



MACIEJ MALISZEWSKI

Instytut Badawczy
Dróg i Mostów (IBDiM)
mmaliszewski@ibdim.edu.pl



ADAM ZOFKA

IBDiM
azofka@ibdim.edu.pl



DOMINIKA
MALISZEWSKA

IBDiM
dmaliszewska@ibdim.edu.pl



KRZYSZTOF MIRSKI

IBDiM
k.mirski@ibdim.edu.pl



DARIUSZ SYBILSKI

IBDiM
d.sybilski@ibdim.edu.pl

Zagęszczanie dużych płyt z mma w laboratorium z zastosowaniem drogowego walca prowadzonego

Powszechnie stosowana w Polsce metoda zagęszczania próbek przy użyciu ubijaka udarowego typu Marshalla ma wiele ograniczeń. Głównym ograniczeniem jest nieadekwatność tego sposobu zagęszczania w porównaniu z warunkami zagęszczania warstwy asfaltowej przy użyciu walców drogowych. Podczas zagęszczania udarowego następuje kruszenie słabych ziaren kruszywa. Ograniczenie wynika również z maksymalnego wymiaru kruszywa w zagęszczanej mieszance mineralno-asfaltowej. Wielkość próbki i jej geometria nie sprzyja jednorodności uzyskiwanych zagęszczeń, przez co występują duże różnice nawet między próbkami pochodzącymi z tej samej serii. Kolejną dostępną metodą zagęszczania próbek w warunkach laboratoryjnych jest zastosowanie prasy żyrotorowej. Warunki zagęszczania w tej metodzie są bardziej zbliżone do zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej w warunkach budowy. W porównaniu z metodą Marshalla, nie następuje tak znaczące uszkodzenie ziaren kruszywa w próbce podczas zagęszczania. Do ograniczeń metody należy zaliczyć niejednorodność zagęszczenia wzdłuż osi pionowej, czyli występowanie stref mniejszego zagęszczenia przy podstawach, a większego zagęszczenia w strefie środkowej próbki walcowej. Zastosowanie laboratoryjnej zagęszczarki płytowej wydaje się być optymalnym rozwiązaniem, jeśli mamy na celu uzyskanie jednorodności zagęszczenia i przygotowanie próbki w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do warunków panujących w rzeczywistości. Rozwiązanie to jednak ma również swoje wady. Trzeba do nich zaliczyć wysoką cenę sprzętu. Im bardziej uniwersalnego rozwiązania poszukujemy, w szczególności urządzenia umożliwiającego przygotowanie próbek

o różnych wymiarach i grubości, tym wyższa cena. Wydaje się zatem, że najbardziej uniwersalnym i zbliżonym do warunków rzeczywistych wykonania warstwy asfaltowej urządzeniem będzie walec drogowy. Wymaga co prawda przygotowania specjalistycznego stanowiska, ale jest bez porównania tańszy niż najtańsza zagęszczarka płytowa do mieszanek mineralno-asfaltowych (mma).

Przygotowanie stanowiska do zagęszczania

Stanowisko zagęszczania dostosowano do wybranego urządzenia zagęszczającego i miało ono umożliwiać przygotowanie próbek o różnej grubości. Przygotowania zaczęto od wyboru walca prowadzonego. Na podstawie analizy dostępnych rodzajów sprzętu oraz ich możliwości wybór padł na walec 2-bębnowy, zasilany silnikiem diesla. Napęd walca odbywał się za pośrednictwem układu hydraulicznego na oba wały. Masa własna urządzenia gotowego do pracy wynosiła ok. 700 kg. System wibracji zapewniał wibrator centralny. Maksymalna siła odśrodkowa podczas zagęszczania z włączoną wibracją wynosiła 21 kN. Urządzenie wyposażono w układ zwilżania wałów wodą. Szerokość wałów wynosiła 650 mm, średnica 400 mm, a rozstaw osi 500 mm. Walec przedstawiono na fotografii 1.

