissible percentage of surface area occupied by pores (Table 1).

Wymagania normowe

Oceny powierzchni betonu architektonicznego dotyczy wiele norm [1 ÷ 6], i wytycznych [7 ÷ 9], które poruszają zagadnienie oceny porowatości powierzchni. Ponadto w Polsce, w materiałach kontraktowych, wykorzystywane są kryteria oceny zawarte w książce autorstwa K. Kuniczuka [10]. Wymienione źródła można podzielić na dwie grupy w zależności od metody oceny porowatości powierzchni. Pierwsza grupa bazuje na ocenie jakości powierzchni przez porównanie z wzornikiem porowatości [2, 7]. Metoda ta budzi wątpliwości ze względu na dużą subiektywność oceny, natomiast druga polega na zliczaniu pustek powietrznych i określaniu dopuszczalnej liczby w zależności od rozmiaru. Najczęściej występującym kryterium oceny jest określenie maksymalnego dopuszczalnego udziału powierzchni zajmowanej przez pory wyrażonego w procentach (tabela 1).

Table 1. Summary of criteria determining the permissible percentage of surface area occupied by pores

Tabela 1. Zestawienie kryteriów określających dopuszczalny procent zajmowanej powierzchni przez pory

Standards/guidelines/ Normy/wytyczne	Pore size range [mm]/ Zakres wielkości zliczanych porów [mm]	Examined surface area [mm]/ Wymiary badanej powierzchni [mm]	Maximum permissible pore area percentage by surface class/Maksymalny procent powierzchni zajmowanej przez pory w zależności od klasy powierzchni	
DBV – Merkblatt Sichtbeton (08/2004)	2 – 15	500 x 500	P1 – 1,2% P2 – 0,9% P3 – 0,6% P4 – 0,3%	
AFNOR, Normes P18-503	–	500 x 500	E1 – 10% E2 – 3% E3 – 2%	
ACI 347.3R-13	SVR1 – 2,4 – 19 SVR2 – 2,4 – 16 SVR3 – 2,4 – 9,5 SVR4 – 2,4 – 6	610 x 610	SVR1 – 1,2% SVR2 – 1,0% SVR3 – 0,6% SVR4 – 0,3%	
ÖNORM B 2211	1 – 15	500 x 500	3P – 0,9% 2P – 0,6% P – 0,3%	
K. Kuniczuk, Beton architektoniczny – wytyczne techniczne	2 – 15	500 x 500	non-absorbent formwork/ deskowanie niechłonne: P1 – 1,2% P2 – 0,94% P3 – 0,64%	absorbent formwork/ deskowanie chłonne: P1 – 1,2% P2 – 0,8% P3 – 0,4%

Another variant described in standards is the definition of the allowable number of pores of a given size. This approach is presented in the Lithuanian standard *LST 2015:2020* and the Ukrainian standard *DSTU B V.2.6-2:2009*. In contrast, the Russian standard *GOST 13015-2012* specifies the maximum permissible size of air voids without defining their acceptable proportion. None of the cited publications provide a method for counting the number or area of surface pores.

Innym wariantem, opisanym w normach, jest określenie dopuszczalnej liczby porów o danym rozmiarze. Takie podejście prezentuje litewska norma *LST 2015:2020* oraz ukraińska norma *DSTU B V. 2.6-2:2009*. Z kolei norma rosyjska *GOST 13015-2012* określa maksymalny dopuszczalny wymiar pustek powietrznych, nie definiując ich dopuszczalnego udziału. Żadne z wymienionych publikacji nie zawierają metody zliczania liczby lub powierzchni porów powierzchniowych.

Evaluation methods

Methods for assessing surface porosity can be divided into two categories: **manual** and **automated**. Manual methods include the rectangle method, the square counting method, and the planimetric method. These methods rely on direct, manual measurement and counting of each individual air void. The

Metody oceny

Metody oceny porowatości powierzchni można podzielić na dwie kategorie: **manualne** oraz **automatyczne**. Do manualnych należą m.in. metody: prostokątów; zliczania kwadratów oraz planimetryczna. Polegają one na bezpośrednim, ręcznym pomiarze i zliczaniu każdej pustki powietrznej. Metoda pro-

rectangle method involves estimating the size of rectangles encompassing individual pores and calculating their area. The square counting method utilizes graph paper onto which the pores are traced to determine their proportion within the analyzed area. An advantage of manual methods is their ease of implementation, however, drawbacks include the long measurement time and the dependence of the results on the operator performing the measurement [11].

Automated methods for assessing surface porosity employ computer image analysis techniques [12 ÷ 20]. The primary challenge in their application is the accurate segmentation of pores from the background. Techniques such as surface painting to enhance contrast [12] and the utilization of shadows cast by the sun or artificial light sources [13 ÷ 18] are commonly employed for this purpose. However, with such approaches, the number of identified pores can be dependent on lighting conditions, particularly when the angle of incidence of light is low, and the bottom of the air voids is illuminated similarly to the concrete surface. Another crucial factor that can influence the measurement results is the algorithm used to distinguish pores from the background; authors typically propose various image binarization algorithms. Table 2 presents selected characteristics of automated pore counting methods reported by different authors. It is worth noting that factors such as color and surface roughness can influence the final result, but none of the reviewed publications considered these factors.

stokątów polega na oszacowaniu wielkości prostokątów obejmujących poszczególne pory i obliczaniu ich powierzchni. Metoda zliczania kwadratów wykorzystuje papier milimetrowy, na który przerysowuje się poszczególne pory do określenia procentowego ich udziału w analizowanym obszarze. Zaletą metod manualnych jest łatwość przeprowadzenia badania, natomiast wadą jest jednak długi czas pomiaru oraz zależność wyniku od osoby wykonującej pomiar [11].

Metody automatycznej oceny porowatości powierzchni wykorzystują komputerową analizę obrazu [12 ÷ 20]. Największym wyzwaniem przy ich stosowaniu jest prawidłowe oddzielenie porów od tła. W tym celu stosuje się m.in. malowanie powierzchni zwiększające kontrast [12] oraz wykorzystuje cień rzucany przez słońce lub sztuczne źródła oświetlenia [13 ÷ 18]. Przy takim podejściu liczba zidentyfikowanych porów może być zależna od warunków oświetlenia, szczególnie kiedy kąt padania światła jest niewielki, a dno pustek powietrznych jest tak samo oświetlone jak powierzchnia betonu. Istotnym czynnikiem, który może wpłynąć na wynik pomiaru, jest także algorytm odróżniania porów od tła; autorzy najczęściej proponują różne algorytmy binaryzacji obrazu. W tabeli 2 przedstawiono wybrane cechy metod automatycznego zliczania porów, podawane przez różnych autorów. Należy zwrócić uwagę, że na końcowy wynik mogą mieć wpływ takie czynniki, jak kolor czy chropowatość powierzchni, ale w żadnej z analizowanych publikacji nie brano tych czynników pod uwagę.

