

JAN KRÓL¹⁾

RESEARCH INTO COMPACTION HOMOGENEITY OF ASPHALT CONCRETE BY APPLYING IMAGE ANALYSIS

BADANIA JEDNORODNOŚCI ZAGĘSZCZENIA BETONÓW ASFALTOWYCH Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY OBRAZU

STRESZCZENIE. Praca zawiera opis badań strukturalnych mieszanek mineralno-asfaltowych ukierunkowanych na ocenę pierwotnej anizotropowości lepko-sprężystego materiału kompozytowego w zakresie właściwości mechanicznych oraz strukturalnych. Przedstawiono wyniki badań jednorodności zagęszczenia mieszanki mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy. Badaniom poddano próbki pobrane z nawierzchni drogowej równolegle i prostopadle do płaszczyzny nawierzchni drogowej. Zbadano ukierunkowanie ziaren mineralnego szkieletu grysowego oraz jednorodność ich rozmieszczenia. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że mieszanka mineralno-asfaltowa typu betonowego wykazuje pierwotną anizotropowość struktury. W pracy wykazano, że wraz ze wzrostem wielkości ziaren grysowych maleje ich liczba w betonie asfaltowym oraz rośnie niejednorodność rozłożenia w strukturze mieszanki.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza obrazu, beton asfaltowy, jednorodność, morfologia, zagęszczenie.

ABSTRACT. A compacted bituminous mixture is commonly regarded as an isotropic material when considering both mechanical and structural properties. The work covers structural examinations of bitumen mixtures focused on assessment of an inherent anisotropy of a viscoelastic composite material. The results of compaction homogeneity examinations of the asphalt mixture of an asphaltic concrete type are presented herein. The examined samples were taken from a road pavement in parallel and perpendicular directions to the road surface. Particles orientation of a mineral aggregate skeleton and homogeneity of their distribution were examined. On the basis of performed examinations it was concluded that the asphalt mixture of an asphaltic concrete type shows certain inherent anisotropy of structure. It has been shown that together with an increase in size of coarse particles their amount in asphaltic concrete diminishes and heterogeneity of their distribution in a structure of mixture increases.

KEYWORDS: asphalt concrete, compaction, homogeneity, image analysis, morphology.

DOI: 10.7409/rabdim.014.005

¹⁾ Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska; j.krol@il.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Współczesne metody projektowania mieszanki można zaliczyć do metod empirycznych w których łączy się poszczególne składniki w różnych proporcjach metodą kolejnych przybliżeń, aż do uzyskania optymalnych właściwości. Istnieje wiele metod projektowania mieszanki mineralno-asfaltowych oraz laboratoryjnego przygotowania próbek [1, 2]. Wszystkie laboratoryjne metody mają na celu jak najwierniejsze oddanie warunków w budownictwie i pracy mieszanki mineralno-asfaltowej w nawierzchni drogowej. Prawidłowe zagęszczenie mieszanki mineralno-asfaltowej jest podstawowym warunkiem jej trwałości [3-5]. Podstawowym parametrem objętościowym charakteryzującym mieszankę mineralno-asfaltową jest stopień zagęszczenia. Miarą jej zagęszczenia jest zawartość wolnej przestrzeni, której wartość zależy od metody i energii zagęszczenia, temperatury oraz rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej. Powszechnie uważa się, że zagęszczona mieszanka mineralno-asfaltowa jest materiałem izotropowym w zakresie właściwości mechanicznych jak i strukturalnych [2]. W pracach [6, 7] stwierdzono jednak, że mieszanka mineralno-asfaltowa cechuje się pierwotną anizotropowością materiału uwarunkowaną zagęszczeniem materiału. Stwierdzono, że różnice w module sztywności mieszanki mogą dochodzić do 30% w zależności od kierunku naprężeń [6].

Anizotropowe właściwości materiałów kompozytowych są najczęściej uwarunkowane budową wewnętrzną, którą można ocenić na podstawie badań strukturalnych. W ostatnich latach powstało wiele prac krajowych [8-12] i zagranicznych [13-17] z zakresu oceny struktury materiałów budowlanych i konstrukcji drogowych, gdzie wykorzystano analizę obrazu do oceny makro- i mikro- struktury materiału oraz identyfikacji zniszczeń. W połowie lat dziewięćdziesiątych prowadzono już pracę nad zastosowaniem analizy obrazu do oceny właściwości strukturalnych mieszanki na płaskich przekrojach [13]. Stwierdzono, że grube ziarna kruszywa mineralnego charakteryzują się innym ułożeniem w przekroju poziomym i pionowym. Zauważono, że próbki przygotowane za pomocą prasy żyatorowej oraz zagęszczarki płytowej charakteryzują się bardziej jednorodną strukturą, niż próbki przygotowane w laboratorium metodą udarową w ubijaku Marshalla. Badania prowadzone przez zespoły H. Bahia z Uniwersytetu w Wisconsin oraz E. Masad z Uniwersytetu w Teksasie potwierdziły wcześniejsze doniesienia i znacznie rozwinęły metodę oceny struktury mieszanki na podstawie płaskich przekrojów mieszanki mineralno-asfaltowej [1, 14, 17].

1. INTRODUCTION

The contemporary methods for designing mixtures may be included to empirical techniques which combine individual components in various proportions with the use of successive approximations till optimal properties are achieved. There are many methods for designing asphalt mixtures and preparing laboratory samples [1, 2]. All laboratory methods are aimed at the most accurate simulation of placement and working conditions of the asphalt mixture in a road pavement. The correct compaction determines its durability [3-5], while the compaction degree makes the basic volume parameter describing the asphalt mixture. The measure of compaction is the air void content. Its value depends on an applied method, energy of compaction, temperature, and the sort of asphalt mixture. It is common knowledge that the compacted asphalt mixture is an isotropic material from the viewpoint of both mechanical and structural properties [2]. Nevertheless, it has been stated in papers [6, 7] that asphalt mixtures are marked by a primal substantial anisotropy conditioned by the material compaction. It has been noted there that differences in stiffness moduli might have reached up to 30 per cent depending on a stress direction [6].

The anisotropic properties of composite materials are most frequently conditioned by their internal structure which may be examined through structural tests. Within last few years many domestic [8-12] and foreign [13-17] works on the subject of structural assessment of building materials and road structures with the use of the image analysis for the macro- and micro-assessment of material structure and failure identification, have been published. In the mid-90s, works on application of the image analysis to the assessment of structural properties of the mixture on plain sections [13] have already been conducted. It has been observed that coarse aggregate are distinguished by different arrangements in horizontal and vertical sections. It has been noticed that samples prepared with the use of a gyratory compactor and slab compactor have been marked by more homogenous structures than those prepared in a laboratory by using an impact method in a Marshall automatic compactor. Results of the research performed by teams of H. Bahia, the University of Wisconsin-Madison, and E. Masad, Texas A&M University, have confirmed the former reports and have substantially developed the assessment method for aggregate structure based on plain sections of asphalt mixtures [1, 14, 17]. A research into the shape and texture of aggregate particles [15] along with

Jednocześnie z oceną struktury zagęszczonych mieszank mineralno-asfaltowych prowadzono badania nad kształtem i teksturą ziaren kruszywa [15] oraz nad trójwymiarowym obrazowaniem kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej za pomocą komputerowej tomografii rentgenowskiej [16]. W pracach [15, 16] wskazano na możliwość zastąpienia szeregu procedur laboratoryjnych opisujących właściwości kruszywa metodą obrazowania z wykorzystaniem analizy obrazu, oraz wykazano wpływ cech morfologicznych kruszywa w kształtowaniu właściwości mieszank mineralno-asfaltowych.

2. MATERIAŁY DO BADAŃ

Do badań użyto dwóch betonów asfaltowych o uziarnieniu 16 mm i 25 mm. Mieszanka mineralno-asfaltowa pochodziła z wytwórni przemysłowej i została pobrana w formie odwiertów o średnicy 200 mm z zagęszczonej warstwy nawierzchni drogowej oraz jako luźna mieszanka. Luźną mieszankę pobrano podczas wbudowywania w miejscu późniejszego poboru odwiertów. Luźna mieszanka została wykorzystana do badań zagęszczenia w warunkach laboratoryjnych. Porównanie zagęszczenia uzyskanego na odcinku drogowym z zagęszczeniem uzyskanym w laboratorium jest przedmiotem analiz i będzie przedstawione w kolejnych publikacjach.

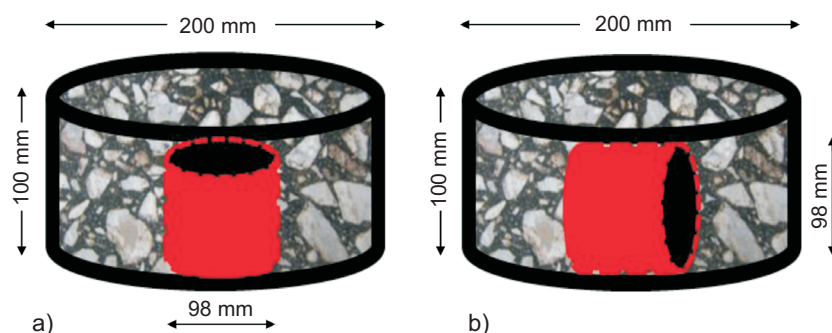
Mieszanka mineralno-asfaltowa AC 16 mm została wbudowana w jednej warstwie o grubości 100 mm, natomiast mieszanka AC 25 mm została wbudowana w dwóch warstwach każda po 80 mm (łącznie 160 mm). Z odwiertu z nawierzchni drogowej o średnicy 200 mm pobrano próbki walcowe o średnicy 98 mm. Walce wycinano równoległe (Rys. 1a) oraz prostopadłe (Rys. 1b) do osi odwiertu drogowego.

the three-dimensional image processing of aggregates in asphalt mixtures with the use of a computer-aided X-ray tomography [16] have been carried out. A possible replacement of a series of laboratory procedures for aggregate properties with the imaging method with the use of the image analysis has been pointed out in papers [15, 16]. An impact of morphological characteristics of aggregate upon shaping qualities of asphalt mixtures has also been presented there.

