



MAGDALENA  
KUCIŃSKA

Politechnika Wroclawska  
magdalena.kucinska@  
pwr.wroc.pl

## Zagęszczanie próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z wykorzystaniem prasy żyratorowej

Projektując skład mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) przeznaczoną do wykonania warstwy nawierzchni drogowej należy zapewnić m.in. jej odporność na:

- odkształcenia trwałe,
- spękania odbite,
- spękania wywołane termicznie,
- działanie wody,
- starzenie.

Projektowanie mma polega na ustaleniu składu (uziarnienia) kruszywa mineralnego mieszanki, które tworzy szkielet struktury mma, określeniu ilości i jakości lepiszcza asfaltowego koniecznego do otoczenia wszystkich ziaren kruszywa i wypełnienia całkowicie lub częściowo wolnych przestrzeni utworzonych między ziarnami tak, aby powstała mieszanka spełniała zadane wymagania.

W celu zapewnienia wymaganej odporności warstwy z mma na odkształcenia plastyczne sugeruje się, aby zwracać szczególną uwagę na dobór składu mieszanki mineralnej, by odporność na odkształcenia plastyczne mma była osiągana przez dużą wartość tarcia wewnętrznego, a nie przez stosowanie lepiszcza o dużej lepkości.

Tarcie wewnętrzne mieszanki mineralnej zależy z jednej strony od ostrości krawędzi i chropowatości powierzchni ziaren zastosowanego kruszywa, a z drugiej od właściwego doboru uziarnienia.

W ostatnich latach nastąpił intensywny wzrost natężenia ruchu i obciążeń osi samochodowych. Przy wymiarowaniu nawierzchni uwzględnia się szereg czynników umożliwiających budowę modeli pozwalających na dokładniejsze projektowanie trwałych nawierzchni asfaltowych, odpornych na spękania niskotemperaturowe i zmęczeniowe oraz odkształcenia trwałe. Do badań cech, oznaczanych na próbkach laboratoryjnych sporządzonych z mma, pozwalających na projektowanie składu mma należą:

- odporność na koleinowanie,
- odporność na działanie wody,
- moduły sztywności,
- właściwości zmęczeniowe,
- właściwości niskotemperaturowe,
- ścinanie w prasie żyratorowej.

W Polsce wymagane [12] jest badanie wyżej wymienionych cech za wyjątkiem ścinania w prasie żyratorowej. W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem prasy żyratorowej do projektowania składu mieszanek mineralno-asfaltowych.

### Laboratoryjne zagęszczanie próbek mma

Różnice między metodami laboratoryjnego projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych nie wynikają tylko z procedur oceny, ale zależą w znacznym stopniu od zastosowanej metody zagęszczania próbek do badań. Mieszanka mineralno-asfaltowa dobrze zaprojektowana, z materiałów o wysokich parametrach i dobrze wytworzona, jeżeli nie zostanie poprawnie wbudowana (ułożona i zagęszczona) w nawierzchnię drogi, to jej właściwości takie jak odporność na koleinowanie, spękania itp. będą odbiegały od wymaganych [4,5].