Table 2. Comparison of selected features of automatic pore counting methods (N/A) – no information on this topic)

Tabela 2. Zestawienie wybranych cech metod automatycznego zliczania porów (b/d – brak informacji na ten temat)

Reference/ Pozycja w literaturze	Pre-processing/ Obróbka wstępna	Pore Segmentation Method/ Sposób odróżniania porów od powierzchni	Binarization Algorithm/ Algorytm binaryzacji	Image Acquisition Conditions/Warunki fotografowania
12	noise reduction/redukcja szumów	surface painting/malowanie powierzchni	global thresholding/progowanie globalne	N/A/b/d
13	noise reduction, median filter/redukcja szumów, filtr Median	shadow using standard D65 light source/cień przy użyciu standardowego źródła światła D65	Maximum Entropy algorithm, opening, convex filter/algorytm Maximum Entropy, otwarcie, filtr convex	N/A/b/d
14	erosion, dilation, opening, closing/erozja, dyfuzja, otwarcie, zamknięcie	shadow/cień	combined local and global thresholding (including OTSU 11 x 11)/algorytm łączący progowanie lokalne i globalne (w tym OTSU 11 x 11)	Nikon (D1X) with NIKKOR AF-S lens/Nikon (D1X) z obiektywem NIKKOR AF-S
15	contrast enhancement/wzmocnienie kontrastu	shadow/cień	OTSU	image acquisition distance 40 cm/odległość fotografowania 40 cm
16	Gabor filter/filtr Gabora	shadow/cień	N/A/b/d	Canon EOS M10 and Nikon D5100
17	N/A/b/d	shadow under ambient light/cień w świetle zastanym	N/A/b/d	image acquisition distance 500 mm/odległość fotografowania 500 mm
18	N/A/b/d	shadow under ambient light/cień w świetle zastanym	N/A/b/d	iPhone X, image area (m ²) 0.01 m ² / iPhone X, powierzchnia obrazu (m ²) 0,01
19	Wiener filter, bottom-hat filtering, contrast adjustment/filtr Wiener, filtrowanie bottom-hat, wzmacnienie kontrastu	shadow/cień	N/A/b/d	N/A/b/d
20	noise reduction, Median filter/redukcja szumów, filtr Median	N/A/b/d	Niblack	Canon EOS 60D DSLR, focal length 55 mm/Canon EOS 60D DSLR, ogniskowa 55 mm

Research Device

To ensure the intended, repeatable lighting conditions during measurements, the use of a custom-designed DARK-BOX device was proposed. It consists of a box painted black on the inside (Figure 1). Lamps are mounted inside, enabling control over the lighting conditions. One of the device's walls is open, with a digital camera mounted on the opposite wall. Additionally, the edges of the open wall that come into contact with the concrete surface are equipped with a gasket to minimize the amount of light entering the device through gaps between the examined surface and the edges of the research device. The camera was tested for image distortion. It was found that, within the central area of the image corresponding to a 15 cm x 15 cm surface, the level of image distortion is negligible.

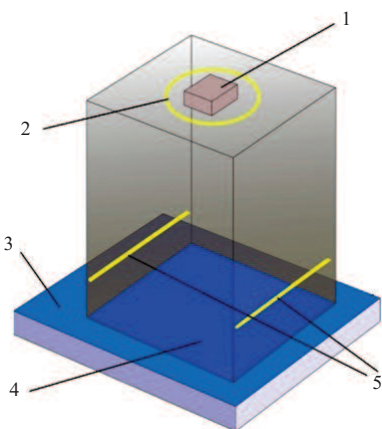


Fig. 1. Schematic diagram of the research device: 1 – image capturing camera; 2 – top lamps; 3 – examined surface; 4 – device walls covered with black, matte paint; 5 – side lamps

Rys. 1. Schemat poglądowy budowy urządzenia badawczego: 1 – aparat rejestrujący obraz; 2 – oświetlenie górne; 3 – badana powierzchnia; 4 – ściany urządzenia pokryte czarną, matową farbą; 5 – oświetlenie boczne

Examined Surfaces

To determine the applicability of the proposed research method, numerous model surfaces were created, possessing standardized characteristics such as porosity, roughness, and color. This standardization allowed for examining the dependence of porosity measurement results on surface color and roughness.

The model surfaces were fabricated using 2 mm thick plexiglass sheets. Each sheet contained four test surfaces, each measuring 15 cm x 15 cm. First of all, depending on the specific variant, sandpaper with a grit of P40, P80, or P120 was applied to these surfaces to simulate varying degrees of roughness. In some cases, the surface was left smooth. Subsequently, holes with diameters of 1 mm, 2 mm, and 4 mm were drilled into the sheets in various combinations. Finally, the surfaces were painted in one of two colors: light gray or dark gray. The sandpaper types were selected so that their roughness was significantly greater than that of a smooth architectural concrete surface. Additionally, two printed circuit boards commonly used in the electronics industry (R1 and R2) were included in the study. Figure 2 shows examples of the model surfaces used in the research, while Table 3 provides a list of all prepared model surfaces.

The described approach to preparing model surfaces provides full control over key surface characteristics such as

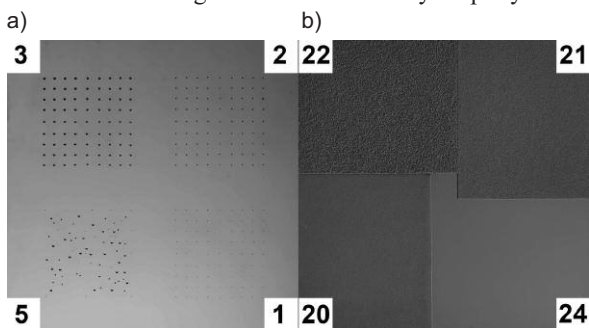


Fig. 2. Exemplary model surfaces used in the study: a) a light gray plate containing model surfaces no. 1, 2, 3, and 5; b) a dark gray plate containing surfaces no. 20, 21, 22, and 24

Rys. 2. Przykładowe płyty użyte w badaniach: a) płyta jasnoszara zawierająca powierzchnie modelowe nr 1, 2, 3 i 5; b) płyta ciemnoszara zawierająca powierzchnie nr 20, 21, 22 i 24

Urządzenie do badań

W celu zapewnienia założonych, powtarzalnych warunków oświetleniowych podczas pomiarów zaproponowano zastosowanie autorskiego urządzenia DARK-BOX. Składa się ono ze skrzynki pomalowanej z wewnętrznej strony na kolor czarny (rysunek 1). Wewnątrz zamontowano lampy pozwalające na kontrolę warunków oświetleniowych. Jedna ze ścian urządzenia jest otwarta, a na przeciwległej zamontowano aparat fotograficzny. Dodatkowo, krawędzie otwartej ścianki, które stykają się z powierzchnią betonu, wyposażono w uszczelkę w celu minimalizacji ilości światła przedostającego się do wnętrza urządzenia przez szczeliny między badaną powierzchnią a krawędziami urządzenia badawczego. Aparat został przebadany pod kątem dystorsji obrazu. Ustalono, że na centralnym obszarze zdjęcia, odpowiadającym powierzchni o wymiarach 15 x 15 cm, poziom dystorsji obrazu jest pomijalny.