2. TESTING MATERIALS

Two sorts of asphalt concrete with grading 16 mm and 25 mm were used for testing. The asphalt mixtures came from an asphalt mixing plant and were taken in a form of cores 200 mm in diameter from a compacted layer of a road pavement and as loose mixtures during their placement at the place of subsequent drilling cores. Then the loose mixture was used for compaction tests in laboratory conditions but the relevant results are not included in the present paper because of space limitation. A comparison of compaction obtained on a road section with a compaction received in a laboratory remains an object of further analyses and will be presented in the following publications.

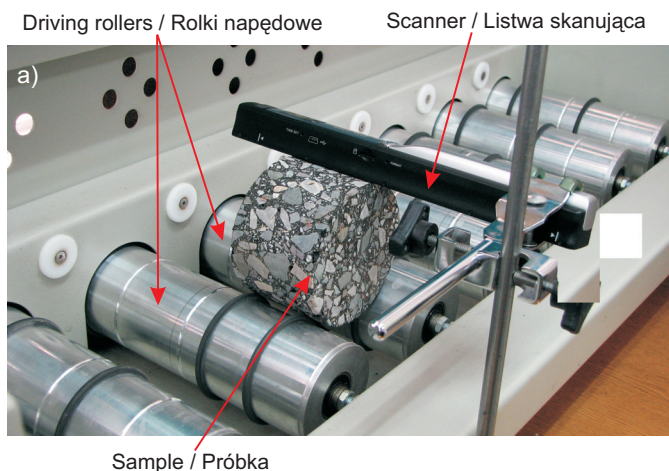
The asphalt mixture AC 16 mm was placed in one layer 100 mm thick, whereas the mixture AC 25 mm was placed in two layers, each 80 mm thick (160 mm in total). Some cylindrical samples 98 mm in diameter were taken from the cores 200 mm in diameter on the road pavement. The cylinders were cut out parallel (Fig. 1a) and perpendicular (Fig. 1b) to the axis of borehole.



Rys. 1. Sposób poboru próbek do badań z odwiertu pobranego z nawierzchni: a) próbka równoległa do osi odwiertu, b) próbka prostopadła do osi odwiertu
Fig. 1. Method of specimens sampling from a core taken from the pavement: a) sample parallel to the core axis, b) sample perpendicular to the core axis

3. METODA OCENY STRUKTURY

Do badań wykorzystano skaner komputerowy oraz zbudowane na Politechnice Warszawskiej stanowisko do rejestracji obrazu z poboczniczy próbki walcowej. Stanowisko wykonano według pomysłu [18] udoskonalając sposób obracania próbki oraz mocowanie listwy skanującej (Rys. 2). Stanowisko składa się z rolek obracających próbkę o regulowanej prędkości obrotowej oraz z listwy skanującej do rejestracji obrazu. W celu wyeliminowania możliwości poruszenia listwy skanującej podczas obracania próbki walcowej, zamontowano listwę skanującą na stojaku z regulacją położenia. Właściwe unieruchomienie listwy skanującej zapewniło równoległe ustawienie elementów optycznych do osi obrotu próbki, co pozwoliło wiernie odwzorować obraz poboczniczy bez zniekształceń.



3. METHOD OF STRUCTURAL ASSESSMENT

The computer scanner and set-up for image acquiring formed at the Warsaw University of Technology were used for images acquisition of the lateral surface of the cylinder sample. The set-up was designed through improving the way of turning a sample and fixing the scanner strip (Fig. 2). Powered rolls turning sample with the adjustable rotational speed and a scanner strip for image acquiring made up the set-up. The scanner strip was fixed on a position-controlled bracket just to avoid the risk of its displacements during rotation of the cylindrical sample. The right immobilisation of the scanner strip provided the right position of optical components parallel to the rotation axis of the sample. It enabled the accurate imagining the lateral surface without any distortions.

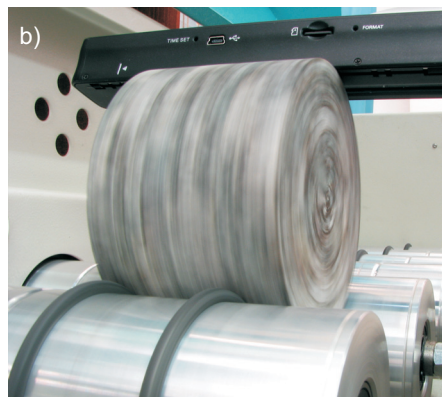


Fig. 2. Image acquiring set-up for cylindrical specimen side surface: a) components of measuring device, b) sample during image acquisition

Rys. 2. Stanowisko do rejestracji obrazu z poboczniczy próbki walcowej: a) części składowe stanowiska pomiarowego, b) próbka podczas rejestracji obrazu

Obrazy struktury mieszanki rejestrowano z rozdzielczością 300 dpi i zapisywano w plikach w formacie tiff bez kompresji. Zarejestrowany obraz struktury mieszanki mineralno-asfaltowej został poddany analizie obrazu w celu określenia jednorodności zagęszczenia poprzez określenie rozkładu ziaren w mieszance. W procesie przetwarzania obrazu oraz pomiaru właściwości morfologicznych zastosowano program do komputerowej analizy obrazu ImageJ wersja 1.43u. W pierwszym etapie przetwarzania zarejestrowany kolorowy obraz (Rys. 3a) był konwertowany do 256 odcieni szarości (Rys. 3b). Kolejnym etapem przetwarzania obrazu było wyodrębnienie granic ziaren kruszywa mineralnego (Rys. 3c) oraz binaryzacja (Rys. 3d). W ostatnim etapie przeprowadzono pomiar i opis wszystkich

The mixture images were registered at a resolution of 300 dpi and stored in files of the TIFF format without image compression. The registered image of asphalt mixture was analysed in order to determine the compaction homogeneity of the mixture through defining the particles distribution. The computer aided image analysis programme ImageJ version 1.43u was used in the image conversion process and measurement of morphological properties. In the first stage of conversion the registered colourful image (Fig. 3a) was converted into 256 shades of grey (Fig. 3b). The successive stage of image conversion was distinguishing particle boundaries of the mineral mix (Fig. 3c) and binarisation (Fig. 3d). The last stage made the measurement and description of all distinguished

wyodrębnionych cząstek kruszywa (Rys. 3e). Do opisu jednorodności zagęszczenia wykorzystano współczynnik zmienności struktury (1), oraz przeanalizowano nachylenie ziaren zgodnie z metodą opisaną w [1, 16].

aggregate particles (Fig. 3e). The coefficient of structural variability (1) was applied to the description of compaction homogeneity. The inclination of particles was analysed in accordance with the method developed in [1, 16].

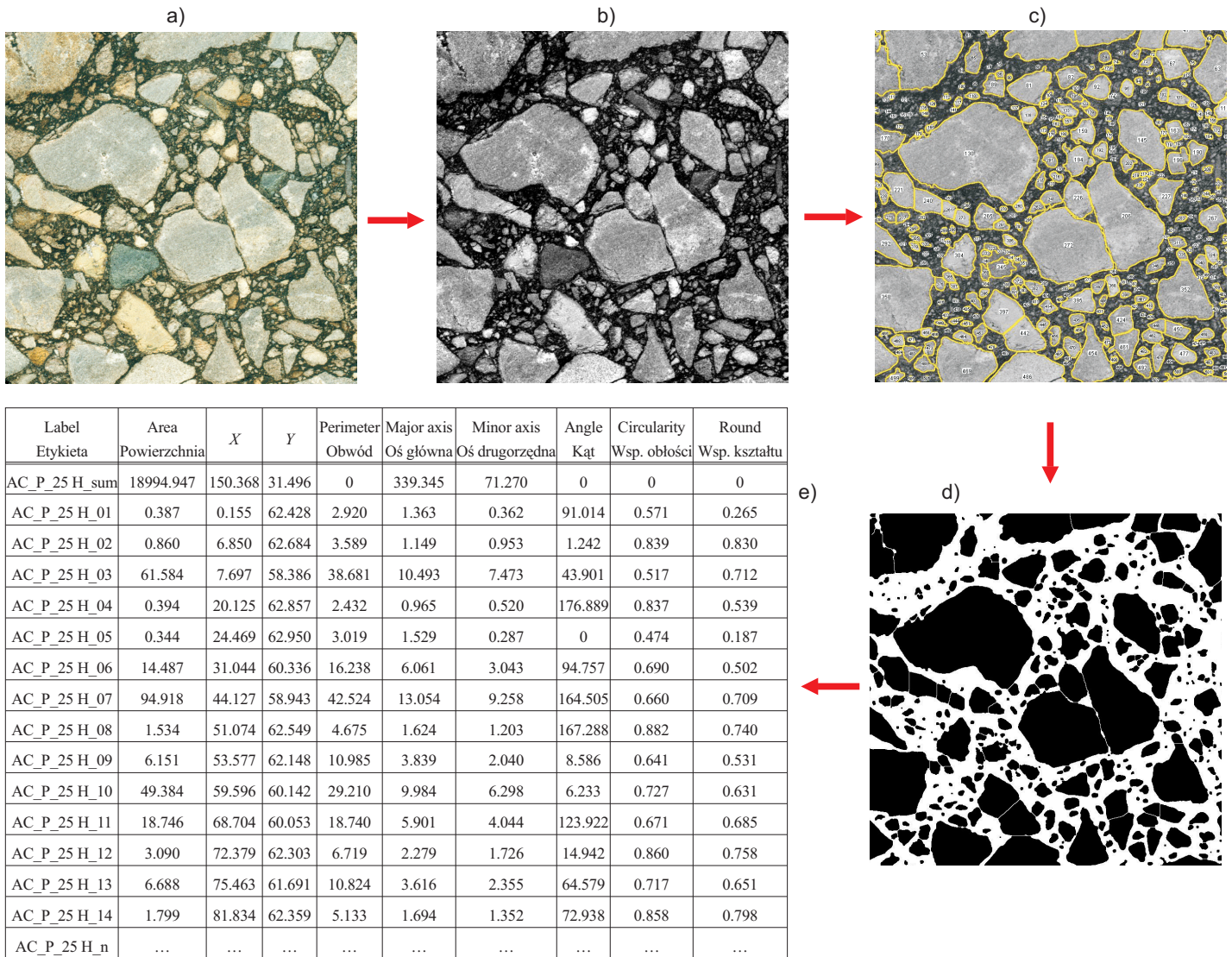


Fig. 3. Successive steps of image processing: a) true color image, b) grey image, c) particle detection, d) binary image of aggregate skeleton particles, e) measured data and particles characteristics