Laboratoryjne metody, używane do symulacji zagęszczania na budowie, obejmują: bezpośrednie wałowanie, ubijanie, „żyrowanie” (jednoczesne zagęszczanie i ścinanie). Wytwarzanie mma zarówno w laboratorium, jak i w wytwórni w warunkach przemysłowych jest jednym z etapów przed dalszym jej wykorzystaniem. Proces wytworzenia powinien zapewnić zgodność wytworzonej mma z receptą. Próbki laboratoryjne mogą być przygotowane zarówno z mieszanki wytworzonej w wytwórni stacjonarnej na budowie, jak i w warunkach laboratoryjnych. Sposób wytworzenia mma do dalszych badań ma bardzo duży wpływ na uzyskiwane właściwości zagęszczonych, z takiej mma, próbek laboratoryjnych, a o tym wielu specjalistów zapomina. Należy zapewnić w laboratorium taki proces wytworzenia mma do wykonania próbek, aby odpowiadał procesowi wytwarzania mma w wytwórni w terenie. Drugi etap to zagęszczanie próbek z wytworzonej mma w laboratorium. Sposób zagęszczania próbek z mma w laboratorium powinien, w możliwie najpełniejszym stopniu, symulować proces zagęszczania mma na budowie, który jest realizowany przy pomocy walców, najczęściej stalowych (statycznych i/lub wibracyjnych). Zgodnie z Normami Europejskimi przewidziano zagęszczanie próbek mma w laboratorium przez wałowanie, ubijaniem Marshalla, z zastosowaniem wibrowania albo przy użyciu prasy żyratorowej. Wytworzenie mieszanki mineralno-asfaltowej w warunkach laboratoryjnych jest mniej czasochłonne i stosunkowo łatwiejsze do kontrolowania niż na budowie, a zatem zagęszczanie w badaniach laboratoryjnych powinno w dużym stopniu symulować warunki panujące w terenie. Zagęszczane laboratoryjnie próbki powinny charakteryzować się właściwościami zgodnymi z właściwościami nawierzchni z mma zagęszczonej na drodze nie tylko w kontekście gęstości i zawartości wolnych przestrzeni, ale także orientacji cząstek szkieletu mineralnego w mieszanke.

Zagęszczanie ma głównie na celu zmniejszyć zawartość wolnych przestrzeni, aby zapewnić optymalne ułożenie ziaren kruszywa mineralnego w warstwie albo w próbce laboratoryjnej i zwiększenie gęstości objętościowej mma.

Na zagęszczenie mają wpływ następujące czynniki:

- mieszanka mineralna – kształt, powierzchnia, tekstura kruszywa, które wpływają na rozkład pustek wolnej przestrzeni i łatwość zagęszczania mma,
- lepiszcze – rodzaj i zawartość lepiszcza, które ma wpływ na lepkość środka wiążącego w procesie wytwarzania mma na gorąco,
- technologia – warunki transportu mma z wytwórni na budowę, sposób wbudowywania (rodzaj i typ rozkładarki), temperatura mma, zestaw sprzętu zagęszczającego itp.

Poniżej przedstawiono, w ujęciu historycznym, metodykę zagęszczania próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych w laboratorium.

W 1939 roku Departament Autostrad w Stanie Teksas (ang. *Texas Highway Department*) [6] zainicjował badania dotyczące opracowania jakości mieszanek mineralno-asfaltowych i ich kontroli. W pierwszej kolejności ustalono kryteria dotyczące metod formowania próbek laboratoryjnych. Drugą ważną rzeczą, którą ustalono, było to, że próbki zagęszczone w laboratorium powinny osiągać taką samą gęstość objętościową albo zawartość wolnych przestrzeni, która uzyskiwana jest na drodze po wbudowaniu mma. Ponieważ gęstość objętościowa mma w nawierzchni na przestrzeni czasu ulega zwiększeniu (dogęszczanie mma pod wpływem ruchu samochodowego) pożądanym było, aby uwzględnić to na etapie projektowania i formowania próbek w laboratorium.

W 1950 roku w odpowiedzi na doświadczenia, które wykazały, że zagęszczanie ubijakiem Marshalla nieodpowiednio symuluje proces zagęszczania mma w warunkach rzeczywistych, opracowano urządzenie „zagęszczarkę obrotowo-ugniatającą”, działające na zasadach opracowanych przez *Texas Highway Department*. W tym unikatowym urządzeniu wykorzystywana była zasada ruchu wirowego wymuszonego przez dwupunktowy system podparcia próbki, umożliwiający „ruchomy” kąt bezwładności. Ponadto urządzenie rejestrowało w sposób ciągły naprężenie i wysokość zagęszczanej próbki w zależności od liczby obrotów.

Inna ścieżka historyczna prowadzi do LCPC (franc. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) [6] we Francji, gdzie również opracowano urządzenie będące pochodną maszyny z Teksasu. W przeciwieństwie do amerykańskiego urządzenia, kompaktor obrotowy (nazywany PGE) charakteryzował się stałym kątem ścian zewnętrznych, natomiast naprężenie pionowe było określone i wynosiło 600 kPa.