Badane powierzchnie

W celu określenia przydatności proponowanej metody badawczej wykonano wiele powierzchni modelowych posiadających ustandaryzowane cechy, takie jak porowatość, chropowatość oraz kolor, aby móc sprawdzić zależność wyników pomiaru porowatości od kolorystyki oraz chropowatości powierzchni.

Powierzchnie modelowe wykonano z płyty pleksi o grubości 2 mm. Na każdej płycie znalazły się 4 badane powierzchnie o wymiarach 15 x 15 cm. W pierwszej kolejności, w zależności od wariantu, został na nie nałożony papier ścierny o gramaturze P40, P80 lub P120 symulujący powierzchnie o różnej chropowatości, bądź pozostawiono powierzchnię gładką. Następnie w płytach wywiercono otwory o średnicy 1, 2 i 4 mm w różnych kombinacjach. Na koniec powierzchnie zostały pomalowane na jeden z dwóch kolorów – jasnoszary lub ciemnoszary. Papiery ściernie dobrano tak, aby ich chropowatość była zauważalnie większa od chropowatości powierzchni gładkiej betonu architektonicznego. Dodatkowo w badaniach zastosowano dwie płytki drukowane używane w przemyśle elektronicznym (R1 i R2). Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe płyty modelowe użyte podczas badań, a wykaz wszystkich przygotowanych powierzchni modelowych w tabeli 3.

Zastosowanie opisanego podejścia do przygotowania powierzchni modelowych zapewnia pełną kontrolę nad kluczowymi cechami powierzchni, takimi jak chropowatość, porowatość oraz kolorystyka. Pozwala to

Table 3. Summary of prepared model surfaces
Tabela 3. Zestawienie przygotowanych powierzchni modelowych

Sample No./Nr próbki	Texture class/Klasa faktury	Color/Kolor	Holes/Otwory	Surface/Powierzchnia
1	1	light grey/jasnoszary	1 mm	smooth/gładka
2	1	light grey/jasnoszary	2 mm	smooth/gładka
3	1	light grey/jasnoszary	4 mm	smooth/gładka
4	1	light grey/jasnoszary	mix 1	smooth/gładka
5	1	light grey/jasnoszary	mix 2	smooth/gładka
6	1	dark grey/ciemnoszary	1 mm	smooth/gładka
7	1	dark grey/ciemnoszary	2 mm	smooth/gładka
8	1	dark grey/ciemnoszary	4 mm	smooth/gładka
9	1	dark grey/ciemnoszary	mix 1	smooth/gładka
10	1	dark grey/ciemnoszary	mix 2	smooth/gładka
11	2	light grey/jasnoszary	mix 1	sandpaper P120/papier P120
12	3	light grey/jasnoszary	mix 1	sandpaper P80/papier P80
13	4	light grey/jasnoszary	mix 1	sandpaper P40/papier P40
14	2	dark grey/ciemnoszary	mix 1	sandpaper P120/papier P120
15	3	dark grey/ciemnoszary	mix 1	sandpaper P80/papier P80
16	4	dark grey/ciemnoszary	mix 1	sandpaper P40/papier P40
17	2	light grey/jasnoszary	none/brak	sandpaper P120/papier P120
18	3	light grey/jasnoszary	none/brak	sandpaper P80/papier P80
19	4	light grey/jasnoszary	none/brak	sandpaper P40/papier P40
20	2	dark grey/ciemnoszary	none/brak	sandpaper P120/papier P120
21	3	dark grey/ciemnoszary	none/brak	sandpaper P80/papier P80
22	4	dark grey/ciemnoszary	none/brak	sandpaper P40/papier P40
23	1	light grey/jasnoszary	none/brak	smooth/gładka
24	1	dark grey/ciemnoszary	none/brak	smooth/gładka
R1	1	light grey/jasnoszary	1,05 mm	smooth/gładka
R2	1	light grey/jasnoszary	0,65 mm	smooth/gładka

Oznaczenia
Texture classes/Klasa faktury:

1 – smooth surface with fine paint texture/powierzchnia gładka z drobną fakturą farby; 2 – lightly roughened surface (P120 grit sandpaper)/powierzchnia lekko chropowata (papier ścierny gradacji P120); 3 – moderately roughened surface (P80 grit sandpaper)/powierzchnia średnio chropowata (papier ścierny gradacji P80); 4 – heavily roughened surface (P40 grit sandpaper)/powierzchnia mocno chropowata (papier ścierny gradacji P40)

Holes/Otwory:

- 1 mm: 81 holes with a diameter of 1 mm, evenly spaced with approximately 1.75 mm between centers/1 mm – 81 otworów o średnicy 1 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm;
- 2 mm: 81 holes with a diameter of 2 mm, evenly spaced with approximately 1.75 mm between centers/2 mm – 81 otworów o średnicy 2 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm;
- 4 mm: 81 holes with a diameter of 4 mm, evenly spaced with approximately 1.75 mm between centers/4 mm – 81 otworów o średnicy 4 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm;
- Mix 1: 27 holes each with diameters of 1 mm, 2 mm, and 4 mm, evenly spaced with approximately 1.75 mm between centers/Mix1 – po 27 otworów o średnicy 1 i 4 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm;
- Mix 2: 27 holes each with diameters of 1 mm, 2 mm, and 4 mm, irregularly spaced/Mix2 – po 27 otworów o średnicy 1, 2 i 4 mm w nieregularnych odstępach;
- 1.05 mm: 1782 holes with a diameter of 1.05 mm, evenly spaced between centers/1,05 mm – 1782 otwory o średnicy 1,05 mm w regularnych odstępach między środkami;
- 0.65 mm: 2788 holes with a diameter of 0.65 mm, evenly spaced between centers/0,65 mm – 2788 otworów o średnicy 0,65 mm w regularnych odstępach między środkami

roughness, porosity, and color. This enables the conduction of objective verification tests, eliminating the influence of potential interferences that may occur when examining actual concrete surfaces.

Pore Counting Algorithm

The primary task of the image analysis algorithms employed in the proposed method (Figure 3) is to separate the pore areas from the background so that pixels corresponding to pores are assigned a value of 1 (black), and background pixels are assigned a value of 0 (white). To achieve this, local thresholding (Figure 3, point 2) is applied, followed by erosion (Figure 3,

na przeprowadzenie obiektywnych badań weryfikacyjnych, eliminując wpływ potencjalnych zakłóceń, które mogą wystąpić w przypadku badania rzeczywistych powierzchni betonowych.