Analizowano różne możliwości wykonania stanowiska zagęszczania próbek walcem. Pierwsza wersja stanowiska do zagęszczania dużych płyt powstała przy założeniu minimal-

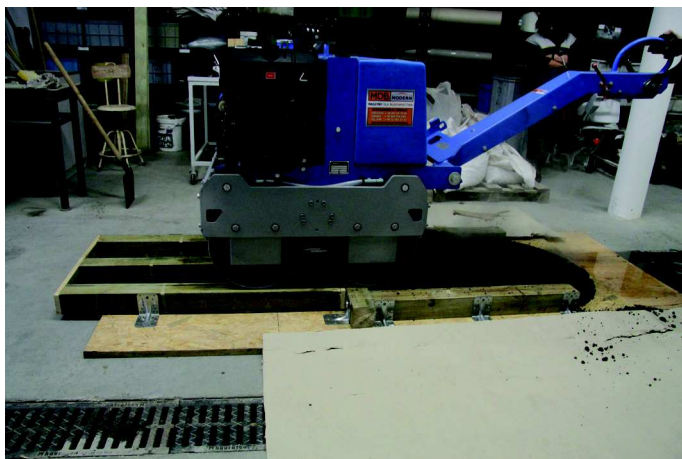


Fot. 1. Walec drogowy prowadzony, 2-bębnowy

nego stopnia złożoności (por. [2]), ale rozważane są dalsze modernizacje. Jako podłoże do zagęszczania próbek zastosowano płytę wiórową OSB. Do płyty przymocowano kantówki z drewna liściastego o wymiarze 100 × 100 mm, w rozstawie 700 mm. Rozstaw kantówek był większy niż szerokość wału, w celu umożliwienia bezkolizyjnego przemieszczania się walca podczas zagęszczania. Przygotowane w ten sposób stanowisko do zagęszczania płyt umożliwiało wykonanie próbek o wymiarach ok. 350 × 700 mm i grubości 100 mm. Aby mieszanka była jednorodnie zagęszczona zastosowano opory boczne. W pierwszej próbie przeprowadzonej na zewnątrz i przy mieszance układanej w 2 warstwach po ok. 50 mm, z powodu czynnika chłodzącego w postaci wiatru uzyskano zbyt słabe zagęszczenie, mimo układania warstwy w technologii ciepłe na ciepłym. Dlatego zdecydowano o przeniesieniu stanowiska do pomieszczenia, zwiększeniu temperatury zagęszczania oraz ograniczeniu układania mieszanki do pojedynczej warstwy. Odnotowano, że istotny wpływ na końcowy kształt oraz zagęszczenie próbki miała jednorodność i dokładność wstępnego ułożenia mma. Zagęszczanie wibracyjne mma, która ostygła poniżej temperatury efektywnego zagęszczania, powodowało powstawanie pęknięć poprzecznych. Właściwą próbę zagęszczania wykonano przy uwzględnieniu uwag z poprzednich prób.

Zagęszczanie rozpoczęto niezwłocznie po uformowaniu przyzmy do zagęszczania (fot. 2). W pierwszej kolejności zastosowano 8 przejazdów walca bez wibracji, a następnie 4 przejazdy walca z załączoną wibracją. W celu ograniczenia przywierania mieszanki do wałów walca, w pierwszej fazie zagęszczania zastosowano skropienie wałów wodą. Temperatura początkowa mieszanki wynosiła 160°C, a po kilku minutach obniżyła się do poziomu 120°C. Pomiar temperatury wykonywano przy użyciu termometru dotykowego z sondą wgłębną. Pomiar temperatury wykonywany był sondą pochyloną pod kątem ok. 45°, zanurzoną do ok. połowy warstwy.

W efekcie podjętych działań, uzyskano próbkę o większej jednorodności oraz lepszych parametrach charakteryzujących zagęszczenie. Uzyskano jednorodną wizualnie próbkę o wymiarach ok. 350 mm × 700 mm. Próbki do badań wydzielono przy użyciu piły tarczowej osadzonej na wózku. Powstałe w ten sposób 4 próbki przeznaczono do dalszych badań.