Rys. 3. Kolejność operacji przetwarzania obrazu: a) obraz kolorowy, b) obraz szary, c) detekcja cząstek, d) obraz czarno-biały cząstek szkieletu grysowego, e) pomiar i opis cząstek

Określenie jednorodności rozkładu ziaren w mieszance przeprowadzono na obrazie zarejestrowanym w przekroju pionowym rdzenia oraz na obszarze rozwiniętej poboczniczy próbki. Obraz podzielono na pola A_i o boku zbliżonym do 2,5-krotności średnicy największego nominalnego ziarna

The determination of distribution homogeneity of aggregate particles in mixture was performed on a registered image of the vertical section of the core and the developed area of the sample lateral surface. The image was divided into areas A_i with sides approaching 2.5-fold of the biggest

mieszanki. Z poboczniczy i przekroju osiowego próbek wyodrębniono od 5 do 10 pól badawczych A_i , w zależności od rozmiaru próbki i uziarnienia nominalnego mieszanki. Najczęściej segregacji w mieszance mineralno-asfaltowej podlegają ziarna o największym rozmiarze, których ilościowo jest najmniej, dlatego z analizowanej struktury wyodrębniono poszczególne grupy ziaren o różnej wielkości. Wyznaczenie danej wielkości ziarna polegało na znalezieniu średnicy okręgu o powierzchni odpowiadającej polu powierzchni ziarna. Wyznaczona średnica została umownie przyjęta jako rozmiar ziarna. Na tej podstawie, ziarna podzielono na trzy grupy: frakcję piaskową o zakresie rozmiaru ziarna od 0,063 mm do 5 mm (Rys. 4a), frakcję drobnych grysów 5÷8 mm (Rys. 4b) oraz frakcję grysową – ziarna większe od 8 mm (Rys. 4c). W każdej wyodrębnionej grupie obliczono współczynnik zmienności struktury v .

diameter of the nominal mixture gradation. From 5 to 10 test areas A_i were distinguished from the lateral surface and axis section depending on the sample size and the mixture nominal grading. The both biggest, and the least numerous particles of asphalt mixture are often overcome by the segregation. That is why separate groups of aggregate particles of various sizes were distinguished from the analysed structure. The appointment of a given particle size came down to finding a diameter of a circle with an area corresponding to the aggregate particle surface. The determined diameter was symbolically adopted as a particle size. This way particles were divided into three groups: a sand fraction with the range of particles sizes from 0.063 mm to 5 mm (Fig. 4a), a fraction of fine coarse aggregate from 5 mm to 8 mm (Fig. 4b), and a coarse fraction with particles bigger than 8 mm (Fig. 4c). The coefficient of variation v was calculated for each distinguished group.

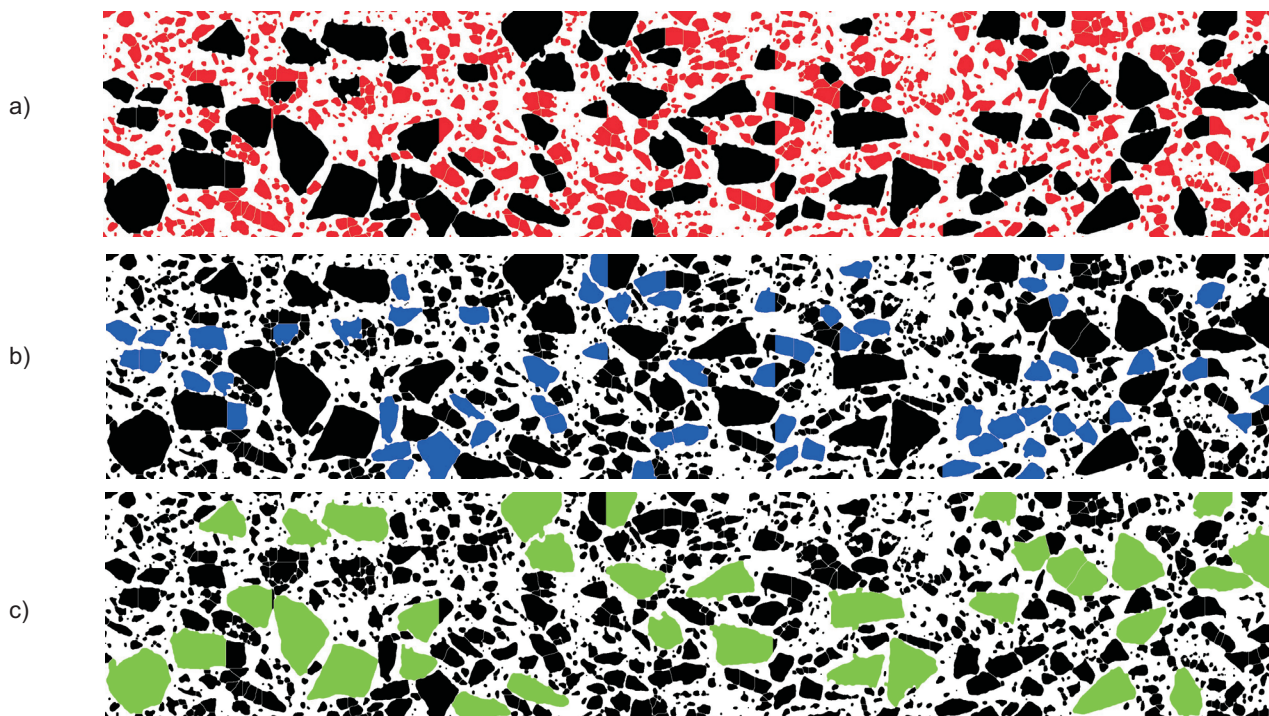


Fig. 4. Distribution of aggregate particles in the asphalt concrete AC 16, for different grain sizes: a) 0.063÷5 mm, b) 5÷8 mm, c) > 8 mm
Rys. 4. Struktura ziaren mineralnych w betonie asfaltowym AC16, ziarna o wymiarach: a) 0,063÷5 mm, b) 5÷8 mm, c) > 8 mm

W celu wyznaczenia współczynnika zmienności zliczono liczbę ziaren o określonym rozmiarze N_{A_i} na jednostkowym polu pomiarowym A_i . Ocenę jednorodności rozmieszczenia ziaren wykonano obliczając współczynnik zmienności struktury v z następującego wzoru:

$$v = \frac{\overline{S}(N_{A_i})}{\overline{N}_{A_i}} \quad (1)$$

The number of particles with defined size N_{A_i} on an individual area A_i was counted up in order to determine the variation coefficient. The assessment of distribution homogeneity was carried out with the use of calculations of the coefficient of variation v after the following formula:

gdzie:

$\bar{S}(N_{A_i})$ – odchylenie standardowe liczby ziaren N_{A_i} ,

\bar{N}_{A_i} – średnia liczba ziaren w polu A_i .

Struktury jednorodne charakteryzują się współczynnikiem zmienności v równym 0, natomiast struktury niejednorodne mają współczynnik $v > 0$. Wraz ze wzrostem wartości tego współczynnika zwiększa się niejednorodność rozmieszczenia ziaren o danym rozmiarze w mieszanke.

Następnymi analizowanymi parametrami charakteryzującym jednorodność strukturalną były parametry kierunkowości ziaren. W celu określenia zorientowania ziarna w mieszanke należy opisać na nim elipsę i wyznaczyć maksymalną średnicę zastępczą D_{\max} . Zorientowanie ziaren wyznacza się licząc kąt nachylenia maksymalnej średnicy zastępczej D_{\max} od osi poziomej (kąt α , Rys. 5a) lub wyznaczając kąt nachylenia średnicy D_{\max} do prostej wyznaczonej przez środek ciężkości analizowanego pola i środek elipsy (kąt θ , Rys. 5b). Maksymalną średnicę zastępczą D_{\max} oraz kąty α i θ dla danego ziarna wyznacza się ze wzorów:

where:

$\bar{S}(N_{A_i})$ – standard deviation of the particles number N_{A_i} ,

\bar{N}_{A_i} – average number of particles in the area A_i .

The distinctive feature of homogenous structures is the coefficient of variation $v = 0$, when heterogeneous structures have $v > 0$. Along with an increase in value of this coefficient grows the heterogeneous distribution of particles of a given size in the mixture.