Algorytm zliczania porów

Podstawowym zadaniem algorytmów analizy obrazu użytych w proponowanej metodzie (rysunek 3) jest oddzielenie powierzchni porów od tła, tak aby piksele odpowiadające porom przyjęły wartość 1 (kolor czarny), a tło wartość 0 (kolor biały). Aby tego dokonać, zdecydowano się na zastosowanie operacji progowania lokalnego (rysunek 3 pkt 2), a następnie operacji erozji (rysunek 3 pkt 3), czyli usuwania pikseli brzeżo-

point 3), which involves removing edge pixels. Subsequently, elements below a specified size are eliminated (Figure 3, point 4). The final step is image dilation (Figure 3, point 5), which involves adding pixels to the edges of objects to restore the size of objects that may have been reduced during erosion. These operations are performed to achieve the most faithful representation of the pores and to remove potential noise caused by factors such as surface irregularities.

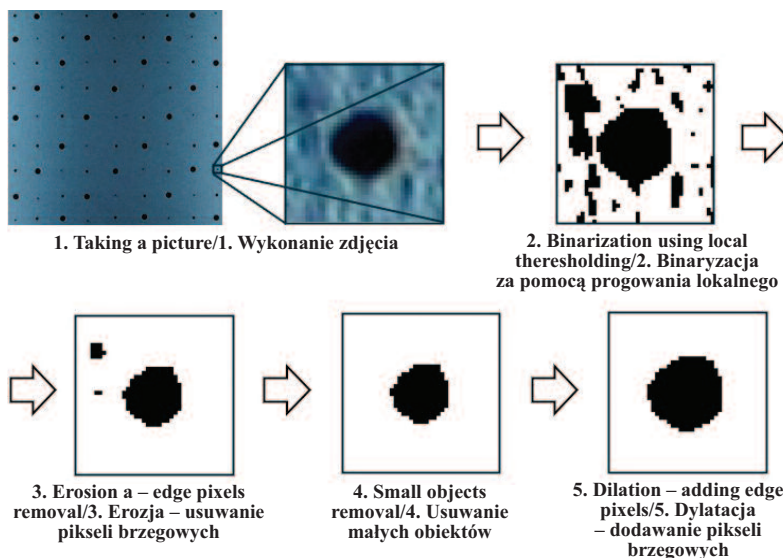


Fig. 3. Diagram of the proposed algorithm for concrete surface porosity assessment
Rys. 3. Schemat proponowanego algorytmu oceny porowatości powierzchniowej betonu

wych. W dalszej kolejności usuwane są elementy poniżej określonej wielkości (rysunek 3 pkt 4). Ostatnim krokiem jest operacja dyfuzji obrazu (rysunek 3 pkt 5), czyli dodawania pikseli na brzegach obiektów, tak aby odtworzyć wielkość obiektów pomniejszonych podczas erozji. Operacje te wykonywane są, aby jak najwierniej odwzorować obraz porów oraz usunąć ewentualny szum spowodowany m.in. nierównościami powierzchni.

A crucial aspect was the selection of an appropriate binarization algorithm, as well as determining the size of the structuring element used in erosion and dilation operations, and defining the size threshold for objects to be removed before dilation. Considering that under side lighting conditions, the concrete surface will not be illuminated with uniform intensity, it was decided to utilize local thresholding algorithms in which the threshold value is based on the local, rather than global, image brightness. This approach enables porosity analysis even in cases where discolorations are present on the concrete surface. The study investigated the suitability of the following local thresholding algorithms available in the literature: Niblack [21], Sauvola [22], Local Otsu [23], Bernsen [24], Feng [25], Singh [26], Contrast [27], and Bradley Roth [28].

Istotnym aspektem było właściwe dobranie algorytmu binaryzacji, a także określenie wielkości elementu strukturalnego użytego przy operacjach erozji i dyfuzji oraz określenie wielkości obiektów, które będą usuwane przed operacją dyfuzji. Biorąc pod uwagę fakt, iż w warunkach oświetlenia boczego powierzchnia betonu nie będzie oświetlona z takim samym natężeniem w każdym miejscu, zdecydowano się na zastosowanie algorytmów progowania lokalnego, w których próg odcięcia ustalany jest na podstawie lokalnej, a nie globalnej jasności obrazu. Dzięki temu analiza porowatości może być prowadzona także w przypadku wystąpienia przebarwień na powierzchni betonu. W ramach badań sprawdzono przydatność następujących algorytmów progowania lokalnego dostępnych w literaturze: Niblack [21]; Sauvola [22]; Local Otsu [23]; Bernsen [24]; Feng [25]; Singh [26]; Contrast [27]; Bradley Roth [28].

Description of the Research Program Stages

The objective of the conducted research was to determine whether the proposed evaluation method could accurately determine the percentage content of pores with a size of at least 1 mm on the surface of smooth architectural concrete, minimizing the influence of surface roughness and color. Subsequent stages of the research program investigated various combinations of algorithms and parameters to achieve the desired outcome. Figure 4 illustrates the successive stages of the research program.

Opis etapów programu badawczego

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie, czy za pomocą zaproponowanej metody oceny możliwe jest prawidłowe określenie procentowej zawartości porów o wielkości co najmniej 1 mm na powierzchni gładkiego betonu architektonicznego, tak aby wpływ chropowatości i kolorystyki powierzchni był pomijalnie mały. W kolejnych etapach programu badawczego sprawdzono różne kombinacje algorytmów i wag, aby uzyskać oczekiwany rezultat. Na rysunku 4 przedstawiono kolejne etapy programu badawczego.

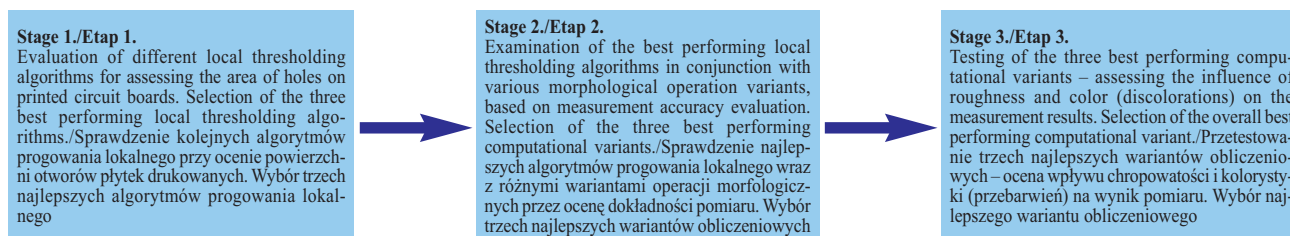


Fig. 4. Subsequent stages of the research program
Rys. 4. Kolejne etapy programu badawczego

The relative error of measurement was chosen as the accuracy metric. It represents the ratio of the difference between the measured value and the true value to the true value, expressed as a percentage. The relative error allows for assessing the degree to which measured values deviate from true values. The smaller the relative error, the greater the measurement accuracy. The relative error can be expressed using the following formula:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \frac{|x - x_0|}{x} \cdot 100\%$$

where: X – true value; X₀ – measured value

Research Results

Stage I. The first stage of the research involved evaluating individual local thresholding algorithms. The assessment focused on determining the measurement accuracy by calculating the relative error. Additionally, it was verified whether only the hole areas were segmented as black and if all holes remained visible after the binarization operation. The analysis was performed on two samples, R1 and R2 (Table 3). Seven images were taken of each surface, and subsequently, each image underwent image analysis using eight different algorithms. Figure 5 presents examples of image binarization of the printed circuit board using three algorithms. Table 4 summarizes the results obtained using the analyzed algorithms.