Fot. 2. Walec podczas zagęszczania próbki

Próbki do badań

Do przygotowania próbek badawczych przewidziano beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS 16 20/30. Mieszankę zaprojektowano według WT-2 2008 „Nawierzchnie asfaltowe”. Z obliczeń wynikało, że do przygotowania poletka do zagęszczania walcem drogowym potrzeba 160 kg mma. Pobrano zatem próbkę ogólną mieszanki przygotowanej w wytwórni zgodnie z normą PN-EN 12697-27, metodą z przyzmy. Próbki badawcze wykonano z mieszanki ponownie rozgrzewanej w laboratorium. Było to pierwsze rozgrzewanie po ostygnięciu mma po wyprodukowaniu. W celach porównawczych wykonano również próbki laboratoryjne przy użyciu dotychczas stosowanych urządzeń zagęszczających, z mieszanki przygotowanej w analogiczny sposób. Podsumowując, przygotowano następujące próbki:

- 1) Dwie duże płyty, przy użyciu walca drogowego prowadzonego, które miały wymiary ok. 350 × 700 mm i 100 mm grubości. Pierwsza płyta wykonana była w dwóch warstwach po 50 mm, a druga w pojedynczej warstwie 100 mm. Zastosowano energię zagęszczania odpowiadającą krotności przejazdów walca, w sposób opisany w poprzednim punkcie.
- 2) Dwie małe płyty przy użyciu zagęszczarki laboratoryjnej walcowej. Przygotowano małe płyty o wymiarach 180 × 500 × 100 mm. Zagęszczanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12697-33:2008. Próbki zagęszczano do wysokości 100 mm.
- 3) Dziewięć próbek walcowych 100 mm przy użyciu prasy żyratorowej. Przygotowano próbki o średnicy 100 mm i wysokości 100 mm. Zagęszczanie odbywało się zgodnie z normą PN-EN 12697-31, do uzyskania wymaganej gęstości objętościowej geometrycznej równej 2362 kg/m³.
- 4) Dziesięć próbek walcowych 101,5 mm przy użyciu ubijaka udarowego Marshalla. Przygotowano próbki o średnicy 101,5 mm i wysokości ok. 63,5 mm. Zagęszczanie próbek odbywało się zgodnie z normą PN-EN 12697-34, przy energii zagęszczania równej 2 × 75 uderzeń.

W celu dalszych badań próbki poddano obróbce mechanicznej przez cięcie piłą. Z próbek oryginalnych wyjętych z formy, po badaniach gęstości objętościowej, wydzielono mniejsze próbki do dalszych badań. Miało to na celu ocenę jednorodności konkretnego rodzaju próbek z uwagi na metodę zagęszczania. W przypadku próbek cylindrycznych (w formach Marshalla oraz w prasie żyratorowej) podział odbywał się w poziomie, w płaszczyźnie równoległej do podstaw, w około 1/3 i 2/3 wysokości próbki. Po przecięciu każdej z próbek cylindrycznych powstały trzy plastry o zbliżonych grubościach, zwane dalej: dolną podstawą, środkiem i górną podstawą. W przypadku próbek wyciętych z płyt zagęszczanych walcem prowadzonym, płytę ogólną podzielono w pionie na 4 części.

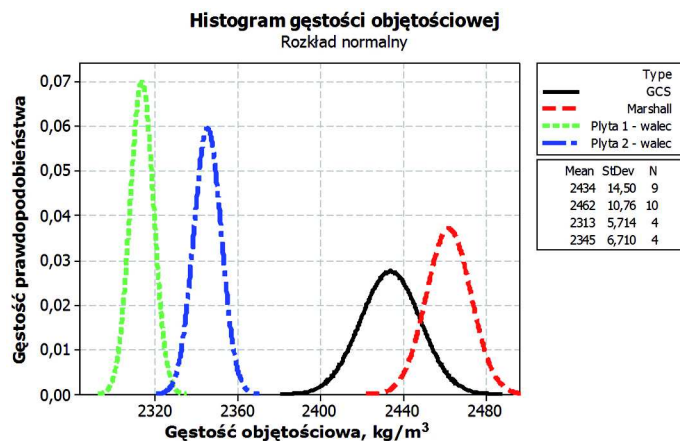
Metody badań

Program badań laboratoryjnych obejmował wykonanie oznaczenia gęstości objętościowej metodą B wg normy PN-EN 12697-6:2012. Badania przeprowadzono na prób-

kach na różnych etapach obróbki. W pierwszej kolejności przebadano próbki pierwotne, rozformowane, a następnie próbki poddawane obróbce przez cięcie.