Dalsze prace i badania nad urządzeniami doprowadziły w konsekwencji do opracowania wymagań wobec prasy żyratorowej. Ustalono następujące wartości:

- ciśnienie pionowe 600 kPa,
- kąt bezwładności  $\alpha = 1,25^\circ$ ,
- prędkość obrotowa zagęszczania 30 obr./min.

Kąt bezwładności jest to kąt utworzony pomiędzy ściankami bocznymi cylindra i osią pionową podczas zagęszczania ruchem obrotowym, przy czym podstawy próbki są zawsze równoległe do siebie.

Termin SUPERPAVE (ang. *Superior Performing Asphalt Pavements*) określa nawierzchnię o polepszonych właściwo-

ściach eksploatacyjnych. Termin ten związany jest ściśle z badaniami prowadzonymi w latach 1988-1993 w USA o nazwie SHRP (ang. *Strategic Highway Research Program*). W wyniku realizacji tego programu powstał system całościowo obejmujący zagadnienia projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem rzeczywistych warunków pracy nawierzchni. Projektowanie metodą SUPERPAVE przewidziane jest na trzech poziomach w sposób uproszczony pokazany poniżej:

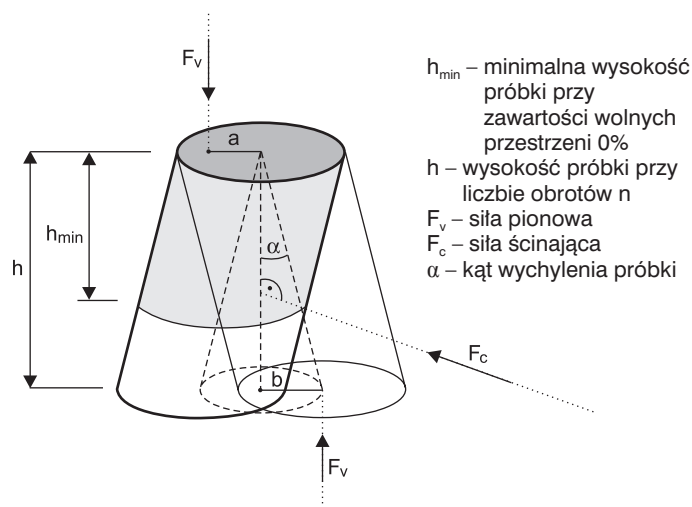
- I poziom – dobór składu mieszanki mineralno-asfaltowej,
- II poziom – wykonanie dodatkowych badań – określenie odporności mma na tworzenie się odkształceń trwałych oraz odporność na spękania zmęczeniowe i niskotemperaturowe,
- III poziom – ustalenie na podstawie badań o szerokim spektrum, w jaki sposób będzie zachowywać się mma w całym okresie eksploatacji.

System ten oparty jest na wykorzystaniu prasy żyratorowej, która służy zarówno do zagęszczania laboratoryjnego próbek z mma, jak i do określania właściwości mechanicznych mieszanki. Technika ta została wprowadzona w celu symulacji rosnącego obciążenia od pojazdów działającego na nawierzchnię [1,2,4].

## Wykorzystanie prasy żyratorowej

Zgodnie z [13], mieszanka mineralno-asfaltowa umieszczona jest w uprzednio wygrzanej w temperaturze zagęszczania cylindrycznej formie (średnica formy 100 mm lub 150 mm). Całość, po zamontowaniu w prasie żyratorowej, poddawana jest podczas ruchu obrotowego stałemu naprężeniu ściskającemu o wartości 600 kPa, przekazywanemu przez tłok na równoległe podstawy próbki. Próbka podczas zagęszczania obracana jest w prasie z prędkością 30 obr./min. Kąt bezwładności jest stały i wynosi  $1,25^\circ$ .