The next analysed parameters marking the structural heterogeneity were parameters of the particle orientation. In order to determine the particle orientation in a mixture, it should be circumscribed with an ellipse and the maximal substitute diameter D_{\max} should be determined. The particle orientation may be determined through calculations of an inclination angle of the maximal substitute diameter D_{\max} towards the horizontal axis (the angle α , Fig. 5a), or by outlining an angle of inclination of the diameter D_{\max} to the straight line exposed from the centroid of an analysed area to the ellipse centre (angle θ , Fig. 5b). The maximal substitute diameter D_{\max} together with angles α and θ for a given particle are determined according to the below formulas:

$$D_{i,\max} = \max \sqrt{(x_i - x_{-i})^2 + (y_i - y_{-i})^2}, \quad (2)$$

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{x_i - x_{-i}}{D_{i,\max}} \right), \quad (3)$$

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{D_{i,\max}}{4r_2} + \frac{r_2}{D_{i,\max}} - \frac{r_1^2}{D_{i,\max} - r_2} \right), \quad (4)$$

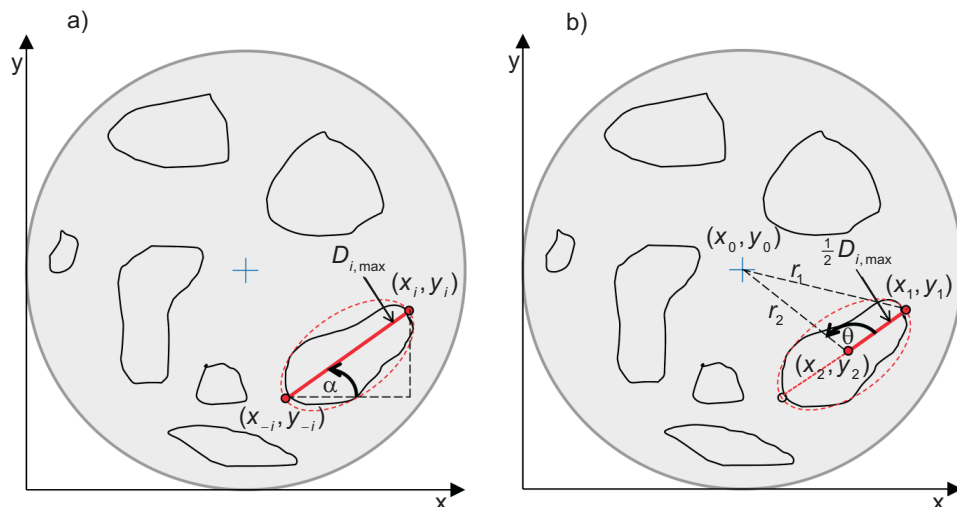


Fig. 5. Graphical interpretation of particle orientation using the ellipse circumscribed on a particle: a) angle α , b) angle θ
Rys. 5. Graficzna interpretacja orientacji ziarna za pomocą elipsy opisanej na ziarnie: a) kąt α , b) kąt θ

gdzie:

x_i i y_i – są współrzędnymi piksela na obwodzie ziarna,

x_{-i} i y_{-i} – są współrzędnymi piksela na obwodzie ziarna po przeciwnej stronie linii przechodzącej przez jego środek,

r_1 – jest odcinkiem o początku (x_0, y_0) w środku ciężkości analizowanego pola i końcu (x_1, y_1) położonym w środku elipsy,

r_2 – jest odcinkiem o początku (x_0, y_0) w środku ciężkości analizowanego pola i końcu (x_2, y_2) położonym w środku elipsy.

Obliczone wartości kątów poszczególnych ziaren szereguje się w postaci histogramu kątów lub wykresu kołowego odpowiedniego do wartości okresowych. O zorientowaniu ziaren w mieszance mineralno-asfaltowej można wnioskować, gdy występuje dominujący mod. W pracy zorientowanie ziaren poddano jedynie ocenie jakościowej, określając tylko czy zorientowanie ziaren występuje (czy nie) oraz podawano wartość dominującego modu, jeśli taki wystąpił. W analizowanych przypadkach zwrot ziarna w układzie biegunowym i kartezjańskim nie jest istotny i jest wielkością okresową. Okres kierunku zorientowania ziaren wynosi 180° .

Na Rys. 6 przedstawiono wzorcowe obrazy, które wykorzystano przy testowaniu algorytmu liczącego kąty, a na Rys. 7 rozkład kołowy częstości występowania ziaren o danym zorientowaniu w obrazach wzorcowych. Wzrokowa ocena wzorców pozwala stwierdzić, że ziarna na Rys. 6a są zorientowane równoległe do osi x , natomiast ziarna na Rys. 6b są zorientowane biegunowo. Analiza obrazu oraz pomiar kątów α i θ przeprowadzone na obrazach wzorcowych potwierdziły wynik uzyskany oceną wzrokową. Na obrazie wzorca przedstawionym na Rys. 6a można stwierdzić przewagę występowania kąta α o wartości $0^\circ \div 10^\circ$ i $180^\circ \div 190^\circ$ (Rys. 7a). W istocie wartości kątów 0° i 180° oraz 10° i 190° określają ten sam kierunek ze względu na okres (180°), co jest zgodne z równoległym do osi zorientowaniem ziaren. W tym przypadku zorientowanie biegunowe ziaren nie występuje, o czym świadczy równomierny rozkład częstości występowania kąta θ na wykresie kołowym przedstawionym na Rys. 7a. Natomiast na obrazie wzorca przedstawionym na Rys. 6b można stwierdzić przewagę występowania kąta θ o wartościach $90^\circ \div 100^\circ$ (w okresie 180°), (Rys. 7b), co jest zgodne z prostopadłym ukierunkowaniem ziaren do osi biegunowej. W tym przypadku zorientowanie ziaren wzdłuż osi x nie występuje, o czym świadczy równomierny rozkład częstości występowania kąta α .

where:

x_i and y_i – pixel coordinates x and y at a particle perimeter,

x_{-i} and y_{-i} – pixel coordinates x and y at a particle perimeter on the opposite side of a line crossing its centre,

r_1 – the straight segment beginning in the centroid of the analysed area with pixel coordinates x_0 and y_0 , and ending at the particle perimeter with pixel coordinates x_1 and y_1 ,

r_2 – the straight segment beginning in the centroid of the analysed area with pixel coordinates x_0 and y_0 , and ending at a particle perimeter with pixel coordinates x_2 and y_2 .

The worked out values of individual particles are classified in the form of a histogram of angles or a circle diagram suitable for periodical values. The dominating mode enables concluding arrangement of particles in the asphalt mixture. In this paper the particle arrangement was the subject only of qualitative assessment determining whether or not such phenomenon occurs, and announcing the value of dominating mode if it comes out. The particle sense in both polar and Cartesian coordinates is irrelevant as a periodical magnitude in the analysed cases. The period of particle arrangement direction comes to 180° .

Fig. 6 depicts master images applied at testing the angle calculating algorithm, while Fig. 7 shows a circular diagram of frequency distribution of particles with a given orientation in master images. The visual assessment was enough to find whether the particles on Fig. 6a were parallel oriented with the axis x , when particles on Fig. 6b were polar oriented. The image analysis and measurements of the angles α and θ carried out on master images confirmed results of the visual assessment. The predominance of the angle α (Fig. 7a) at values of $0^\circ \div 10^\circ$ and $180^\circ \div 190^\circ$ may be observed on the picture of the master (Fig. 6a). Basically, the values of angles 0° and 180° as well as 10° and 190° determine the same direction with regard to the period (180°) that is consistent with the particle orientation parallel to the axis. In this instance the polar orientation of particles does not develop what signifies an even distribution of frequency rate of the angle θ on the circular diagram depicted on Fig. 7a. However, a predominance of frequency rate of the angle θ with values in the bracket $90^\circ \div 100^\circ$ (in the period of 180°) in accordance with a particle orientation perpendicular to the polar axis can be observed on Fig. 7b. In this event particle arrangement along the axis x does not appear what proves an even distribution of frequency rate of the angle α .

Fig. 6. Reference images:

a) orientation of particles along the x axis,

b) radial orientation of particles

Rys. 6. Obrazy wzorcowe:

a) zorientowanie ziaren wzdłuż osi x,

b) radialne zorientowanie ziaren

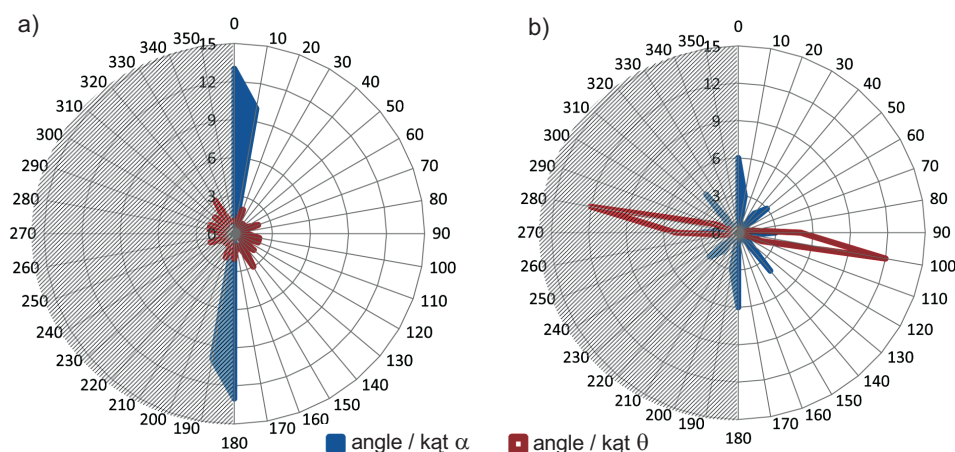
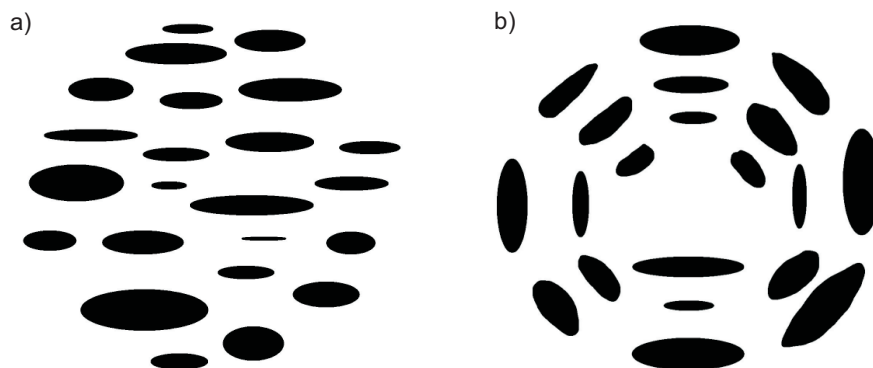