Wyniki badań i analiza efektywności zagęszczania

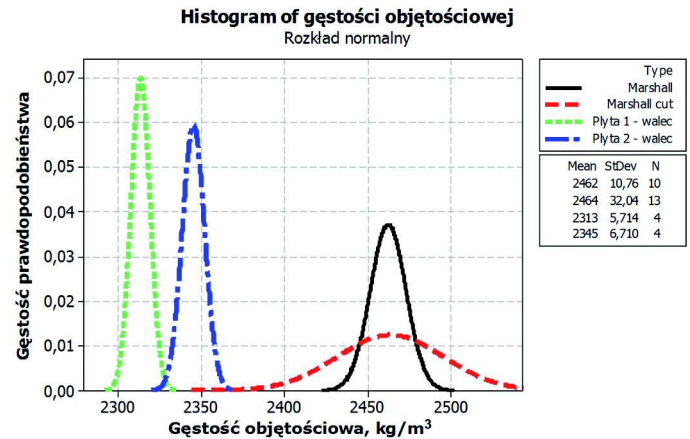
Analizę wyników badań rozpoczęto od zestawienia wyników na wykresach gęstości prawdopodobieństwa. Zestawiono rozkład wyników badań gęstości objętościowej (oś pozioma) oraz gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia danego wyniku (oś pionowa). Linia zieloną oznaczono płytę pierwszą zagęszczoną walcem, linią niebieską płytę drugą zagęszczoną walcem, linią czerwoną próbki Marshalla, a czarną próbki z prasy żyratorowej (GCS). Wykresy przedstawiono na rys. 1. Z analizy wynika, że przy założeniu rozkładu normalnego, najlepszą jednorodność wyników badań uzyskano na próbkach wyciętych z poletka zagęszczanego przez walec. Zarówno pierwsza, jak i druga próba zagęszczania walcem przyniosła mały rozrzut wyników badań poszczególnych próbek. Pozytywne rezultaty osiągnięto w porównaniu z wynikami uzyskanymi metodami standardowymi, tj. ubijakiem Marshalla i w prasie żyratorowej. Najgorszy rezultat w kontekście powtarzalności wyników badania uzyskano w przypadku próbek wykonanych w prasie żyratorowej, co nie było oczekiwane. Próbki referencyjne, w tym przypadku próbki Marshalla, uzyskały największe wartości gęstości objętościowej. Próbki żyratorowe miały nieco mniejsze gęstości objętościowe, a najmniejsze wartości uzyskano w przypadku próbek zagęszczanych walcem. Przyczyny zróżnicowania gęstości objętościowych próbek wykonanych przy użyciu walca opisano w punkcie dotyczącym przygotowania stanowiska zagęszczania. Z badań wynika, że procedura zagęszczania przy użyciu walca nadal wymaga dopracowania w celu uzyskiwania większych wskaźników zagęszczenia.



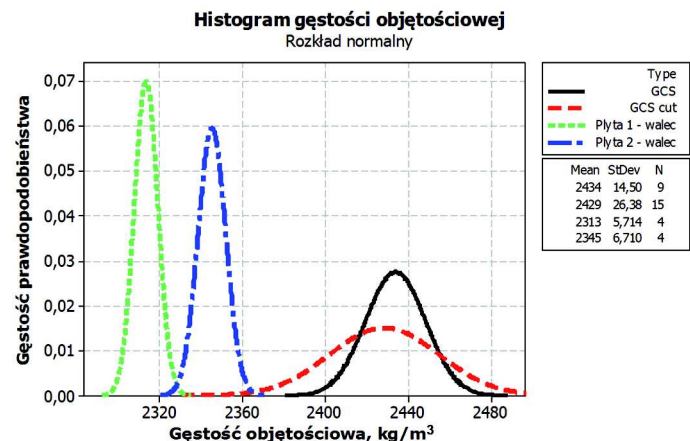
Rys. 1. Wykresy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wyników badań gęstości objętościowej próbek pierwotnych