Wymuszony ruch okrężny formy powoduje, że oś podłużna wychylonej próbki porusza się po torze tworzącym obwiednię stożka, co zobrazowano na rysunku 1. Przebieg zagęszczania jest na bieżąco rejestrowany przez system i zależy od liczby obrotów „n”.



Rys. 1. Schemat zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej w prasie żyratorowej

Podczas zagęszczania w prasie żyratorowej, po każdym obrocie mierzona jest wysokość zagęszczanej próbki, co umożliwia ocenę zagęszczalności badanej mma. W dalszej kolejności wyznaczona zostaje  $G_{mm}$  (tzw. maksymalna teoretyczna gęstość objętościowa) oraz gęstość  $G_{mb}$  (gęstość objętościowa zagęszczonej mma) i zawartość wolnych przestrzeni w próbce mma w stosunku do liczby cykli (liczby obrotów).

Daje to ogromne możliwości i korzyści w stosunku do innych metod zagęszczania takich jak np. ubijak Marshalla, gdzie zmiany zawartości wolnych przestrzeni nie można określić w sposób ciągły w odniesieniu do energii, która została zastosowana podczas zagęszczania. W prasie żyratorowej otrzymuje się zatem rejestrację ciągłą zależności zmiany zawartości wolnych przestrzeni w funkcji liczby obrotów, czyli można próbować przewidzieć co będzie się działo z mieszanką mineralno-asfaltową po wbudowaniu jej w nawierzchnię i obciążeniu ruchem samochodowym, tzn. w trakcie eksploatacji. Niektóre prasy żyratorowe wyposażone są w rejestratory ciągłego zapisu danych, związanych z naprężeniem ścinającym w stosunku do liczby cykli. Pomiar taki umożliwia wyznaczenie energii zużytej podczas zagęszczania danej próbki, co pozwala porównać zużycie energii w tym urządzeniu z energią innych maszyn zagęszczających mma w laboratorium. Sporządzenie próbek w prasie żyratorowej przeprowadzane jest przy zadaniu żądanej liczby obrotów lub gęstości objętościowej (ustalenie wysokości próbki zagęszczanej – wysokość docelowa).

Wstępna liczba obrotów jest określana jako  $N_{pocz}$ . Jest to liczba obrotów, którą stosuje się, aby określić zdolność mieszanki mineralno-asfaltowej do zagęszczania się podczas jej wbudowywania. Mieszanki, które zagęszczają się zbyt szybko (zawartość wolnych przestrzeni przy zadanej wartości liczby obrotów jest za niska) mogą mieć skłonność do przemieszczania się zamiast do zagęszczania, co może prowadzić do tego, że mieszanki takie mogą być niestabilne w trakcie eksploatacji nawierzchni. Kolejną charakterystyczną wielkością jest  $N_{proj}$ , czyli projektowana liczba obrotów. Jest to liczba obrotów wymagana do wytworzenia próbki, która będzie miała taką samą gęstość jak oczekiwana na budowie po wskazanej ilości ruchu drogowego. Zazwyczaj jest to mieszanka o zawartości wolnych przestrzeni 4%(v/v). Natomiast maksymalna liczba obrotów określana jako  $N_{max}$ , wskazuje liczbę obrotów wymaganą do wytworzenia próbki z mma o gęstości, która teoretycznie nigdy nie powinna zostać przewyższona przez projektowaną mieszankę wbudowaną na drodze.

Łatwość zagęszczania różnych mieszanek mineralno-asfaltowych określają dwa typy parametrów: współczynnik zagęszczalności  $K$  oraz wskaźnik stabilności mieszanki  $MSI$  i indeks oporności mieszanki  $MRI$ .

### Współczynnik zagęszczalności $K$

Zgodnie z [15], należy utworzyć półlogarytmiczny wykres do zagęszczanej mieszanki utworzony przez prowadzenie dopasowanej krzywej przedstawiającej, w skali logarytmicznej, zależność zawartości procentowej wolnych przestrzeni  $V_a$  (lub tzw. procentową maksymalną, teoretyczną gęstością objętościową %  $G_{mm}$ ) od liczby cykli.