The smallest relative errors were obtained using the Sauvola, Feng, and Bradley Roth algorithms, with values of 6.82%, 10.38%, and 18.19%, respectively. Moreover, when applying these algorithms, no background elements were erroneously segmented as pores, and all holes were successfully identified. Therefore, the Sauvola, Feng, and Bradley Roth algorithms were selected for further investigation in the subsequent research stage.

Stage II. In the second stage, the performance of 24 computational variants was assessed using seven images of model surface no. 4. The study aimed to determine whether each variant could correctly identify all holes on the examined surface. The computational variants differed in the applied binarization algorithm and the size and shape

Jako miarę dokładności przyjęto błąd względny pomiaru. Jest to stosunek różnicy między wartością zmierzona a rzeczywistą do wartości rzeczywistej, wyrażony w skali procentowej. Błąd względny pozwala ocenić, w jakim stopniu wartości zmierzone różnią się od wartości rzeczywistych. Im mniejszy jest błąd względny, tym większa dokładność pomiaru. Błąd względny można wyrazić następującym wzorem:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \frac{|x - x_0|}{x} \cdot 100\%$$

gdzie: X – wartość rzeczywista; X₀ – wartość zmierzona.

Wyniki badań

Etap I. W ramach pierwszego etapu oceniono poszczególne algorytmy progowania lokalnego. Ocena polegała na sprawdzeniu dokładności pomiaru przez obliczenie błędu względnego, a także sprawdzeniu, czy zacerniona zostanie tylko powierzchnia otworów oraz czy wszystkie otwory pozostaną widoczne po operacji binaryzacji. Analizy przeprowadzono na dwóch próbkach, R1 i R2 (tabela 3). Wykonano siedem zdjęć każdej powierzchni, a następnie każde zdjęcie zostało poddane analizie obrazu z wykorzystaniem ośmiu algorytmów.

Na rysunku 5 przedstawiono przykłady binaryzacji obrazu płytki drukowanej trzema algorytmami, a w tabeli 4 wyniki uzyskane z zastosowaniem analizowanych algorytmów.

Najmniejszy błąd względny uzyskano z zastosowaniem algorytmów Sauvola, Feng oraz Bradley Roth, odpowiednio: 6,82; 10,38 i 18,19. Ponadto, w przypadku zastosowania wymienionych algorytmów zacernieniu nie uległy elementy tła, a zacernione zostały wszystkie otwory. W następnym etapie badań zostały więc wykorzystane algorytmy Sauvola, Feng oraz Bradley Roth.

Etap II. W etapie drugim oceniono działanie 24 wariantów obliczeniowych na siedmiu obrazach powierzchni modelowej nr 4. Badano, czy dany wariant prawidłowo zaznacza wszystkie otwory na badanej powierzchni. Poszczególne warianty obliczeniowe różniły się zastosowanym algorytmem binaryzacji oraz wielkością i kształtem elementów strukturalnych użytych przy operacjach morfologicznych. Na rysunku 6 pokazano efekty zastosowania poszczególnych wariantów

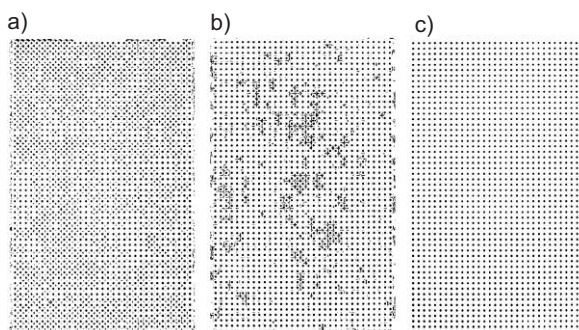


Fig. 5. Examples of binarization using different algorithms on the R1 model surface image with holes of approximately 1.05 mm in diameter: a) Local Otsu algorithm; b) Contrast algorithm; c) Sauvola algorithm

Rys. 5. Przykłady binaryzacji różnymi algorytmami powierzchni modelowej R1 z otworami o średnicy ok. 1,05 mm: a) Algorytm Local Otsu; b) Algorytm Contrast; c) Algorytm Sauvola

Table 4. Results of preliminary porosity tests

Tabela 4. Wyniki wstępnych badań porowatości

Algorithm/ Algorytm	Max relative error [%]/ Max błąd względny [%]	Blackeden/Zacerniona	
		only hole area (surface R1/R2)/ tylko powierzchnia otworów (powierzchnia R1/R2)	all holes (surface R1/R2)/ wszystkie otwory (powierzchnia R1/R2)
Niblack	23,902	NO/NO/NIE/NIE	YES/YES/TAK/TAK
Sauvola	6,819	YES/YES/TAK/TAK	YES/YES/TAK/TAK
Local Otsu	20,580	NO/NO/NIE/NIE	YES/YES/TAK/TAK
Bernsen	27,308	NO/YES/NIE/TAK	YES/NO/TAK/NIE
Feng	10,376	YES/YES/TAK/TAK	YES/YES/TAK/TAK
Singh	99,573	NO/NO/NIE/NIE	NO/NO/NIE/NIE
Contrast	24,022	NO/NO/NIE/NIE	YES/YES/TAK/TAK
Bradley Roth	18,193	YES/YES/TAK/TAK	YES/YES/TAK/TAK

of the structuring elements used in the morphological operations. Figure 6 illustrates the results of applying the individual computational variants to the model surface.

By analyzing the thresholding results presented in Figure 6, it was determined that only the variants based on the Sauvola algorithm correctly identified all holes. In the case of larger holes (4 mm and 2 mm), the Bradley Roth and Feng algorithms only marked the edges, which was insufficient for the purpose of the proposed method. Therefore, only the computational variants employing the Sauvola thresholding algorithm were selected for further analysis.

The measurement accuracy analysis was conducted on five model surfaces, with pores added digitally in four variations, each resulting image underwent statistical analysis. The smallest relative error, indicating the highest measurement accuracy, was obtained for the following computational variants:

- **W1:** Sauvola thresholding algorithm → erosion using a square structuring element with a side length of 2 pixels, repeated 8 times → removal of elements smaller than 10 pixels → dilation using a square structuring element with a side length of 2 pixels, repeated 8 times;

- **W2:** Sauvola thresholding algorithm → erosion using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels → removal of elements smaller than 8 pixels → dilation using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels;

- **W3:** Sauvola thresholding algorithm → erosion using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels → removal of elements smaller than 10 pixels → dilation using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels.

Stage IIIa – impact of discolorations. In Stage III, the impact of discolorations on the porosity measurement results was examined first. The investigation involved taking seven photographs of each of the 22 model surfaces and then comparing the calculated pore area with the results for the same surface to which discoloration was added in the form of two horizontal bands. A comparison of an exemplary pair of surfaces can be found in Figure 7.