Następnie przeanalizowano próbki wycięte z próbek pierwotnych (rys. 2 i rys. 3). Linia zieloną oznaczono płytę pierwszą zagęszczoną walcem, linią niebieską płytę drugą zagęszczoną walcem, linią czerwoną próbki wycięte z próbek Mar-

shalla (oznaczenie Marshall cut), a czarną oryginalne próbki Marshalla. Z analizy wynika, że po cięciu próbek Marshalla na plastry, 3-krotnie wzrosło odchylenie standardowe, tj. spała jednorodność gęstości objętościowej tych próbek. W przypadku próbek z prasy żyratorowej po cięciu (rys. 5, oznaczenie GCS cut) w porównaniu z wynikami badań próbek oryginalnych (GCS) stwierdzono niespełna dwukrotne pogorszenie jednorodności gęstości objętościowej.



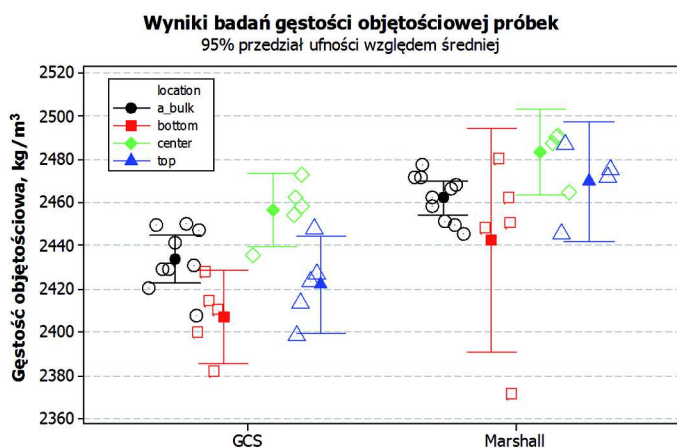
Rys. 2. Wykresy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wyników badań gęstości objętościowej próbek wyciętych z próbek pierwotnych Marshalla oraz płyt zagęszczanych walcem



Rys. 3. Wykresy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wyników badań gęstości objętościowej próbek wyciętych z próbek pierwotnych zagęszczonych prasą żyratorową oraz płyt zagęszczanych walcem

Na rys. 4 przedstawiono zbiór wyników badań wraz z podaniem przedziału ufności dla poziomu ufności wynoszącego 95% w stosunku do średniej wartości populacji oraz z uwagi na lokalizację badanego wycinka w próbce. Przedstawiono wyniki zarówno w stosunku do próbek oryginalnych, jak i ciętych. Próbkę całą oznaczono kolorem czarnym, dolną podstawę próbki oznaczono kolorem czerwonym, środek – kolorem zielonym, a górną podstawę – niebieskim. W zestawieniu zawarto próbki zagęszczane ubijakiem Marshalla i zagęszczane w prasie żyratorowej (oznaczenie GCS).

Z analizy wynika, że najszersze przedziały ufności uzyskano w przypadku wycinków zlokalizowanych na wierzchu



Rys. 4. Zestawienie wyników badań próbek zagęszczonych ubijakiem Marshalla i z prasy żyratorowej

i spodzie próbek, natomiast najmniejsze w przypadku wycinków ze środka próbek. Szersze przedziały ufności uzyskano w przypadku próbek zagęszczonych ubijakiem Marshalla, czyli odnotowano tam większy rozrzut wyników. Mniejszy rozrzut uzyskano w przypadku próbek z prasy żyratorowej przy nieco mniejszej gęstości objętościowej.