Zmiana zawartości wolnych przestrzeni w zagęszczonych próbkach w stosunku do energii zagęszczania określana jest na podstawie zależności (1):

$$V(n) = V(1) - K \ln(n) \quad (1)$$

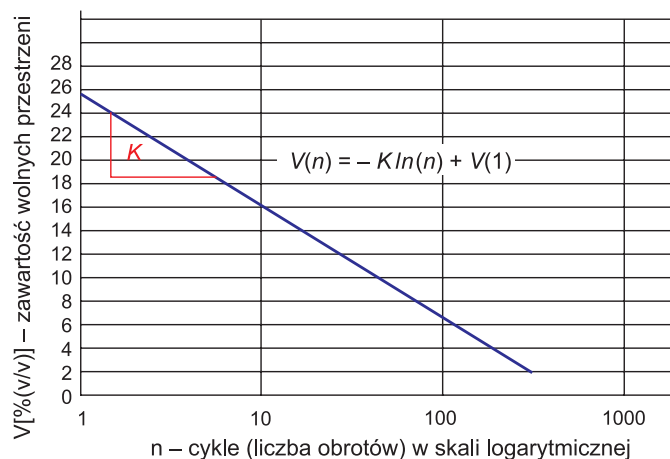
w której:

$V(n)$  – jest zawartością wolnych przestrzeni w  $n$  – cyklu, wyrażoną w procentach.

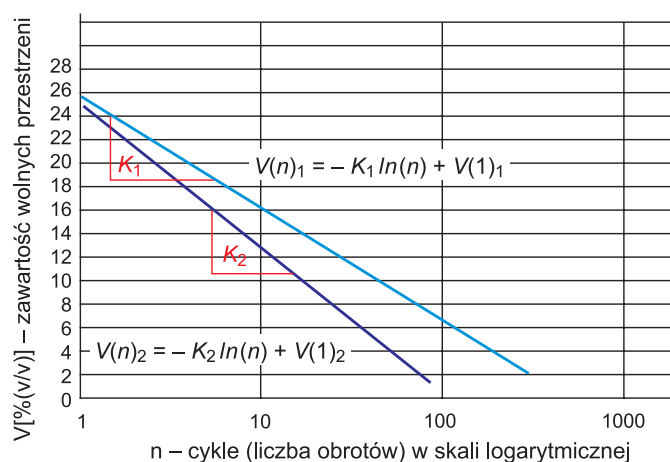
$V(1)$  – jest zawartością wolnych przestrzeni obliczoną do pierwszego cyklu, co odpowiada początkowej zawartości wolnych przestrzeni w mma przy zastosowaniu wyłącznie naprężenia pionowego. Innymi słowy, określa skłonności do zagęszczenia się mieszanki.

Współczynnik  $K$  odpowiada nachyleniu krzywej poprowadzonej na półlogarytmicznym wykresie, co przedstawiono na rysunku 2. Wartość  $n$  – jest liczbą obrotów próbki w prasie żyratorowej.

Na podstawie współczynnika  $K$  można próbować przewidzieć, które mieszanki są łatwiejsze do zagęszczania. Przy-



Rys. 2. Wykres przedstawiający zagęszczalność mieszanki mineralno-asfaltowej przy użyciu prasy żyratorowej



Rys. 3. Wykres przedstawiający zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych o zbliżonej początkowej zawartości wolnych przestrzeni, zagęszczonych przy użyciu prasy żyratorowej



kładowo, porównując mieszanki o zbliżonej wstępnej zawartości wolnych przestrzeni, te o wyższej wartości współczynnika  $K$  będą łatwiej (szybciej) zagęszczane, co przedstawia rysunek 3. W tym przykładzie mieszanka oznaczona nr 1 będzie się trudniej i wolniej zagęszczała, a co za tym idzie potrzebne będzie włożenie większej energii w celu zagęszczenia jej do określonej zawartości wolnych przestrzeni.

Współczynnik zagęszczalności  $K$  dostarcza informacji na temat łatwości zagęszczania mieszanek. Jednakże jego zastosowanie jest ograniczone do mieszanek o podobnej zawartości wolnych przestrzeni w początkowej fazie zagęszczania.