Fig. 7. Frequency distribution of particles of different angles of orientation:

a) results of the reference image „6a” with

particles oriented parallelly to the x axis,

b) results of the reference image „6b” with

radially oriented particles

Rys. 7. Częstość występowania cząstek o różnym kącie zorientowania:

a) wyniki pomiaru obrazu wzorcowego

„6a” o ziarnach zorientowanych wzdłuż

osi x, b) wyniki pomiaru obrazu

wzorcowego „6b” o ziarnach

zorientowanych radialnie

4. WYNIKI BADAŃ

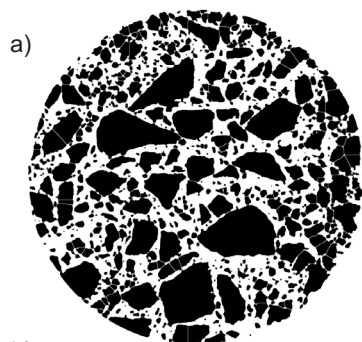
4.1. OCENA KIERUNKOWOŚCI ZIAREN W BETONIE ASFALTOWYM

Badaniu kierunkowości ułożenia ziaren kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej poddano mieszankę betonu asfaltowego AC16. Mieszanka AC16 została wbudowana w nawierzchnię drogową w jednej warstwie o grubości 10 cm co umożliwiło pobranie z nawierzchni odwiertów równoległe i prostopadłe do płaszczyzny nawierzchni. Przebadano rdzenie z betonu asfaltowego pobranego równoległe i prostopadłe do osi odwiertu z nawierzchni w celu określenia optymalnej powierzchni do badań strukturalnych. Oceniano strukturę płaszczyzny podstawy walców (Rys. 8a) oraz rozwiniętą powierzchnię pobocznicę walca (Rys. 8b). Analizie poddano dwa parametry charakteryzujące ukierunkowanie ziaren w mieszance kąty: α i θ .

4. TEST RESULTS

4.1. ASSESSMENT OF PARTICLE ARRANGEMENT IN ASPHALTIC CONCRETE

The asphaltic concrete AC16 was put through an examination of the aggregate particle arrangement. This mixture was placed into a road pavement with one layer 10 cm thick enabling to drill boreholes parallel and perpendicularly to the pavement plane. The specimen of asphaltic concrete taken from the pavement parallel and perpendicularly with the vertical axis of the core, were examined in order to determine an optimal surface for structural tests. The plane structures of the bases of cylinders (Fig. 8a) and the evolved lateral surface of the cylinder (Fig. 8b) were examined. Two parameters describing the particle arrangement of the mixture i.e. the angles α and θ were also analysed.



b)

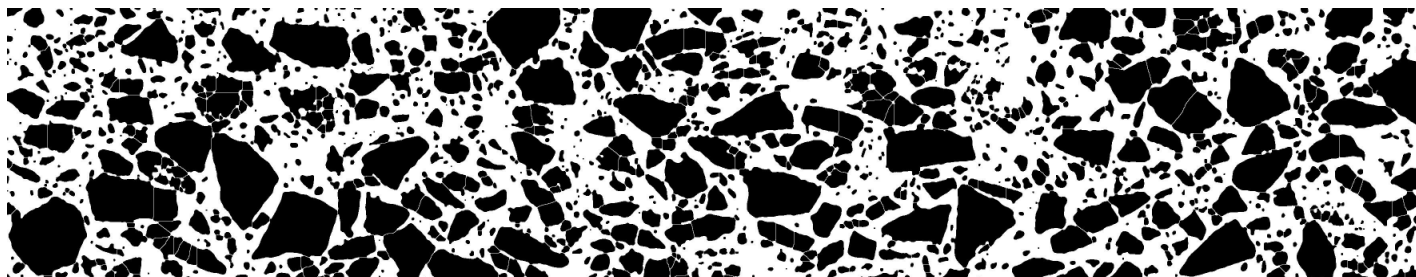


Fig. 8. Distribution of aggregate particles in asphaltic concrete AC 16:
 a) base of the cylindrical specimen drilled parallel to the axis of the core (diameter 98 mm),
 b) side surface of the cylindrical specimen drilled parallel to the axis of the core (length 300 mm, height 56 mm)

Rys. 8. Struktura ziaren mineralnych w betonie asfaltowym AC16:

a) podstawa rdzenia wyciętego równoległe do osi odwiertu (średnica 98 mm),
 b) pobocznicza rdzenia wyciętego równoległe do osi odwiertu (długość 300 mm, wysokość 56 mm)

Analiza zorientowania ziaren w mieszance w płaszczyźnie podstawy rdzenia wyciętego prostopadłe do płaszczyzny nawierzchni nie wykazała zorientowania ziaren w mieszance (Rys. 9a). Na wykresie kołowym można zauważyć podobny rozkład częstości występowania ziaren o danym zorientowaniu zarówno w układzie biegunowym jak i układzie kartezjańskim. W płaszczyźnie podstawy próbki walcowej wyciętej z nawierzchni drogowej równoległe do płaszczyzny nawierzchni (Rys. 9b) można zauważyć zwiększoną częstość występowania ziaren o kącie zorientowania α równym 0° (w okresie 180°) w układzie kartezjańskim. Stwierdzono natomiast zorientowania ziaren w układzie biegunowym. Zwiększona częstość występowania ziaren w płaszczyźnie 0° wskazuje na równoległe ułożenie ziaren do płaszczyzny poruszania się urządzenia rozkładającego oraz kierunku zagęszczania walca drogowego. Podobny charakter zorientowania ziaren można zaobserwować analizując obraz struktury mieszanki w płaszczyźnie bocznej walca próbki wyciętej prostopadłe (Rys. 10a) i równoległe (Rys. 10b) do płaszczyzny nawierzchni. Analizując strukturę ułożenia ziaren w płaszczyźnie poboczniczy walca próbki wyciętej prostopadłe do płaszczyzny nawierzchni (Rys. 10a) można stwierdzić zwiększoną liczbę ziaren zorientowanych pod kątem 0° (w okresie 180°) w układzie kartezjańskim (kąt α). Identyczne co do kierunku zorientowanie ziaren kruszywa w mieszance można zaobserwować w rozwiniętej płaszczyźnie poboczniczy walca próbki wyciętej równoległe do płaszczyzny nawierzchni (Rys. 10b). W tym przypadku obserwuje się zwiększoną liczbę ziaren zorientowanych

The analysis of particles orientation in the mixture on the basic plane of the core cut out perpendicularly to the pavement surface did not reveal the orientation of mixture particles (Fig. 9a). A similar distribution of particle frequency with a given orientation in both polar and Cartesian coordinates can be noticed on a circle diagram. An increased particle frequency rate with the orientation angle α equal to 0° (within the period 180°) in the Cartesian coordinate system may be noticed on the base plane of a specimen of the road pavement cut out parallel to the pavement surface (Fig. 9b). Further, the particle arrangement in the polar coordinate system was observed. The increased particle frequency rate in the plane 0° points out at the parallel orientation of particles to movement direction planes of both a spreading device and compacting roller. A similar character of particle orientation can be observed when analysing the structural image of mixture on lateral surface of a specimen cut out perpendicularly (Fig. 10a) and parallel (Fig. 10b) to pavement surface. The increased number of particles oriented at the angle 0° (in the period 180°) in the Cartesian coordinate system (the angle α) may be observed when analysing the particle arrangement in the plane of lateral surface of the cylinder sample cut out perpendicular to the pavement surface (Fig. 10a). The identical as for the orientation direction of aggregate particles in the mixture can be noticed on the developed lateral surface of a cylinder sample cut out parallel to the pavement surface (Fig. 10b). In this instance the increased number of particles oriented at the angle 90° in the Cartesian coordinate system (the angle α) may be

pod kątem 90° w układzie kartezjańskim (kątem α). Analiza częstości występowania ziaren w odniesieniu do układu biegunowego (kątem θ) nie wykazała zorientowania w żadnym kierunku. Analiza zorientowania ziaren przeprowadzona na rozwiniętej poboczniczy walca ma ograniczone zastosowanie ponieważ pobocznicza nie jest płaszczyzną tak jak podstawa czy przekrój próbki. W prowadzonej analizie należy uwzględnić krzywoliniowy charakter przekroju (płaszczyzna walcowa) który może skutkować cyklicznym przesunięciem wartości kąta nachylenia ziarna w przypadku ich zorientowania pod kątem innym niż 0° i 90° .

spotted. The analysis of particle prevalence rate with reference to the polar system (the angle θ) did not reveal any directional orientation. The analysis of particle orientation carried out on the lateral surface of a cylinder has a limited application because the lateral surface is not a plane like the base or section of the sample. In the carried out analysis the curvilinear character of the section (the cylindrical plane) should have been taken into consideration since it might have resulted in a cyclic value shift of the particle inclination angle in case of particles oriented at angles different from 0° and 90° .