Analiza numeryczna orientacji ziaren kruszywa

Orientacja kruszywa w mieszance mineralno-asfaltowej była przedmiotem analiz w wielu pracach badawczych [4, 10, 11, 12]. W pracach tych wykazano m.in., że wewnętrzna struktura mieszanki mineralno-asfaltowej w kontekście orientacji kruszywa i efektywnej strefy kontaktowej w szkielecie kruszywowym ma istotny wpływ na jej cechy mechaniczne. Przykładowo mieszanka o tym samym składzie, ale różnej orientacji kruszywa po zagęszczeniu może mieć skrajnie różne właściwości mechaniczne.

Jednym z narzędzi do analizy struktury wewnętrznej mieszanki mineralno-asfaltowej jest analiza optyczna. Analiza optyczna jest obecnie uproszczona dzięki technikom numerycznym, natomiast nadal pozostaje utrudniona z uwagi na złożoność algorytmów i konieczność kontrolowania często drobnych elementów mających istotny wpływ na rezultaty. Do przeprowadzenia analizy optycznej metodą komputerową należało odpowiednio przygotować materiał badawczy. W tym celu część próbek Marshalla z prasy żyratorowej oraz płyty zagęszczone walcem przecięto w pionie, aby umożliwić ocenę rozkładu orientacji kruszywa w mma. Następnie, powierzchnię przeciętą próbek zeskanowano przy użyciu skanera cyfrowego z rozdzielczością 1200 dpi. Uzyskane cyfrowe kolorowe obrazy przekonwertowano do skali szarości. Następnie przeprowadzono binaryzację obrazu ze skali szarości do obrazu czarno-białego na bazie histogramu skali szarości oraz metody Otsu. Usunięto ziarna oraz szum obrazu o powierzchni nie przekraczającej 30 000 pikseli (około 3,6 × 3,6 mm). W dalszej kolejności przeprowadzono dwie operacje morfologiczne (ang. *closing and eroding*), usunięto

elementy mniejsze od 20 000 pikseli (około 3 × 3 mm) i ponownie przeprowadzono operację morfologiczną (ang. *filling*), w celu uzyskania jednoznacznych elementów ziaren. W ten sposób uzyskano podstawowe parametry każdego ziarna, np. powierzchnię, środek ciężkości, mimośród (e), wierzchołki ośmiokąta opisanego na ziarnie, parametry elipsy, która ma taki sam drugi moment centralny jak ziarno, itd.

Mimośród e zdefiniowano jako:
$$e = \frac{\sqrt{L^2 - l^2}}{L}$$

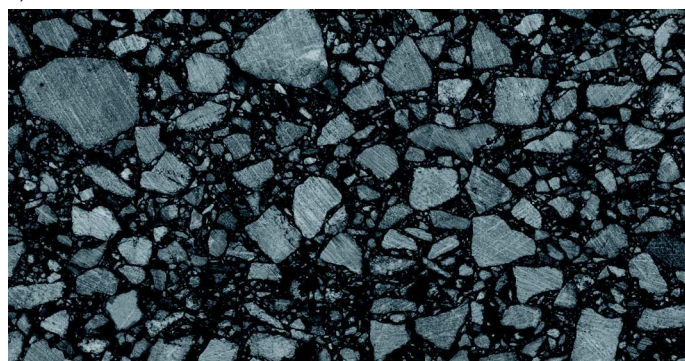
w którym:

L – długość wielkiej osi elipsy,

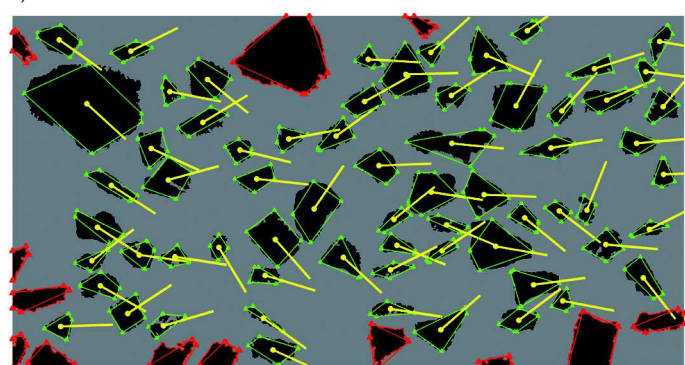
l – długość małej osi elipsy, np. $e = 0$ w przypadku koła, $e = 1$ w przypadku odcinka prostego.