### Wskaźnik stabilności mieszanki $MSI$ i indeks oporności mieszanki $MRI$

Zagęszczanie znajduje się w bezpośrednim związku z zawartością wolnych przestrzeni, natomiast zawartość wolnych przestrzeni wpływa na właściwości mechaniczne i trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej. Mieszanki o dużej zawartości wolnych przestrzeni mogą być wrażliwsze i bardziej podatne na dogęszczanie pod wpływem ruchu samochodowego. Mieszanki o małej zawartości wolnych przestrzeni mogą być bardziej podatne na odkształcenia plastyczne. Ustalono, że wartość wolnych przestrzeni równa 2%(v/v) jest wartością krytyczną.

W celu analizy mieszanek mineralno-asfaltowych pod kątem zawartości wolnych przestrzeni ustala się dwa wskaźniki. Pierwszy wskaźnik odnosi się do energii stosowanej podczas początkowego zagęszczania (wbudowywania) mma, drugi odnosi się do „dogęszczania” wbudowanej w nawierzchnię mieszanki obciążonej ruchem samochodowym [11].

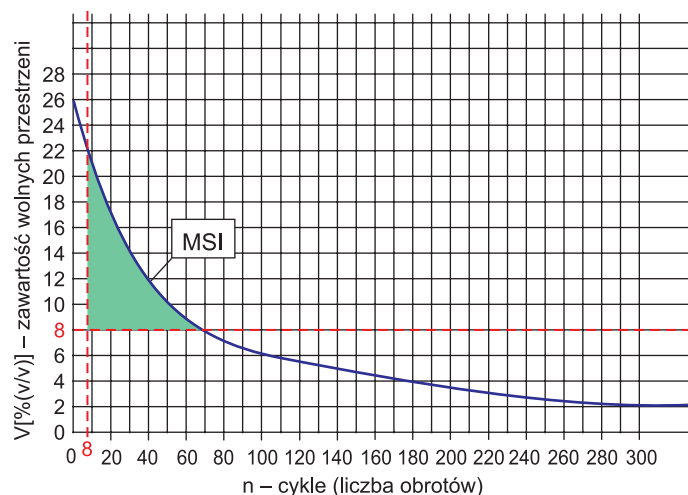
Wymaga się, aby projektowana mieszanka, przy jej zagęszczaniu w trakcie wbudowywania nie wymagała konieczności stosowania dużej ilości energii i wykazywała dużą odporność na dogęszczanie pod wpływem ruchu samochodowego.

Oba wskaźniki otrzymujemy na wykresie krzywej zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej uzyskanej po zagęszczeniu w prasie żyrotorowej.

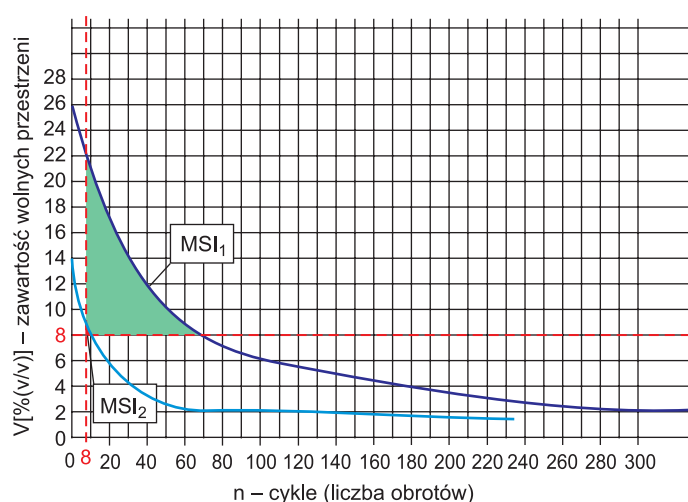
W celu określenia zużycia energii podczas zagęszczania wskaźnik  $MSI$ , został oparty na energetycznym indeksie zagęszczania [8]. Indeks ten oblicza się mierząc powierzchnię pod wykresem utworzoną między  $n = 8$  cyklem zagęszczania (co przedstawia pracę stosowaną przez typową układarkę podczas wbudowywania nawierzchni, przed użyciem walca do dalszego zagęszczania) i zawartością wolnych przestrzeni równą 8%(v/v), co zobrazowano na rysunku 4.

