

## ZASTOSOWANIE PROSTYCH TECHNIK KOMPUTEROWEJ ANALIZY OBRAZU DO OCENY DETERIORACJI TRAWERTYNÓW Z HIERAPOLIS (TURCJA)

### APPLICATION OF SIMPLE COMPUTER IMAGE ANALYSIS METHODS FOR EVALUATION OF DETERIORATION OF TRAVERTINES FROM HIERAPOLIS (TURKEY)

ALICJA BOBROWSKA<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W artykule przedstawiono rezultaty badań struktury geometrycznej powierzchni porowej, powstałej w wyniku działania zamrozu, podwyższonej temperatury oraz krystalizacji soli, na próbkach trawertynu z czynnego kamieniołomu (HO) oraz z antycznego odsłonięcia (HA) w Hierapolis w Turcji. Przy użyciu metod komputerowej analizy obrazu fotograficznego przedstawiono technikę i metodologię ilościowej charakterystyki powstałej przestrzeni porowej, będącej efektem oddziaływania na skałę czynników degradujących.

**Słowa kluczowe:** analiza obrazu, deterioracja, trawertyn.

**Abstract.** The article presents the results of the research on the geometric structure of the distribution area, on travertine samples from the active quarry (HO) and from the ancient uneviling (HA) in Hierapolis (Turkey). Application of computer image analysis methods enabled to show technique and methodology of quantitative characteristics of the pore space formed by the action of rock freeze, high temperature and salt crystalization.

**Key words:** image analysis, deterioration, travertine.

## WSTĘP

Długotrwałe oddziaływanie otaczającego środowiska, powodujące pogorszenie jakości materiału skalnego w obiektach architektonicznych, określane jest jako proces deterioracji. Podatność kamienia na ten proces zależy od jego właściwości fizycznych, strukturalnych oraz wytrzymałościowych (Pinińska i in., 2009).

Trawertyn to porowata skała osadowa, powstająca przez wytrącanie się węglanu wapnia z wód źródłanych w wyniku chemicznej precypitacji, pod wpływem gwałtownego spadku ciśnienia i temperatury. Dzięki powszechnemu występowaniu w basenie Morza Śródziemnego była często stosowana jako materiał konstrukcyjny antycznych obiektów archi-

tektury greckiej i rzymskiej (Espinosa Marzal, Scherer, 2008). Jak każda skała, trawertyn podlega procesom deterioracji w stopniu zależnym od nasilenia destrukcyjnych czynników mechanicznych, chemicznych i biologicznych oraz czasu ich działania (Pinińska, 2008a, b).

Przeprowadzone badania miały na celu wykazanie za pomocą metod analizy obrazu, że rozwój przestrzeni porowej w trawertynie jest zależny od czynnika degradującego, silnie oddziaływującego na wewnętrzną strukturę skały. Zaś wzrost porowatości materiału skalnego w procesie deterioracji wpływa na obniżenie jego wytrzymałości.

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; a.bobrowska@uw.edu.pl

## METODYKA BADAŃ

**Badania odporności na deteriorację** wykonano na świeżym materiale skalnym pobranym z czynnego kamieniołomu oraz materiale pochodzącym z antycznego odsłonięcia w Hierapolis, w którym stwierdzono silnie zaawansowane procesy starzenia, porównywalne do stanu obserwowanego w sąsiadujących obiektach architektonicznych.

Podatność trawertynów na procesy deterioracji oparto na badaniach wytrzymałościowych próbek sezonowanych w różnych warunkach środowiskowych oraz mikroskopowych obserwacjach zmian ich struktury podczas sezonowania. Próbkę skalną z Hierapolis, o znanych parametrach początkowych, sezonowano w warunkach cyklicznego działania mrozu (25 cykli w temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$ ), cyklicznego działania podwyższonej temperatury (15 cykli w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$ ) oraz cyklicznego działania roztworu soli. W badaniach stosowano zalecenia normy PN-85/B-04102 oraz PN-EN 12370:2001.

**Analiza makroskopowa i mikroskopowa materiału skalnego.** Makroskopowo badane trawertyny charakteryzowała drobnokrystaliczna budowa szkieletu skalnego z wyraźnymi porami i kawernami o lokalnych obwódkach kalcytowych. Z mikroskopowej analizy płytek cienkich oraz badań w elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM) wynika, że w świeżym materiale z Hierapolis (HO) nieregularne makropory zajmują około 20% obrazu, podczas gdy w zwiędłym materiale ponad 30% (fig. 1).