Ostatnimi operacjami koniecznymi do przeprowadzenia było usunięcie niepełnych ziaren kruszywa występujących na krawędzi obrazu i ostatecznie obliczenie kąta nachylenia każdego ziarna, jako średniego kąta nachylenia dwóch najdłuższych boków ośmiokąta opisanego na ziarnie. Wszystkie konwersje, analizy i obliczenia przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Matlab. Na rysunku 5a przedstawiono obraz źródłowy, natomiast na rysunku 5b efekt analizy numerycznej tego obrazu. Na rysunku b widoczne są poszczególne ziarna kruszywa, kąty nachylenia poszczególnych ziaren. Elementy zaznaczone na czerwono zostały przez algorytm usunięte z analizy.

a)

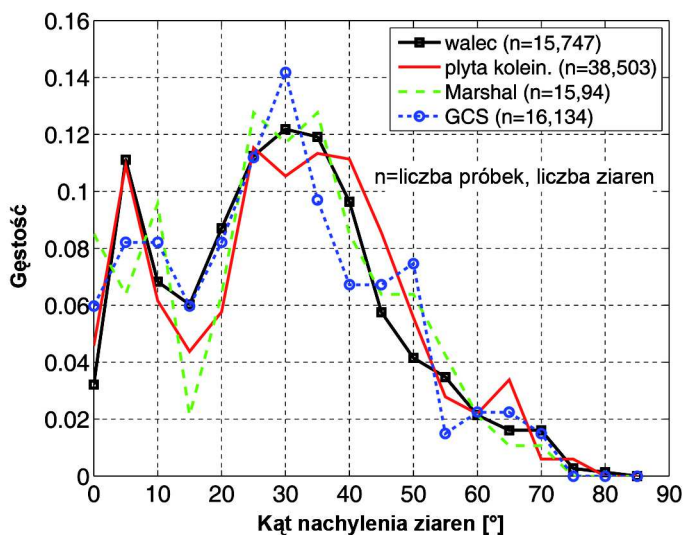


b)



Rys. 5. Przykład obrazu przed obróbką (a) i po obróbce (b)

Przedstawione rysunki są efektem wstępnej analizy obrazu. Na rys. 6 przedstawiono rozkład kruszywa w ocenianych mieszankach z podziałem na rodzaj próbek. Na uwagę zasługuje fakt, że rozkłady są mają zbliżony obraz.



Rys. 6. Znormalizowany rozkład kątów nachylenia ziaren w płaszczyznach pionowych próbek (kąty liczone od poziomu; tylko ziarna podłużne, tzn. mimośród $e > 0,8$)

Wnioski

Z pracy wynikają następujące wnioski:

- 1) Uzyskano satysfakcjonującą jednorodność próbek zagęszczanych drogowym walcem prowadzonym.
- 2) Zagęszczanie przy użyciu walca przynosi podobne rezultaty w kontekście orientacji kruszywa w mma, co metody stosowane dotychczas. Wymaga dalszej szczegółowej analizy bardzo interesujące zagadnienie dotyczące orientacji kruszywa w mieszance oraz ocena współzależności lub braku współzależności tej cechy z poprawnością zagęszczenia mieszanki.
- 3) Próbkę Marshalla, mimo mniejszych rozrzutów wyników badań uzyskanych w przypadku próbek pierwotnych, po przecięciu odznaczały się większymi rozrzutami wyników w obrębie danej próbki. Próbki z prasy żyrotorowej miały w porównaniu z próbkami Marshalla większy rozrzut wyników w przypadku próbek w postaci oryginalnej, ale ten rozrzut nie zwiększył się znacząco przy ocenie próbek przeciętych.

- 4) Należy dopracować metodę zagęszczania, w celu uzyskania lepszego wskaźnika zagęszczenia, przez modernizację stanowiska zagęszczania, ograniczenie obszaru zagęszczania oraz umożliwienie wykonywania próbek o różnych grubościach. Lepsze rezultaty można by uzyskać wykonując stanowisko przy użyciu betonu lub stali.
- 5) Zagęszczanie walcem drogowym jest potencjalnie dobrą alternatywną metodą przygotowania próbek. Badania zjawiska zagęszczalności i ocena jakości mieszanki stają się coraz bardziej popularne [1, 3, 5, 6, 7, 8 i 9].