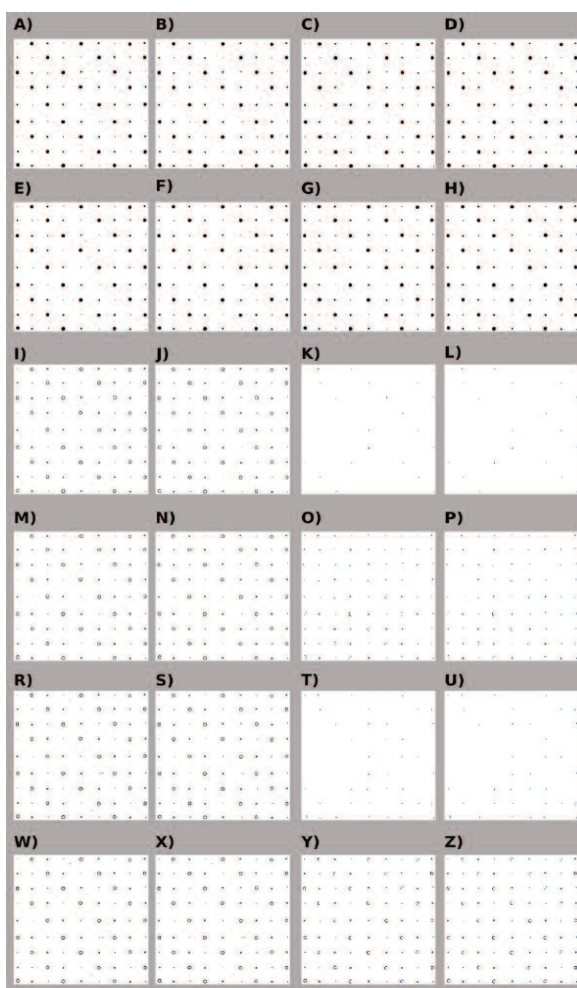


Fig. 6. Images of model surface no. 4 after transformation using different binarization algorithm variants: A) – H) – computational variants based on the Sauvola algorithm; I) – P) – computational variants based on the Bradley Roth algorithm; R) – Z) – computational variants based on the Feng algorithm

Rys. 6. Obrazy powierzchni modelowej nr 4 po przekształceniu różnymi wariantami algorytmu binaryzacji: A) – H) – warianty obliczeniowe oparte na algorytmie Sauvola; I) – P) – warianty obliczeniowe oparte na algorytmie Bradley Roth; R) – Z) – warianty obliczeniowe oparte na algorytmie Feng

- o średnicy 8 pikseli → usuwanie elementów mniejszych niż 8 pikseli → dylatacja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli;

- **W3:** algorytm progowania Sauvola → erozja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli → usuwanie elementów mniejszych niż 10 pikseli → dylatacja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli.

Etap IIIa – wpływ przebarwień. W etapie III w pierwszej kolejności sprawdzono wpływ przebarwień na wynik pomiaru porowatości. Badanie polegało na wykonaniu siedmiu zdjęć każdej z 22 powierzchni modelowych, a następnie porównaniu obliczonej powierzchni porów z wynikami dla tej samej powierzchni, do której dodano przebarwienia w formie dwóch poziomych pasów. Porównanie przykładowej pary powierzchni znajduje się na rysunku 7.

obliczeniowych na powierzchni modelowej.

Analizując wyniki progowania przedstawione na rysunku 6, stwierdzono, że jedynie warianty obliczeniowe algorytmu Sauvola prawidłowo zakwalifikowały wszystkie otwory. W przypadku większych otworów (4 i 2 mm), algorytmy Bradley Roth i Feng zaznaczyły jedynie krawędzie, co jest niewystarczające z punktu widzenia proponowanej metody. Z tego powodu do dalszych badań wybrano wyłącznie warianty obliczeniowe bazujące na algorytmie progowania Sauvola.

Analiza dokładności pomiaru przeprowadzona została na pięciu powierzchniach modelowych, do których dodano komputerowo pory w czterech wariantach, a następnie każdy uzyskany obraz poddano analizie statystycznej. Najmniejszy błąd względny, wskazujący na największą dokładność pomiaru, uzyskano w przypadku następujących wariantów obliczeniowych:

- **W1:** algorytm progowania Sauvola → erozja kwadratowym elementem strukturalnym o boku 2 pikseli powtórzona 8 razy → usuwanie elementów mniejszych niż 10 pikseli → dylatacja kwadratowym elementem strukturalnym o boku 2 pikseli powtórzona 8 razy;

- **W2:** algorytm progowania Sauvola → erozja elementem strukturalnym w kształcie koła

All computational variants yielded similar results. For surfaces with texture class 1 and 2, the relative error did not exceed 1% – 0.779% for computational variant no. 1, 0.841% for variant no. 2, and 0.776% for variant no. 3, respectively. For surfaces with texture class 3, the obtained results exceeded 10% for each variant, while for class 4, the maximum error ranged from approximately 3% to approximately 4.5%, depending on the variant.

Stage IIIb – impact of roughness. Concurrently, the influence of roughness on the measurement results was investigated. For this purpose, pores were digitally added to the light gray model surfaces with varying roughness classes but lacking pores (17, 18, 19, 23) and to analogous dark gray model surfaces (20, 21, 22, 24). 7 images were captured for each surface. Subsequently, for each color, the calculated pore area on surfaces with a given roughness level was compared to the calculated number of pores on smooth surfaces. Table 5 presents the results, expressed as the relative error between the number of black pixels on the smooth surface and surfaces with varying roughness, categorized by texture class as defined in Table 2.

Table 5. Effect of surface roughness on porosity measurements for light and dark gray surfaces

Tab. 5. Wpływ chropowatości na wyniki pomiarów porowatości powierzchni jasno- i ciemnoszarych

Surface color/ Kolor powierzchni	Hole diameter [mm]/ Średnica otworów [mm]	Variant no./ Nr wariantu obliczonego	Relative error [%]/Błąd względny [%]		
			(surface texture class 2)/ (powierzchnia klasy faktury 2)	(surface texture class 3)/ (powierzchnia klasy faktury 3)	(surface texture class 4)/ (powierzchnia klasy faktury 4)
Light gray/Jasnoszary	1	W1	9,229	20,531	5857,975
Light gray/Jasnoszary	2	W1	1,851	8,562	4190,941
Light gray/Jasnoszary	4	W1	0,955	6,085	3461,558
Dark gray/Ciemnoszary	1	W1	11,648	96,031	11890,73
Dark gray/Ciemnoszary	2	W1	2,010	59,575	8515,434
Dark gray/Ciemnoszary	4	W1	0,631	46,625	7027,752
Light gray/Jasnoszary	1	W2	4,200	29,601	10803,740
Light gray/Jasnoszary	2	W2	1,516	20,594	8957,886
Light gray/Jasnoszary	4	W2	0,380	15,826	7381,709
Dark gray/Ciemnoszary	1	W2	6,550	586,094	17880,580
Dark gray/Ciemnoszary	2	W2	2,598	479,210	14814,320
Dark gray/Ciemnoszary	4	W2	0,791	393,269	12201,480
Light gray/Jasnoszary	1	W3	4,200	21,026	10332,800
Light gray/Jasnoszary	2	W3	1,516	13,647	8564,222
Light gray/Jasnoszary	4	W3	0,380	9,836	7056,849
Dark gray/Ciemnoszary	1	W3	6,550	449,036	17361,660
Dark gray/Ciemnoszary	2	W3	2,598	366,465	14383,680
Dark gray/Ciemnoszary	4	W3	0,791	299,213	11846,650