**Właściwości mechaniczne próbek skalnych.** Struktura trawertynu niszczy się wskutek następujących po sobie wielu procesów deterioracji, takich jak: powiększanie się porów, zasklepianie oraz ługowanie wtórnych wypełnień. W ślad za deterioracją struktury następuje obniżenie wytrzymałości na ściskanie ( $R_c$ ). Finalna wytrzymałość na ściskanie po 25 cyklach zamrażania w trawertynach świeżych z Hierapolis (HO) obniża się średnio o 25%, zaś w trawertynach zwiędłych z antycznego kamieniołomu z Hierapolis (HA) o ponad 50%. Pod wpływem wysokich temperatur wytrzymałość ( $R_c$ ) w materiale świeżym (HO) obniża się o 20% oraz około 55% w materiale antycznym, zwiędłym (HA). Krystalizująca z roztworu sól obniża wytrzymałość ( $R_c$ ) trawertynów z Hierapolis (HO) o blisko 16%, a w antycznym materiale o 35% (Marini, Bellopede, 2010; Pinińska i in., 2010).

**Przestrzeń porowa.** Pole powierzchni przekroju poprzecznego porów powstałych wskutek deterioracji określono po badaniach wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, po zakończeniu sezonowania. Przestrzeń porowatą obserwowano w płytkach cienkich, w których powstające pory zostały uczynione widzialnymi substancją barwiącą, wtłoczoną pod ciśnieniem w próbkę (fig. 2).

Do **analizy obrazu** zastosowano program autorstwa Wayne'a Rasbanda – ImageJ. Program ten jest programem *freeware* pracującym w środowisku Java, wzorowany programem tego samego autora – NIH IMAGE. Stanowisko ba-

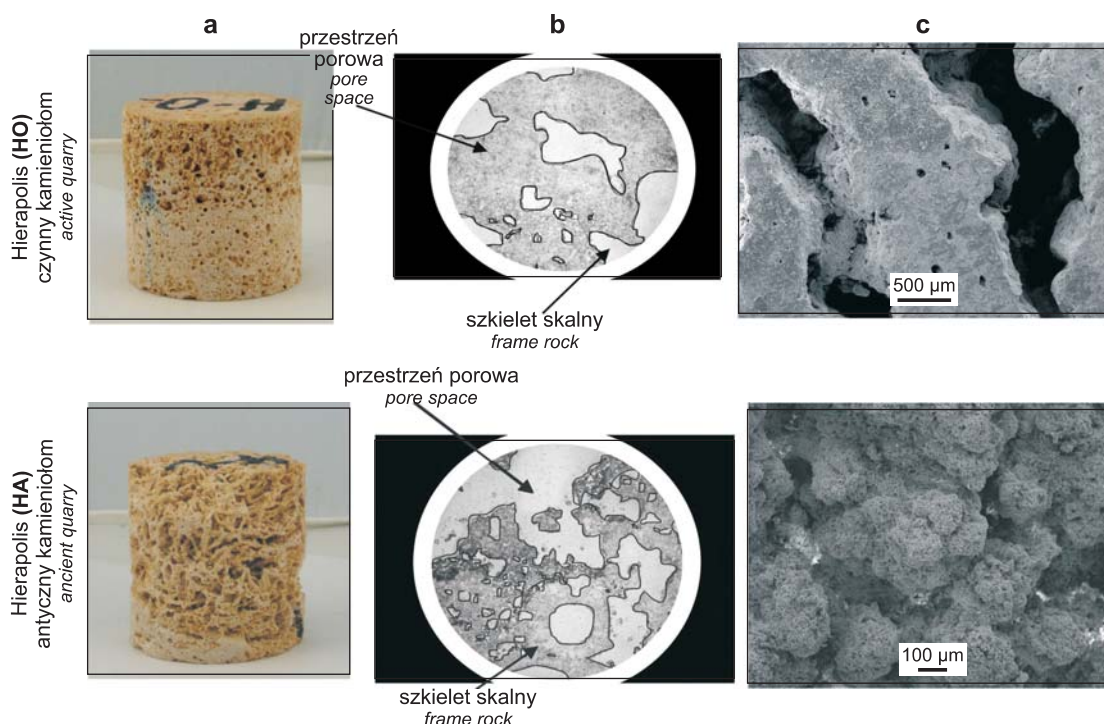
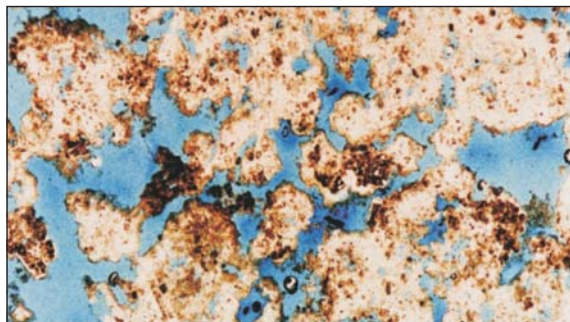