Bibliografia

- [1] V. Adam, et al. Compaction of Asphaltic Concrete Pavement with High Intensity Pneumatic Roller, Research Report 61-7B, prepared for Louisiana DOT, 1963
- [2] B. Dożycki, J. Judycki, Wpływ metod zagęszczania mieszank mineralno-asfaltowych na wyniki badań ich cech mechanicznych, Drogi 1/2006,
- [3] Factors Affecting Compaction of Asphalt Pavements, TRR Circular No E-C105, '06
- [4] A.E. Hunter, G.D. Airey, A.C. Collop, Aggregate orientation and segregation in laboratory compacted asphalt samples, TRR, 1891, 2004
- [5] E. Kassem, et al. Laboratory Evaluation of Friction Loss and Compactability of Asphalt Mixtures, Research Report SWUTC/12/476660-00025-1, prepared for Southwest Region University Transportation Center, 2012
- [6] T.W. Kennedy, et al. Compaction of Asphalt Mixtures and the Use of Vibratory Rollers, Research Report 3-9-82-317, prepared for Texas DOT, 1984
- [7] N.P. Khosla, S. Sadasivam, Evaluation of the Effects of Mixture Properties and Compaction Methods on the Predicted Performance of Superpave Mixtures, Research Report FHWA/NC/2002-030, prepared for FHWA, 2002
- [8] E. Masad, et al., A Method for Predicting Asphalt Mixture Compactability and its Influence on Mechanical Properties, Research Report FHWA/TX-09/0-5261-2, prepared for FHWA, 2009
- [9] T.W. Vollar, D.I. Hanson, Development of Laboratory Procedure for Measuring Friction of Hma Mixtures – Phase I, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 06-06, 2006
- [10] Z.Q. Yue, I. Morin Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures Canadian Journ. of C. Engineering, 23, 1996
- [11] H. Zhu, W.C. Dass, c. Modeling of asphalt concrete Technical Report on the Project of Asphalt Concrete Constitutive Behavior to WL/FIVC, Applied Research Associates, Inc. at Tyndall AFB, Florida.
- [12] H. Zhu, 1998b. Contact Mechanism Based Asphalt Concrete Modeling. Presented at 12th ASCE Engineering Mechanics Conference in San Diego, California, May 1998.

Z serwisu GDDKiA

10 lat Polski w Unii Europejskiej

1 maja przypada dziesiąta rocznica przystąpienia Polski do Unii Europejskiej. Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju wraz z partnerami z całej Polski podejmuje liczne działania, które zaprezentują skalę zmian, jakie nastąpiły w Polsce dzięki obecności w UE i wykorzystaniu Funduszy Europejskich.



Akcja obejmuje m.in. **Dni Otwarte Funduszy Europejskich** – w całej Polsce w dniach od 1 do 11 maja beneficjenci umożliwią zwiedzanie swoich projektów bezpłatnie, ze zniżką lub zapewnią dodatkowe atrakcje, jak np. otwarcie niedostępnych na co dzień miejsc: hal produk-

cyjnych, kulis teatru czy budowanej stacji metra. Organizowane będą pikniki rodzinne, warsztaty, pokazy naukowe, zmagania sportowe, rajdy rowerowe, konkursy, koncerty, zabawy i wiele, wiele innych.

Wszystkie elementy akcji obecne będą na **antenach TVP**, która wyemituje kilkanaście rodzajów audycji, w tym programów angażujących widzów.

GDDKiA zachęca do korzystania z oferty przygotowanej w ramach Dni Otwartych, udziału w imprezach, konkursach oraz oglądania programów telewizyjnych!

Informacje o wszystkich działaniach podejmowanych w ramach akcji z okazji 10-lecia członkostwa Polski w UE znajdują się na stronie www.10latwue.pl.

(oprac. TS)