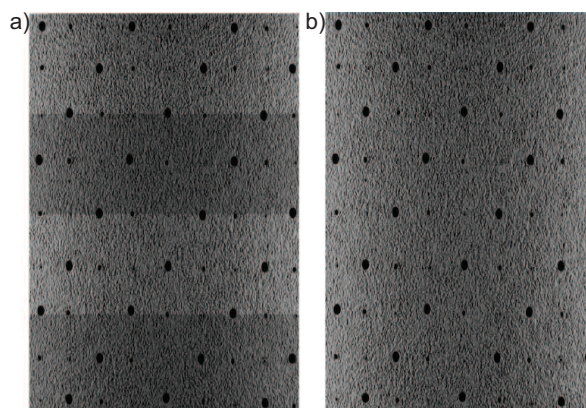


Fig. 7. Photograph of model surface no. 13: a) with digitally added discoloration; b) without discoloration

Rys. 7. Zdjęcie powierzchni modelowej nr 13: a) z komputerowo dodanymi przebarwieniami; b) bez przebarwień

We wszystkich wariantach obliczeniowych uzyskano zbliżone wyniki. W przypadku powierzchni klasy faktury 1 i 2, błąd względny nie przekroczył 1% – odpowiednio 0,779% w wariantcie obliczeniowym nr 1, 0,841% w wariantcie nr 2 i 0,776% w wariantcie nr 3. W powierzchniach klasy faktury 3 uzyskano wyniki przekraczające 10% w każdym z wariantów, a w przypadku klasy 4 maksymalny błąd wyniósł od ok. 3% do ok. 4,5% w zależności od wariantu.

Etap IIIb – wpływ chropowatości. Równolegle sprawdzono wpływ chropowatości na wynik pomiaru.

W tym celu dodano komputerowo pory do jasnoszarych powierzchni modelowych o różnej klasie chropowatości pozbawionych porów (17, 18, 19, 23) oraz analogicznych ciemnoszarych powierzchni modelowych (20, 21, 22, 24). Wykonano 7 zdjęć każdej powierzchni. Następnie w przypadku danego koloru porównano obliczoną powierzchnię porów na powierzchniach o danym poziomie chropowatości z obliczoną liczbą porów na powierzchniach gładkich. W tabeli 5 przedstawiono wyniki w postaci błędu względnego między liczbą czarnych pikseli na powierzchni gładkiej a powierzchniami o różnej chropowatości z podziałem na klasy faktury zgodnie z tabelą 2.

The impact of roughness on the results, expressed as the relative error between the number of black pixels on smooth surfaces and surfaces with varying roughness, was investigated separately for light gray and dark gray surfaces (Table 5). A smaller relative error indicates greater measurement accuracy.

Based on the analyzed computational variants, it was concluded that:

- the highest pore detection accuracy was achieved using variants based on the Sauvola algorithm, with variants W2 and W3 yielding the best results;

- in the investigation of discoloration influence on pore detection results on surfaces with texture class 1 and 2, all computational variants performed well (less than 1%). However, for texture classes 3 and 4, a significant decrease in measurement accuracy was observed. Marginally better results were obtained using variant W3 for surfaces with texture classes 1 and 2;

- in the investigation of roughness influence on pore detection results on surfaces with texture class 2, the highest accuracy was achieved using computational variants W2 and W3, with both variants yielding identical results. For surfaces with texture classes 3 and 4, all computational variants produced significantly larger errors compared to class 2.

Therefore, the best overall performance was achieved using variant W3, based on the Sauvola thresholding algorithm. This variant involves erosion using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels, followed by the removal of elements smaller than 10 pixels, and finally, dilation using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels. A limitation of the proposed method is its inability to assess pores with diameters below 1 mm. Additionally, the method is not suitable for surfaces with high roughness but performs well on surfaces with roughness not exceeding that of P120 grit sandpaper. Based on these findings, it was concluded that the method is suitable for assessing the porosity of smooth architectural concrete.

Summary

The conducted model studies demonstrate that the developed computer surface analysis method constitutes an effective tool for assessing the porosity of smooth architectural concrete surfaces. Employing model samples with controlled color and geometric surface structure parameters ensured that the obtained results are representative in the context of concrete surface evaluation.

The utilization of the custom-designed DARK-BOX device allowed for the elimination of the influence of variable lighting conditions, which constitutes a significant step towards enhancing measurement objectivity. The application of local thresholding algorithms and morphological operations proved effective in minimizing the impact of color and roughness on the analysis results.

The most suitable method for surface image analysis involves an algorithm based on Sauvola thresholding, followed by an erosion operation using a circular structuring element

Wpływ chropowatości na wyniki, wyrażony błędem względnym między liczbą czarnych pikseli na powierzchni gładkiej oraz o różnej chropowatości, zbadano osobno na powierzchniach jasno- i ciemnoszarych (tabela 5), a mniejszy błąd względny oznacza większą dokładność pomiaru.

Na podstawie analizowanych wariantów obliczeniowych stwierdzono, że:

- największą dokładność detekcji porów uzyskano z zastosowaniem wariantów obliczeniowych bazujących na algorytmie Sauvola, a najlepsze wyniki uzyskano w przypadku zastosowania wariantu W2 i W3;

- w badaniu wpływu przebarwień na wynik detekcji porów na powierzchniach w klasie faktury 1 i 2, wszystkie warianty obliczeniowe dały dobre wyniki (mniejsze niż 1%), natomiast w przypadku klas faktury 3 i 4 obserwuje się wyraźny spadek dokładności pomiaru. Nieznacznie lepsze wyniki uzyskano z zastosowaniem wariantu W3 w przypadku powierzchni o klasie faktury 1 i 2;

- w badaniu wpływu chropowatości na wynik detekcji porów na powierzchniach klasy faktury 2, największą dokładność uzyskano z zastosowaniem wariantów obliczeniowych W2 i W3; w obu uzyskano identyczne wyniki. W przypadku powierzchni klasy 3 i 4 wszystkie warianty obliczeniowe dały wielokrotnie większy błąd niż w klasie 2.