Wartość zawartości wolnych przestrzeni, równa 8%(v/v), wyznaczona została na podstawie specyfikacji europejskich, w których gęstości mieszanek mineralno-asfaltowych w zależności od grubości powinny wynosić 97–98% gęstości mieszanek zagęszczonych wg Marshalla, lub innymi słowy powinny zawierać 7–8%(v/v) wolnych przestrzeni oznaczonych wg [13].

Przykładowo na rysunku 5 zobrazowano proces zagęszczania dwóch mieszanek. Mieszanka oznaczona indeksem 2



Rys. 4. Wykres obrazujący wskaźnik  $MSI$



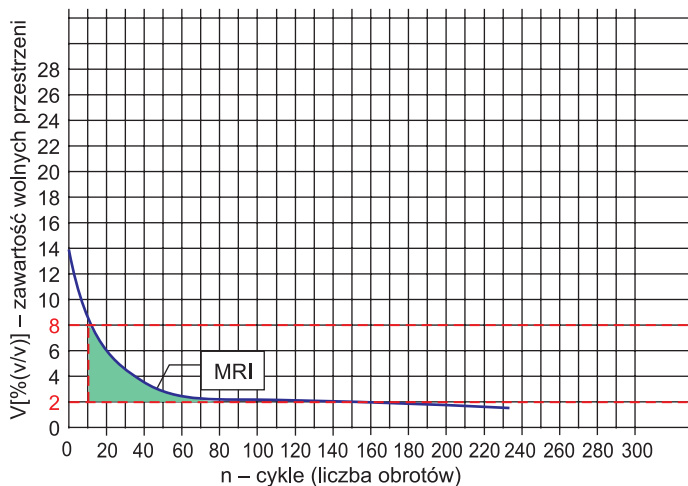
Rys. 5. Wykres obrazujący wskaźniki  $MSI$  dwóch różnych mieszanek mineralno-asfaltowych

dużo łatwiej się zagęszcza niż mieszanka oznaczona indeksem 1, co obrazują wskaźniki  $MSI$ .

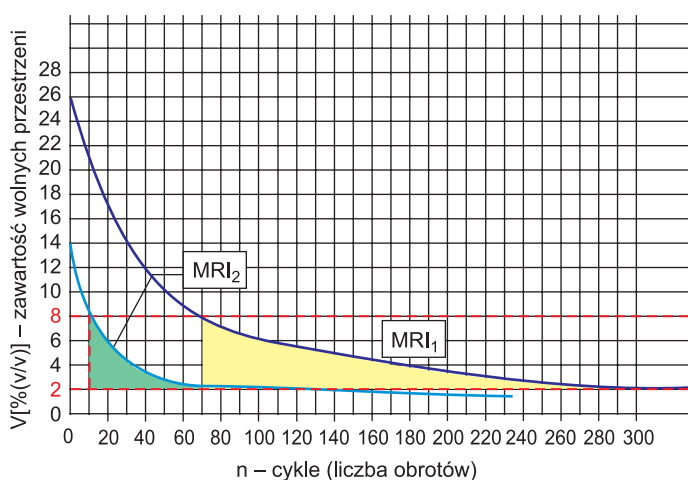
Wskaźnik oporności mieszanki ( $MRI$ ) powiązany jest z natężeniem ruchu [8]. Stanowi on zdolność mieszanki mineralno-asfaltowej do oporu przed dogęszczaniem, gdy jest już poddana ruchowi samochodów, czyli podczas jej eksploatacji.