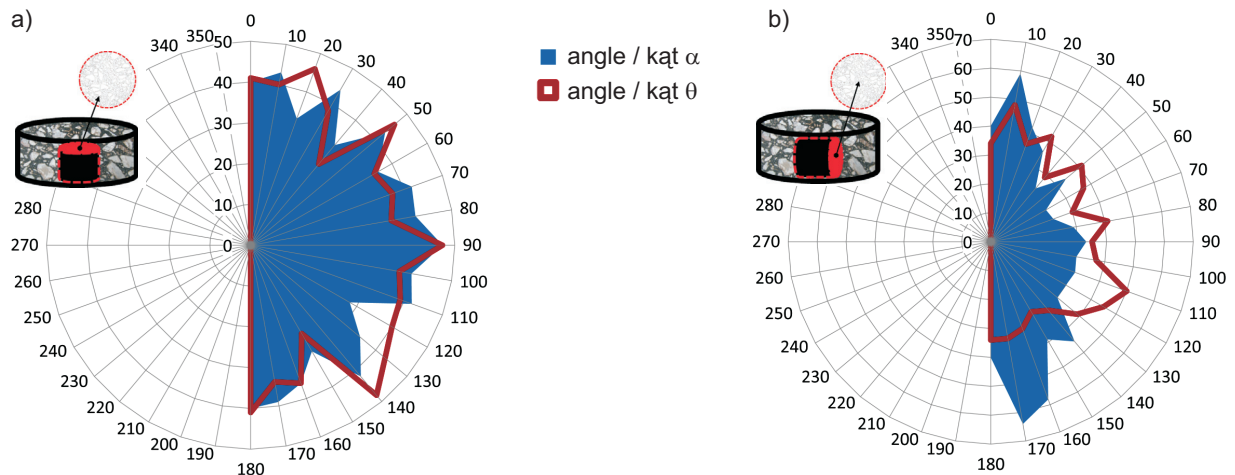


Fig. 9. Frequency distribution of angular orientation of mineral particles in the asphalt concrete AC 16: a) base surface of the cylindrical specimen drilled parallel to the axis of the core, b) base surface of the cylindrical specimen drilled perpendicularly to the axis of the core

Rys. 9. Rozkład częstości kątów zorientowanych ziaren mineralnych w betonie asfaltowym AC16: a) powierzchnia podstawy rdzenia wyciętego równoległe do osi odwiertu, b) powierzchnia podstawy rdzenia wyciętego prostopadłe do osi odwiertu

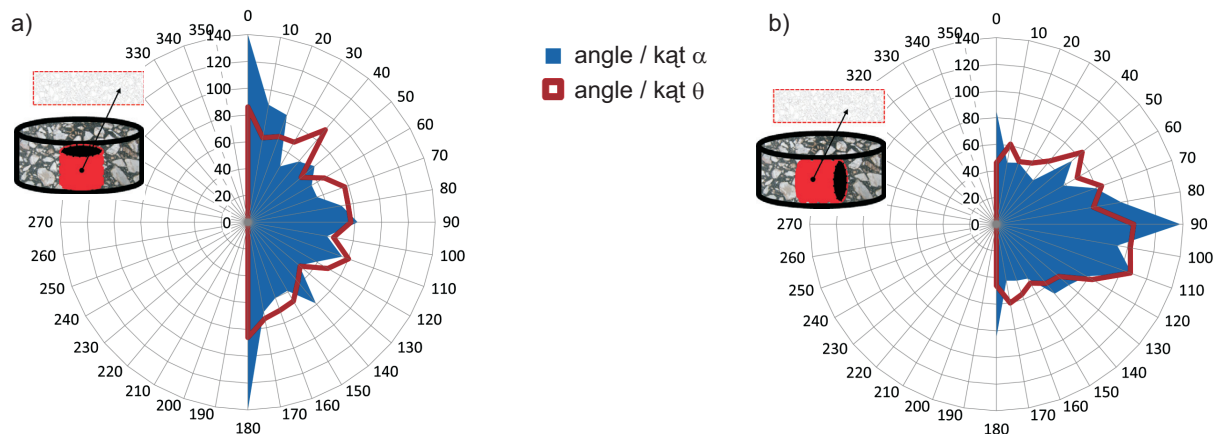


Fig. 10. Frequency distribution of angular orientation of mineral particles in the asphalt concrete AC 16: a) side surface of the cylindrical specimen drilled parallel to the axis of the core, b) side surface of the cylindrical specimen drilled perpendicularly to the axis of the core

Rys. 10. Rozkład częstości kątów zorientowanych ziaren mineralnych w betonie asfaltowym AC16: a) powierzchnia poboczniczy rdzenia wyciętego równoległe do osi odwiertu, b) powierzchnia poboczniczy rdzenia wyciętego prostopadłe do osi odwiertu

Przeprowadzona analiza rozkładu ukierunkowania ziaren w mieszance mineralno-asfaltowej AC16 wykazała ukierunkowanie ziaren równoległe do płaszczyzny poruszania się urządzenia rozkładającego oraz kierunku zagęszczania walcem drogowym. Można stwierdzić, że badana mieszanka mineralno-asfaltowa charakteryzuje się pierwotną anizotropowością struktury szkieletu mineralnego uwarunkowaną najprawdopodobniej kierunkiem oddziaływania urządzeń wbudowujących i zagęszczających (rozkładarka, walec). Stwierdzenie występowania pierwotnej anizotropowości w mieszance mineralno-asfaltowej instynktownie wydaje się logiczne i wynika z charakteru prowadzonych procesów technologicznych, co przeczy powszechnie przyjętemu twierdzeniu o anizotropowości materiału i jego pracy w konstrukcji nawierzchni drogowej. Dlatego ilościowe określenie występowania strukturalnej anizotropowości materiału i jej skorelowanie z właściwościami mechanicznymi powinno umożliwić weryfikację istotności jej wpływu na zachowanie się materiału w konstrukcji.

Biorąc pod uwagę metodologię oceny pierwotnej anizotropowości mieszanki mineralno-asfaltowej należy stwierdzić, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest ocena struktury mieszanki w płaskim pionowym przekroju. Związane to jest niestety z koniecznością zniszczenia próbki poprzez jej przecięcie co warunkuje kolejność czynności postępowania z próbką i nie zawsze jest możliwe. Wyjątek stanowi przypadek oceny zorientowania ziaren w próbkach pochodzących z nawierzchni drogowej gdzie albo nie występuje zorientowanie ziaren, albo ziarna są zorientowane pod kątem 0° . Ocena struktury próbki pobranej równoległe do płaszczyzny nawierzchni, byłaby najkorzystniejsza i nie różni się jakościowo od oceny próbki pobranej prostopadle, natomiast jest możliwa jedynie przy grubości warstwy równej lub większej od 10 cm.

4.2. OCENA JEDNORODNOŚCI ROZMIESZCZENIA ZIAREN W BETONIE ASFALTOWYM

Ocenę jednorodności rozmieszczenia ziaren w mieszance przeprowadzono analizując strukturę płaszczyzny pobocznic walca wyciętego prostopadle do płaszczyzny nawierzchni oraz płaszczyznę uzyskaną z przecięcia tego walca w płaszczyźnie przekroju osiowego. Ocena struktury z wykorzystaniem pobocznic walca jest trudniejsza w wykonaniu, ze względu na konieczność krzywoliniowej rejestracji obrazu, natomiast jest metodą nieniszczącą i umożliwia poddanie próbek dalszym badaniom mechanicznym. Ocena struktury mieszanki w przekroju osiowym

The performed arrangement analysis of particles in the asphalt mixture AC16 proved particle orientation parallel to the movement direction of both a paver and compacting roller. It is safe to say that the tested asphalt mixture was marked by the primal structural anisotropy of its mineral skeleton most probably conditioned by the directional influence of placement and compacting devices i.e. pavers and rollers. Finding the primal anisotropy in the asphalt mixture seems instinctively logical since it results from the character of performed technological processes, but it contradicts a commonly accepted statement on the material anisotropy and its effects on the structure of the road pavement. That is why the quantitative determination of the structural anisotropy existence and its correlation with mechanical properties should enable the verification of its influence importance on the behaviour of the material in a structure.

Taking into consideration the assessment methodology of primal anisotropy one ought to admit that the most advantageous solution is the structural assessment of the mixture in its flat vertical section. Unfortunately, it is associated with the necessity of destruction of a test piece by cutting it. Consequently, it could make troublesome changes to the action sequence when dealing with the specimen. An exemption makes the assessment case of particle arrangement of test pieces coming from a road pavement either without any particle orientation, or with particles oriented at the angle 0° . The structural assessment of a specimen taken parallel to the pavement surface would be the most advantageous. Still, it would not be qualitatively different from the assessment of a specimen taken perpendicularly. However, the latter one is possible only with layers thickness of 10 cm or more.

4.2. ASSESSMENT OF DISTRIBUTIONAL HOMOGENEITY OF PARTICLES IN ASPHALTIC CONCRETE

The assessment of distributional homogeneity of particles in the mixture was carried out through investigations into the structure of lateral surface of a cylinder cut out perpendicularly to the pavement plane and the surface obtained by way of cutting that cylinder at the axial section plane. Such an investigation making good use of the cylinder lateral surface is difficult to perform for the necessity of curvilinear image acquiring. In spite of this, it is a nondestructive method which enables putting samples through further mechanical tests. Moreover, the evaluation of the mixture structure at the axial section plane is much easier

jest dużo łatwiejsza do wykonania (rejestracja obrazu na płaszczyźnie), ale powoduje nieodwracalne zniszczenie próbki.

W celu oceny jednorodności rozmieszczenia ziaren w mieszance, zarejestrowane obrazy przetworzono metodą analizy obrazu i ziarna podzielono na trzy grupy: frakcję piaskową o zakresie rozmiaru ziarna od 0,063 mm do 5 mm, frakcję drobnych grysów 5÷8 mm oraz frakcję grysową – ziarna większe od 8 mm. Wyniki obliczeń współczynnika zmienności struktury z podziałem na poszczególne grupy ziaren zestawiono w Tabl. 1÷3.

to carry out (the image acquiring on the plane), though it causes an irreparable destruction of a test sample.

With the aim of estimating homogeneity of distribution of particles in a mixture, the registered pictures were converted with the use of the image analysis method. Consequently, the particles were divided into three groups: a sand fraction with the range of particle sizes from 0.063 mm to 5 mm, a fraction of fine-coarse aggregate 5÷8 mm, and a fraction of large-coarse aggregate with particles bigger than 8 mm. The calculation results of the coefficient of structural variation divided into separate groups of particles are drawn up in Tables 1÷3.