Najlepsze wyniki uzyskuje się więc w przypadku zastosowania wariantu W3, bazującego na algorytmie progowania Sauvola, po którym odbywa się operacja erozji za pomocą elementu strukturalnego w kształcie koła o średnicy 8 pikseli, usunięcie elementów o wielkości 10 pikseli, a następnie operacja dylatacji elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli. Ograniczeniem proponowanej metody jest brak możliwości oceny porów o średnicy mniejszej niż 1 mm. Dodatkowo, metoda nie może być stosowana na powierzchniach o dużej chropowatości, natomiast sprawdzi się na powierzchniach, których chropowatość nie przekracza chropowatości papieru o gramaturze P120. Na tej podstawie stwierdzono, że może być stosowana do oceny porowatości gładkiego betonu architektonicznego.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania modelowe wskazują, że opracowana komputerowa metoda analizy powierzchni stanowi efektywne narzędzie do oceny porowatości powierzchni gładkiego betonu architektonicznego. Wykorzystanie próbek modelowych o kontrolowanych parametrach kolorystyki i struktury geometrycznej powierzchni zapewniło, że uzyskane wyniki są reprezentatywne w kontekście oceny powierzchni betonu.

Zastosowanie autorskiego urządzenia DARK-BOX pozwoliło na wyeliminowanie wpływu zmiennych warunków oświetleniowych, co stanowi istotny krok w kierunku zwiększenia obiektywizmu pomiarów. Wykorzystanie algorytmów progowania lokalnego i operacji morfologicznych okazało się skuteczne w minimalizowaniu wpływu koloru i chropowatości na wynik analizy.

with a diameter of 8 pixels, removal of elements smaller than 10 pixels, and finally, a dilation using a circular structuring element with a diameter of 8 pixels.

The obtained results confirm the high potential of the developed method for assessing pore distribution. Further validation studies are planned on real concrete surfaces with varying texture, color, and porosity. This will enable confirmation of the method's universality and determine the influence of other factors (e.g., the presence of impurities or cracks) on measurement accuracy.

Received: 21.08.2024

Revised: 09.09.2024

Published: 22.10.2024

Najbardziej przydatną metodą analizy obrazu powierzchni jest algorytm bazujący na progowaniu Sauvola, po którym odbywa się operacja erozji za pomocą elementu strukturalnego w kształcie koła o średnicy 8 pikseli, usunięcie elementów o wielkości 10 pikseli, a następnie operacja dyfuzji elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli.

Uzyskane wyniki potwierdzają wysoki potencjał metody oceny rozkładu porów. Planowane jest przeprowadzenie dalszych badań walidacyjnych na rzeczywistych powierzchniach betonowych o zróżnicowanej fakturze, kolorze i porowatości. Pozwoli to na potwierdzenie uniwersalności metody i określenie wpływu innych czynników (np. obecności zanieczyszczeń czy zarysowań) na dokładność pomiaru.

Artykuł wpłynął do redakcji: 21.08.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.09.2024 r.

Opublikowano: 22.10.2024 r.

Literature

- [1] Jackiewicz-Rek W. Kształtowanie jakości gładkiego betonu architektonicznego. *Materiały Budowlane*. 2015; 24 – 25.
- [2] PTV 21-601 Elements Architectoniques et Industriels Prefabriques en Beton Decoratif. 2001.
- [3] AFNOR. Normes P18-503 Surfaces et parements de béton – Eléments d'identifications. 1989.
- [4] ÖNORM B 2211 Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten – Werkvertragsnorm. 2009.
- [5] LST 2015:2020 Surenkamieji betoniniai gaminiai. Paviršiaus išvaizdos charakteristikos ir jų tikrinimo metodai. 2020.
- [6] ДСТУБВ. 2.6-2:2009 ВИРОБИ БЕТОННИ І ЗАЛІЗОБЕТОННИ Загальні технічні умови. 2009.
- [7] CIB Report No.24 Concrete Surface Finishings – Tolerances on Blemishes of Concrete. 1973.
- [8] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. Sichtbeton. Exposed Concrete. 2008.
- [9] ACI 347.3R-13 Guide to Formed Concrete Surfaces. 2013.
- [10] Kuniczuk K. Beton architektoniczny. Wytoczne techniczne. *Polski Cement*; 2011.
- [11] Malisch W, Brown H. Examination and Evaluation of ACI 347.3R-13 Guide to Formed Concrete Surfaces. ACI Foundation; 2017.
- [12] Kwasny J, Sonebi M, Plasse J, Amziane S. Influence of rheology on the quality of surface finish of cement-based mortars. *Constr Build Mater*. 2015; 89: 102–109.
- [13] Lemaire G, Escadeillas G, Ringot E. Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. *Constr Build Mater*. 2005; 19: 604 – 611.
- [14] Lee BY, Kim J, Kim YY, Yi ST. A technique based on image processing for measuring cracks in the surface of concrete structures. *SMIRT 19*, Toronto; 2007.
- [15] Liu B, Yang T. Image analysis for detection of bugholes on concrete surface. *Constr Build Mater*. 2017; 137: 432 – 440.
- [16] Hoang ND, Nguyen QL. A novel approach for automatic detection of concrete surface voids using image texture analysis and history-based adaptive differential evolution optimized support vector machine. *Advances in Civil Engineering*. 2020; Article ID 4190682.
- [17] Yoshitake I, Maeda T, Hieda M. Image analysis for the detection and quantification of concrete bugholes in a tunnel lining. *Case Stud. Constr. Mater*. 2018; 8:116 – 130.
- [18] Wei F, Yao G, Yang Y, Sun Y. Instance-level recognition and quantification for concrete surface bughole based on deep learning. *Autom Constr*. 2019; 107.
- [19] da Silva WRL, Štemberk P. Expert system applied for classifying self-compacting concrete surface finish. *Adv Eng Softw*. 2013; 64: 47 – 61.
- [20] Liu Y, Cho S, Spencer B, Fan J. Automated assessment of cracks on concrete surfaces using adaptive digital image processing. *Smart Struct Syst*. 2014; 14: 719 – 741.
- [21] Niblack W. An introduction to digital image processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1986. pp. 115 – 116.
- [22] Sauvola J, Seppanen T, Haapakoski S, Pietikainen M. Adaptive document thresholding. *Proc. 4th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition*, Ulm, Germany. 1997. pp. 147 – 152.
- [23] Khairun S, Munadi K, Away Y, Arnia F. Improvement of binarization performance using local otsu thresholding. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2018.
- [24] Bernsen J. Dynamic thresholding of grey-level images. *Proc. of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition*. 1986.
- [25] Feng M-L, Tan Y-P. Contrast adaptive thresholding of low quality document images. *IEICE Electron. Express*. 2004;1(16): 501 – 506.
- [26] Singh O I, Sinam T, James O, Singh T R. Local contrast and mean based thresholding technique in image binarization. *International Journal of Computer Applications*. 2012; 51: 5 – 10.
- [27] Parker JR. Algorithms for image processing and computer vision. John Wiley & Sons. 2010.
- [28] Bradley D, Roth G. Adaptive thresholding using the integral image. *Journal of Graphics Tools*. 2007; 12(2): 13 – 21.