Fig. 1. Obraz makroskopowy (a), mikroskopowy (b) i skaningowy (c) struktury badanego materiału skalnego

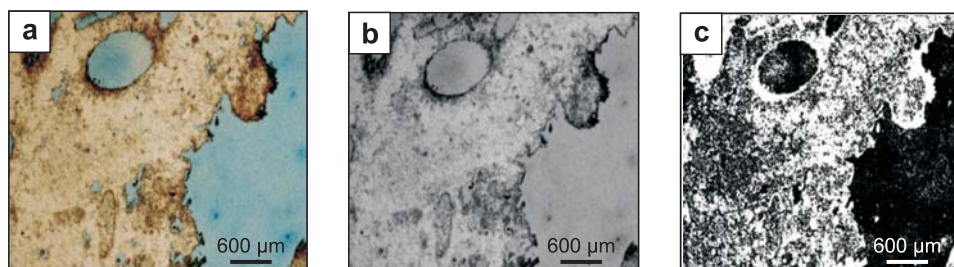
Picture of the macroscopic (a), microscopic (b) and scanning (c) structure of tested rock



**Fig. 2.** Płytkę cienką z próbki poddanej badaniu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, wypełnioną substancją barwiącą

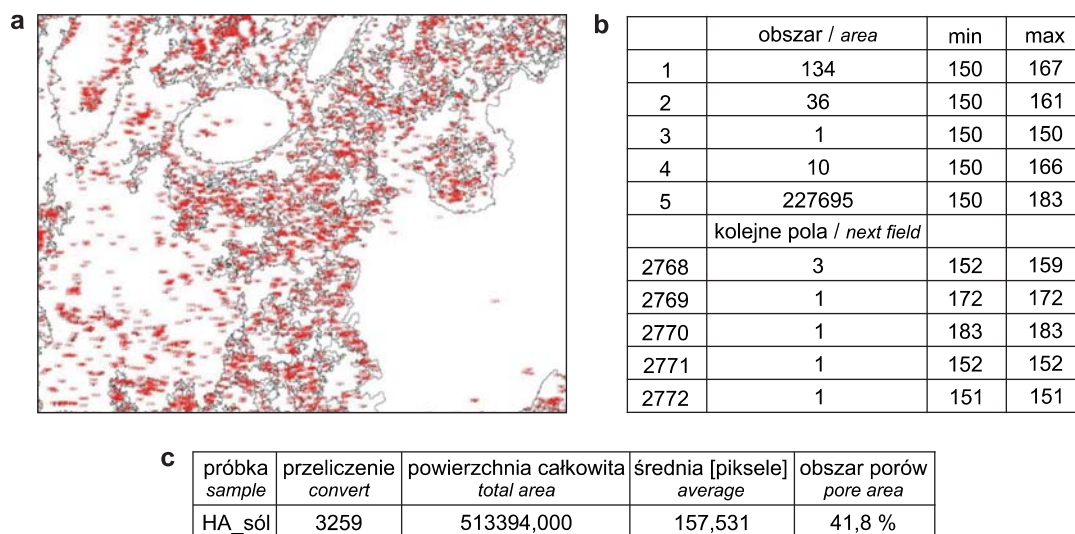
Thin-section of the sample tested on uniaxial compressive strength, filled with a staining substance