Table 1. Distribution homogeneity assessment parameters of particles of dimensions 0.063÷5 mm in two types of the asphalt concrete

Tablica 1. Parametry oceny jednorodności rozmieszczenia ziaren o rozmiarze 0,063÷5 mm w betonie asfaltowym

Type of mixture and analysed surface Rodzaj mieszanki i analizowanej powierzchni	Average particles number Średnia liczba ziaren \bar{N}_A	Standard deviation Odchylenie standardowe $S(N_A)$	Coefficient of variation Współczynnik zmienności v
AC16 cross-section / przekrój	156.0	26.9	0.17
AC16 side surface / pobocznica	174.0	17.9	0.10
AC25 cross-section / przekrój	284.2	42.8	0.15
AC25 side surface 1 / pobocznica 1	231.2	17.1	0.07
AC25 side surface 2 / pobocznica 2	228.8	20.9	0.09

Table 2. Distribution homogeneity assessment parameters of particles of dimensions 5÷8 mm in two types of the asphalt concrete

Tablica 2. Parametry oceny jednorodności rozmieszczenia ziaren o rozmiarze 5÷8 mm w betonie asfaltowym

Type of mixture and analysed surface Rodzaj mieszanki i analizowanej powierzchni	Average particles number Średnia liczba ziaren \bar{N}_A	Standard deviation Odchylenie standardowe $S(N_A)$	Coefficient of variation Współczynnik zmienności v
AC16 cross-section / przekrój	8.0	2.2	0.28
AC16 side surface / pobocznica	9.1	2.5	0.27
AC25 cross-section / przekrój	16.0	3.3	0.21
AC25 side surface 1 / pobocznica 1	16.8	7.2	0.43
AC25 side surface 2 / pobocznica 2	14.2	4.4	0.31

Table 3. Distribution homogeneity assessment parameters of particles bigger than 8 mm in two types of the asphalt concrete

Tablica 3. Parametry oceny jednorodności rozmieszczenia ziaren większych od 8 mm w betonie asfaltowym

Type of mixture and analysed surface Rodzaj mieszanki i analizowanej powierzchni	Average particles number Średnia liczba ziaren \bar{N}_A	Standard deviation Odchylenie standardowe $S(N_A)$	Coefficient of variation Współczynnik zmienności v
AC16 cross-section / przekrój	8.0	2.2	0.28
AC16 side surface / pobocznica	9.1	2.5	0.27
AC25 cross-section / przekrój	16.0	3.3	0.21
AC25 side surface 1 / pobocznica 1	16.8	7.2	0.43
AC25 side surface 1 / pobocznica 2	14.2	4.4	0.31

Krzywa uziarnienia betonu asfaltowego ma postać funkcji potęgowej, która określa proporcje poszczególnych frakcji mineralnych w mieszance mineralno-asfaltowej. Frakcja piaskowa i drobnych grysów (od 0,063 mm do 5 mm) stanowi łącznie w jej składzie około 30-40% masy wszystkich materiałów mineralnych. Ze względu na rozdrobnienie materiału mineralnego, ziarna te stanowią najliczniejszą grupę w analizowanych mieszankach typu betonowego. Liczebność ziaren drobnych o rozmiarze od 0,063 mm do 5 mm w analizowanych betonach asfaltowych jest ponad dziesięciokrotnie większa niż grysowych o rozmiarze powyżej 5 mm (Rys. 11). Grupa ziaren drobnych charakteryzuje się ponadto największą wartością odchylenia standardowego liczebności ziaren w poszczególnych polach pomiarowych wydzielonych z całego obrazu. Największe zróżnicowanie liczebności ziaren drobnych świadczy o największej przypadkowości ich rozłożenia jako frakcji wypełniającej, a nie tworzącej szkieletu mineralnego. Jednoczesna duża wartość odchylenia standardowego oraz duża liczba ziaren drobnych pozwalają jednak ocenić strukturę ich rozkładu w analizowanych mieszankach jako jednorodną (najmniejsza wartość współczynnika zmienności ν). Wraz ze wzrostem wielkości ziarna, maleje liczebność takich ziaren w mieszance (Rys. 11) oraz wartość odchylenia standardowego liczebności ziaren w poszczególnych polach pomiarowych. Stwierdzono dwukrotny wzrost wartości współczynnika zmienności ν ziaren o rozmiarze powyżej 5 mm w porównaniu do ziaren drobnych (Rys. 12). Ziarna grysowe tworzą szkielet mineralny i ich niejednorodne rozłożenie może wpływać na właściwości fizyczne i mechaniczne mieszanki takie jak zawartość wolnych przestrzeni będąca miarą zagęszczenia, sztywność czy odporność na koleinowanie.

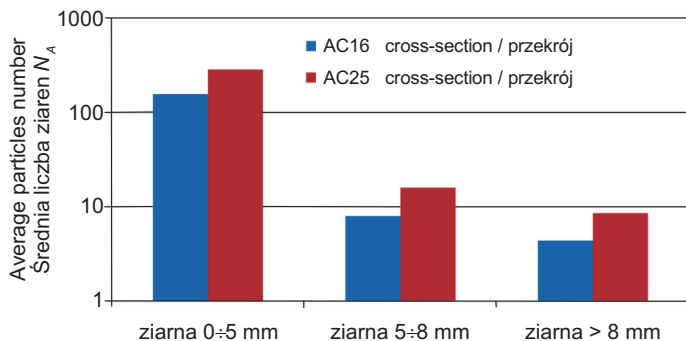


Fig. 11. Average number of particles N_A in the individual size groups for asphalt concrete AC16 and AC25

Rys. 11. Średnia liczebność ziaren N_A w poszczególnych grupach frakcji ziaren w mieszankach AC16 i AC25

The grading curve of bituminous concrete in the form of an exponential function determines proportions of individual mineral fractions in the asphalt mixture. The fraction of sand and fine particles (from 0.063 mm up to 5 mm) altogether make up circa 30-40 per cent of the mass of all mineral materials forming its size grading. Just due to their break-up these particles make the most numerous group of the concrete type mixtures being objects of analyses. The amount size of fine particles in sizes from 0.063 mm up to 5 mm in the analysed asphalt concrete is more than tenfold bigger than aggregate particles in sizes above 5 mm (Fig. 11). Moreover, the group of fine particles are marked by the highest value of standard deviation of the particle amount size in individual measurement fields marked off the whole image. The highest diversity of the amount size of fine particles proves their vast distributional randomness as a filling fraction, but not making the mineral skeleton. At any rate, the simultaneous high value of the standard deviation and great number of fine particles enable to recognise their structural distribution in the analysed mixtures as a homogenous one (the lowest value of the variation coefficient ν). The amount size of such particles in the mixture (Fig. 11) and the value of its standard deviation in the separate measurement areas diminishes with the growth of grain size. The twofold increase in the variation coefficient ν of particles in sizes above 5 mm in comparison with fine particles (Fig. 12) was found. Coarse particles make up the mineral skeleton therefore their heterogeneous distribution may influence physical and mechanical properties of a mixture such as the air voids content being a measure of compaction, stiffness, or rutting resistance.

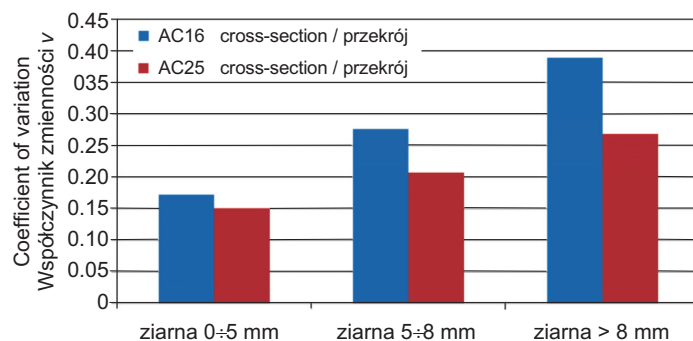
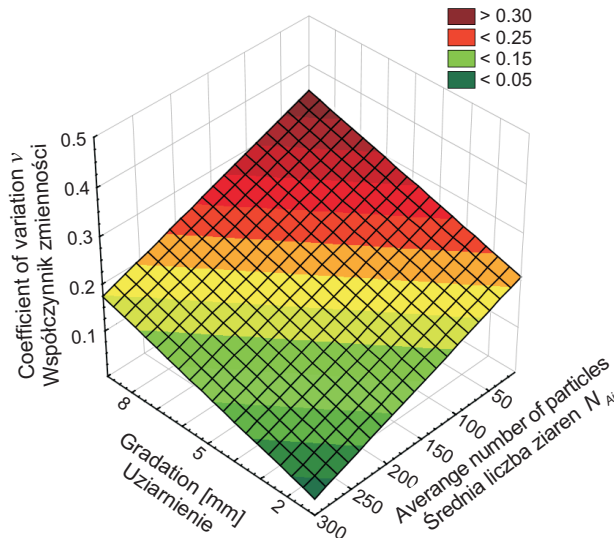


Fig. 12. Homogeneity of individual size groups for asphalt concrete AC16 and AC25

Rys. 12. Jednorodności poszczególnych grup frakcji ziaren w mieszankach AC16 i AC25

W pracy przeprowadzono statystyczną analizę istotności wpływu wielkości maksymalnego uziarnienia mieszanki (AC16 i AC25) oraz wielkości ziaren poszczególnych grup frakcji na zmianę współczynnika zmienności ν rozkładu ziaren w mieszance z wykorzystaniem jednoczynnikowej i wieloczynnikowej analizy wariancji z uwzględnieniem efektów wyższego rzędu z interakcjami. Na podstawie rozkładu F-Snedecora określono wartość prawdopodobieństwa p na podstawie której wnioskowano, że dany czynnik jakościowy wpływa w istotnym stopniu na zmianę średniej wartości danej cechy, czyli że hipoteza o jego istotności została przyjęta, gdyż spełniony został warunek: $p < \alpha$, gdzie $\alpha = 0,05$.

Na Rys. 13 przedstawiono uogólnioną zależność współczynnika zmienności ν od wielkości uziarnienia ziaren analizowanej frakcji oraz jej liczebności w mieszance. Można stwierdzić, że niejednorodność struktury mieszanki zwiększa się ($\nu \uparrow$) w zakresie grubszych frakcji ziaren (> 5 mm) wraz ze spadkiem średniej liczby tych ziaren N_A . Liczebność dużych ziaren w mieszance jest najmniejsza pomimo, że ziarna te stanowią największą część masy próbki. Można zatem stwierdzić, że najmniej liczna grupa ziaren, które tworzą nośny szkielet mineralny mieszanki mineralno-asfaltowej, jest najbardziej narażona na rozsegregowanie i w istotny sposób wpływa na ocenę jednorodności analizowanej struktury. Jednowymiarowy test statystyczny analizy wariancji wykazał istotność wpływu wielkości maksymalnego uziarnienia mieszanki ($p = 0,004$) oraz wielkości ziaren poszczególnych grup frakcji ($p = 0,000$) na zmianę średniej liczebności ziaren N_A . Istotna zależność współczynnika zmienności ν w teście jednowymiarowym została potwierdzona jedynie w odniesieniu do wielkości ziaren poszczególnych grup frakcji ($p = 0,014$).



The paper covers the statistical analysis of influence significance of the maximum particle-size distribution in the mixture (AC 16 and AC 25), and the particle size of individual fraction groups with respect to the change in the coefficient of variation ν for mixture particles putting to use the monofactorial and multifactorial variance analyses also taking into consideration high level effects including interactions. The value of probability p defined with the use of the Fisher-Snedecor distribution exposed reasons for changes to the mean value of a given factor to a considerable degree induced by a given quality factor. Remarkably enough, its significance hypothesis turned out to be acceptable because the condition: $p < \alpha$, with $\alpha = 0.05$, was satisfied.

Fig 13 depicts the generalised dependence of variation of the coefficient ν versus the particle size of the analysed fraction and its amount size in the mixture. An increase ($\nu \uparrow$) in heterogeneity of the mixture structure within the range of coarser particle fractions (> 5 mm) combined with a decrease of the average size N_A of these particles can be observed. The amount size of large coarse particles in the mixture is the most modest in spite of the fact that they make the largest part of the sample mass. Therefore, one might say that the least numerous group of particles making up the load bearing mineral skeleton of the asphalt mixture runs the most risk of desegregation and substantially influences the assessment of the analysed structural homogeneity. A unidimensional statistical test of variance analysis proved the impact significance of the maximum particle-size distribution of the mixture ($p = 0.004$) and particle sizes of individual fraction groups ($p = 0.000$) on the change to the average particle size N_A . The significant dependency of coefficient of variation ν in the unidimensional test was proved only in relation to particle sizes of separate fractions ($p = 0.014$). While investigating the simultaneous impact of changes to the coefficient of variation ν together with the average particle size N_A upon maximal grading size and particle sizes of separate fraction groups, their substantial dependency reached the level $p = 0.029$ in the course of a multidimensional test along with high level interactions.

Fig. 13. Relationship between coefficient of variation ν on gradation and average number of particles within given size range N_{Ai} in examined asphalt concrete
Rys. 13. Zależność współczynnika zmienności ν od uziarnienia mieszanki oraz średniej liczebności ziaren danej frakcji N_{Ai} w badanych betonach asfaltowych

Rozpatrując jednoczesny wpływ zmiany wartości współczynnika zmienności v oraz średniej liczebności ziaren N_A od maksymalnego uziarnienia mieszanki oraz wielkości ziaren poszczególnych grup frakcji, w teście wielowymiarowym z interakcjami wyższego rzędu, stwierdzono ich istotną zależność na poziomie prawdopodobieństwa $p = 0,029$. Test wielowymiarowy potwierdził założenie, że wraz z jednoczesnym wzrostem uziarnienia mieszanki oraz zmianą liczebności ziaren grubych tworzących szkielet mineralny betonu asfaltowego zmianie ulega jednorodność rozłożenia ziaren w funkcji ich liczebności.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że istnieje możliwość zastosowania metody analizy obrazu do oceny anizotropowości strukturalnej szkieletu grysowego mieszanki mineralno-asfaltowej. Mieszanka mineralno-asfaltowa typu betonowego charakteryzuje się pierwotną anizotropowością struktury szkieletu grysowego zgodną z kierunkiem poruszania się urządzenia rozkładającego oraz kierunkiem zagęszczania. Badania wykazały, że metodologicznie najkorzystniejszym rozwiązaniem jest ocena struktury mieszanki mineralno-asfaltowej w płaskim pionowym przekroju. Ocena zorientowania ziaren w płaszczyźnie zakrzywionej na pobocznicy próbki może służyć natomiast do oceny zorientowania ziaren w próbkach pochodzących z nawierzchni drogowej do stwierdzenia czy i w jakim stopniu ziarna są zorientowane równolegle do płaszczyzny nawierzchni czy zorientowanie nie wystąpiło.

W pracy wykazano, że wraz ze wzrostem wielkości ziaren grysowych maleje ich liczba w betonie asfaltowym oraz rośnie niejednorodność ich rozłożenia w strukturze mieszanki. Stwierdzono dwukrotny wzrost wartości współczynnika zmienności v ziaren o rozmiarze powyżej 5 mm w porównaniu do ziaren drobnych. Wykazano, że najmniej liczna grupa ziaren grysowych, które tworzą nośny szkielet mineralny betonu asfaltowego, jest najbardziej narażona na rozsegregowanie i w istotny sposób wpływa na ocenę jednorodności analizowanej struktury.

INFORMACJE DODATKOWE

Autor dziękuje za wsparcie otrzymane w ramach stypendium współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego realizowanego przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej w ramach projektu „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”.

The multidimensional test proved an assumption that the distribution homogeneity of particles becomes the subject to change in relation to their amount size when the mixture grading increases and the presence of coarse particles forming the mineral skeleton of bitumen concrete changes.

5. CONCLUSIONS

On the grounds of the research and analyses carried out one may conclude an applicable possibility of the image analysis method for the structural anisotropy assessment of a coarse aggregate skeleton of asphalt mixture. The distinctive feature of an asphalt mixture of the concrete type is its primal structural anisotropy of a coarse aggregate skeleton in accordance with the movement direction of both a paver and compacting roller. The research proved that the flat vertical section provides the best methodological solution for the structural assessment of an asphalt mixture. Furthermore, the assessment of particle arrangement on the curved lateral surface of the sample may be used not only for the estimation of particle arrangement in samples coming from the road pavement, but also for finding whether or not the particles are oriented parallel to the pavement plane, then for establishing extent of the effect.

An increase in the coarse aggregate particle size accompanied by a decrease in their amount size and the growth of distribution heterogeneity in the structure of asphalt mixture is pointed out in the paper. The twofold increase in the coefficient of variation v for particles in sizes above 5 mm in comparison with fine particles was found. It was demonstrated that the least numerous group of coarse aggregate particles making the mineral skeleton of asphalt concrete runs the most risk of desegregation and strongly influences the homogeneity assessment of the analysed structure.

ACKNOWLEDGMENTS

The author wishes to express his gratitude for the support provided by the European Social Fund of the European Union through the Centre for Advanced Study of the Warsaw University of Technology as a part of the “Warsaw University of Technology Development Programme”.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Swiertz D., Mahmoud E., Bahia H.*: Asphalt mixture compaction and aggregate structure analysis techniques: State of the art report. RILEM Technical Committee 206-ATB Meeting, TRB, Washington, 2010
- [2] *Pilat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010
- [3] *Copple F.*: Compaction – the only way to quality asphalt pavements. Materials and Technology Engineering and Science, The Materials and Technology Division of the Michigan Department of Transportation, No. 18, 1988
- [4] *Khan Z.A., Al-Abdul Wahab H.I., Asi I., Ramadhan R.*: Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction. Construction and Building Materials, **12**, 6-7, 1998, 373-384
- [5] *Dubois V., De La Roche Ch., Burban O.*: Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples. Construction and Building Materials, **24**, 6, 2010, 885-897
- [6] *Masad E., Tashman L., Samedavan N., Little D.*: Micro-mechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, **14**, 5, 2002, 374-383
- [7] *Wang L., Hoyos R.L., Wang J., Voyiadjis G., Abadie C.*: Anisotropic Properties of Asphalt Concrete: Characterization and Implications in Pavement Design and Analysis. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, **17**, 5, 2005, 535-543
- [8] *Glinicki M.A., Litorowicz A.*: Crack system evaluation in concrete elements at mesoscale. Bulletin of the Polish Academy of Sciences -Technical Sciences, **54**, 4, 2006, 371-379
- [9] *Zalocha D., Kasperkiewicz J.*: Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzanym. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **1**, 2, 2002, 107-118
- [10] *Król J.*: Nowa metoda analizy mikrostruktury asfaltów modyfikowanych polimerami. Drogi i Mosty, **7**, 4, 2008, 23-46
- [11] *Glinicki M.A., Litorowicz A.*: Diagnostyka rys w kompozytach o matrycy cementowej metodą komputerowej analizy obrazu. Drogi i Mosty, **6**, 3, 2007, 45-77
- [12] *Požarycki A., Rydzewski P.*: Cyfrowe przetwarzanie makroskopowych obrazów jezdni drogowych / Digital macroscopic image processing of roadways. Roads And Bridges - Drogi I Mosty, **11**, 3, 2012, 249-260
- [13] *Yue Z.Q., Bekking W.B., Morin I.*: Application of Digital Image Processing to Quantitative Study of Asphalt Concrete Microstructure. Transportation Research Record, 1492, 1995, 53-60
- [14] *Masad E., Muhunthan B., Shashidhar N., Harman T.*: Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis. Journal of Computing in Civil Engineering, **13**, 2, 1999, 88-95
- [15] *Masad E., Al-Rousan T., Bathina M., McGahan J., Spiegelman C.*: Analysis of Aggregate Shape Characteristics and its Relationship to Hot Mix Asphalt Performance. Road Materials and Pavement Design, **8**, 2, 2007, 317-350
- [16] *Kutay M.E., Arambula E., Gibson N., Youtcheff J.*: Three-dimensional image processing methods to identify and characterise aggregates in compacted asphalt mixtures. International Journal of Pavement Engineering, **11**, 6, 2010, 511-528
- [17] *Sefidmazgi N.R., Tashman L., Bahia H.*: Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis. Road Materials and Pavement Design, **13**, S1, 2012, 21-37
- [18] *Lytton L.R., Luo R., Zhang Y., Luo X., Koohi Y.*: Characterization of Engineered Properties of Asphalt Mixtures as Inputs to PANDA. Federal Highway Administration Expert Task Group Meeting, Wisconsin, 2010