dawcze zbudowane było z mikroskopu Nikon ECLIPSE E200 oraz cyfrowego aparatu Sony DSC-S70. Na wstępie przeprowadzono akwizycję obrazu mikroskopowego w postaci cyfrowych zdjęć fotograficznych wykonywanych w wysokiej rozdzielczości aparatem zespolonym z mikroskopem. Zdjęcia zapisywano w formacie TIFF (*Tagged Image File Format*), który, stosując bezstratną kompresję, zapewnia wysoką jakość zdjęcia wejściowego do późniejszej obróbki obrazu. Przy użyciu programu ImageJ zdjęcia zostały przygotowane do analizy. W tym celu kolorowe zdjęcie RGB przekształcono do skali odcieni szarości 8-bitowej. I tak przetworzone zdjęcia poddawano korekcie, polegającej na wyrównaniu kontrastu i jasności centralnej części zdjęcia względem jego krawędzi. W tym stadium równomierna jasność całej powierzchni obrazu jest szczególnie ważna, gdyż od niej zależy bezbłądność automatycznej identyfikacji porów (fig. 3a).



**Fig. 3.** Etapy przygotowania obrazu mikroskopowego do analizy ilościowej: a – korekta jasności i kontrastu, b – ustalanie poziomu szarości odpowiadającego przestrzeni porowej, c – binaryzacja i filtracja strukturalna

Stages of preparing microscopic image for quantitative analysis: a – brightness and contrast adjustment, b – determining the level of grayness corresponding to the pore space, c – structure binarization and filtration



**Fig. 4.** Kolejne kroki analizy ilościowej: a – obraz zidentyfikowanych obszarów porowych, b – zliczenia kolejnych pól porowych, c – procentowy udział obszarów porowych w obrazie

Successive steps for quantitative analysis: a – image identification of porous areas, b – counting the consecutive pore fields, c – percentage of pore areas in the image

Kolejny etap to segmentacja porów. Pory wydzielano przy użyciu narzędzia *thresholding*, którym określono próg (wartość szarości w skali od 0 do 255) odpowiadający wartości poziomu szarości analizowanej przestrzeni porowej (fig. 3b) i zamieniono na obraz binarny. Następnie poddano procesowi czyszczenia obrazu z wyszczególnieniem porów (fig. 3c).

Ostatnim etapem filtracji było użycie narzędzia *drawing of area*, które pozwala na wykonanie obrysu konturów po-

rów w obrazie płytki cienkiej (fig. 4a). Następnie za pomocą narzędzia *results* otrzymano zestawienie wszystkich pól powierzchni porów o przyjętej wcześniej wartości poziomu szarości (fig. 4b). Finalnie otrzymuje się sumaryczne zestawienie procentowego udziału zidentyfikowanych porów w analizowanym obrazie (fig. 4c).

## REZULTATY BADAŃ

Pod wpływem procesów deterioracji trawertyn staje się bardziej porowaty, a w kawernach i porach gromadzą się słabo związane produkty wtórnej krystalizacji. Wyrazem takich przemian są zmiany powierzchni porowej, których wielkość jest różna i zależy od działającego czynnika (Pinińska, El-Metwalli, 2008; Stefanidou, Papayianni, 2008). Wielkości obszarów porowych w trawertynie z czynnego

kamieniołomu oraz z antycznego odsłonięcia przedstawiają [tabela 1 i 2](#).

Największą porowatość obserwuje się niezależnie od materiału po cyklicznym działaniu zamrozu, jak również pod wpływem działania wysokich temperatur. Najniższe wartości porowatości zauważa się podczas krystalizacji z roztworów soli.

**Tabela 1**

### Powierzchnie porów w trawertynach z czynnego kamieniołomu (HO) w Hierapolis

Pore area in travertines from the active quarry (HO) in Hierapolis

Próbka Sample	Przeliczenie Convert	Powierzchnia całkowita Total area	Średnia [piksele] Average	Obszar porów Pore area [%]
HO_stan początkowy (initial state)	5231	1528205,000	292,144	31,1
HO_zamróż (freezing)	3756	539801,000	143,717	43,9
HO_podwyższona temp. (elevated temp.)	5320	461502,000	86,748	37,6
HO_sól (salt)	5501	407296,000	74,040	33,1

**Tabela 2**

### Powierzchnie porów w trawertynach z antycznego kamieniołomu (HA) w Hierapolis

Pore area in travertines from the ancient quarry (HA) in Hierapolis

Próbka (Sample)	Przeliczenie Convert	Powierzchnia całkowita Total area	Średnia [piksele] Average	Obszar porów (Pore area) [%]
HA_stan początkowy (initial state)	5231	1628205,000	592,144	51,1
HA_zamróż (freezing)	1662	818094,000	492,235	66,6
HA_podwyższona temp. (elevated temp.)	2772	697540,000	251,638	56,8
HA_sól (salt)	5501	407296,000	74,040	41,8

## PODSUMOWANIE

Zastosowane techniki komputerowej analizy obrazu fotograficznego pozwoliły określić zmiany ilościowe porowatości w trawertynach, powstałe w wyniku działania wybranych czynników degradujących.

Laboratoryjne badania deterioracji przeprowadzone na trawertynach z Hierapolis, pobranych z materiału świeżego (HO) i zwietrzałego z antycznego odsłonięcia (HA), wyka-

zują, że główną przyczyną powiększania się przestrzeni porów są zmiany termiczne. Powstałe mikropory wpływają na właściwości mechaniczne skał, efektem czego jest obniżona wytrzymałość na ściskanie. Należy podkreślić, że trawertyny charakteryzuje relatywnie duża odporność na działanie roztworów solnych, gdyż mogą one swobodnie krystalizować w ich porowatej strukturze skalnej.

## LITERATURA

- ESPINOSA MARZAL R.M., SCHERER G.W., 2008 — Study of the pory clogging induced by salt crystallization in Indiana limestone. Proc. 11th Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol. 1: 81–88. UMK, Toruń.
- MARINI P., BELLOPEDE R., 2010 — The mechanical resistance of saturated stones. Global Stone Congress: 1–5.
- PINIŃSKA J., 2008a — Models of rock deformation under uniaxial compression conditions. *Geologija*, **50**, Suppl.: 108–115.
- PINIŃSKA J., 2008b — The Lublin siliceous carbonate rocks – a medieval building material, its geological setting, specific properties and deterioration processes. 11th Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol. 1: 725–732. UMK, Toruń.
- PINIŃSKA J., BOBROWSKA A., PAMUKCU C., 2009 — Badania ultradźwiękowe w ocenie deterioracji skał. *Kwart. AGH, Geologia*, **35**: 633–639.
- PINIŃSKA J., BOBROWSKA A., PAMUKCU C., 2010 — Laboratoryjne badania procesu deterioracji trawertynowych elementów konstrukcyjnych. *Prz. Geol.*, **58**, 9/2: 879–885.
- PINIŃSKA J., EL-METWALLI H., 2008 — Geomechanical study of building materials of the Hawara pyramid (Fayoum, Egypt). *Geologija*, **50**, Suppl.: 126–130.
- PN-85/B-04102 — Materiały kamienne. Oznaczenie mrozoodporności metodą bezpośrednią.
- PN-EN 12370:2001 — Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenie odporności na krystalizację soli.
- STEFANIDOU M., PAPAYIANNI I., 2008 — The porosity of limestone and its behaviour to salt cycles. Proc. 11th Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol. 1: 283–290. UMK, Toruń.

## SUMMARY

Physical properties (i.e. porosity), durability as well as decorative quality tend to change in the stone architectural objects under the influence of deterioration processes. Aging processes modeled in laboratory conditions allowed establishing the mechanisms and dynamics of stone deterioration influenced by natural, geological processes of weathering as well as anthropogenic effects on the environment, i.e. atmosphere pollution, changes in water salinity and acid rains.

By means of simple techniques of computer analysis of a photographic image it is easy to estimate quantitative changes of porosity affected by selected erosive factors.

Laboratory study of deterioration was conducted on travertines samples from Hierapolis in Turkey, which were col-

lected from fresh material (HO) as well as from ancient and weathered one (HA). Initial porosity was estimated in any case. Subsequently, the increase of structural defects and changes of durability of stones were monitored under conditions of cyclic freezing, cyclic crystallization of salt as well as under the influence of increased temperature.

The study indicates that thermal changes are the main cause of loosening of material structure and extension of porous space. Resultant micropores influence mechanical properties of stones and it leads to decrease of uniaxial compressive strength. It is worth emphasizing, that travertines have relatively high resistance to salt solutions as they can crystallize in their porous stone structure without restraint.