$MRI$  jest określany, jako obszar pomiędzy 8%(v/v) a 2%(v/v) zawartością wolnych przestrzeni w zagęszczonej mieszance mineralno-asfaltowej na krzywej zagęszczania – rysunek 6. Mieszanki o wyższych wartościach wskaźnika  $MRI$  są bardziej pożądane, ponieważ oczekuje się, że będą bardziej odporne i wytrzymałe na oddziaływanie ruchu w trakcie ich eksploatacji. Porównanie wskaźników  $MRI$  dwóch różnych mieszanek mineralno-asfaltowych zobrazowano na rysunku 7. W tym wypadku mieszanka z indeksem 1 ma większy wskaźnik  $MRI$ , a co za tym idzie jest bardziej odporna na dogęszczanie pod ruchem samochodowym.

W konsekwencji pożądane jest, aby projektowana mma miała stosunkowo niską wartość wskaźnika  $MSI$  i wysoki



Rys. 6. Wykres obrazujący wskaźnik MRI



Rys. 7. Wykres obrazujący wskaźniki MRI dwóch różnych mieszanek mineralno-asfaltowych

wskaźnik *MRI*, ponieważ będzie stanowić to połączenie najbardziej funkcjonalne – łatwe zagęszczanie i dużą odporność na dogęszczanie podczas pracy nawierzchni [11].

Jak można zauważyć, wykorzystując prasę żyratorową już na wstępnym etapie projektowania możemy starać się modelować projektowaną *mma* i próbować przewidzieć jak zachowa się pod obciążeniem ruchem.

## Podsumowanie

Zagęszczanie laboratoryjne mieszanek mineralno-asfaltowych ma na celu przede wszystkim odwzorowanie zagęszczenia mieszanki wbudowanej w nawierzchnię, w celu umożliwienia symulacji procesów, którym dana nawierzchnia będzie poddawana. W Polsce przeszło kilkanaście lat temu odbyła się debata na temat zagęszczania *mma*, gdyż zagęszczanie metodą Marshalla było niewystarczające i niedostosowane do aktualnego obciążenia ruchem. Zatem wprowadzono różne metody zagęszczania do różnych typów

badania, gdyż jak dotąd dominująca metoda zagęszczania, stosowana w laboratorium niewystarczająco symulowała zagęszczanie na budowie.

W przypadku badania tych samych właściwości *mma* na próbkach zagęszczonych różnymi metodami, uzyskuje się różne wartości, co może prowadzić do błędnych wniosków dotyczących właściwości tych mieszanek. Wpływ metody zagęszczania był analizowany już w przeszłości, między innymi przez Browna [3]. W swoich badaniach pokazał on, że rodzaj wybranej metody zagęszczania ma znaczny wpływ na stabilność Marshalla, moduł sprężystości, moduł sztywności. Idąc dalej tym tokiem można stwierdzić, że zagęszczanie ma wpływ na wyniki badań i nie powinno się porównywać wyników uzyskanych na próbkach *mma* zagęszczonych różnymi metodami.

W powyższym artykule przedstawiono prostą i efektywną metodę zagęszczania próbek *mma* w warunkach laboratoryjnych oraz pokazano, jakie możliwości daje zagęszczanie przy pomocy prasy żyratorowej. Pokazano możliwości wykorzystania własności objętościowych zagęszczanej próbki przy modelowaniu jej przyszłych właściwości mechanicznych.

## Bibliografia

- [1] J. Boratyński, J. Krzeźmiński, J. Chmielewski, *Porównanie metod projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych według metody IBDiM i metody Superpave*, Drogownictwo 01/2004
- [2] J. Boratyński, J. Krzeźmiński, *Zagęszczanie mieszanek mastykowo-grysowych (SMA) w laboratorium i na drodze*, Drogownictwo 7-8/2005
- [3] S.F. Brown, *Material Characteristics for Analytical Pavement Design [w:] Developments in Highway Pavement Engineering – 1*, Londyn 1978
- [4] J.W. Button, D.N. Little, V. Jagadam, O.J. Pendelton, *Correlation of Selected Laboratory Compaction Methods with Field Compaction*, Texas, USA, 1993
- [5] B. Dotzycki, J. Judycki, *Wpływ metod zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych na wyniki badań ich cech mechanicznych*, Konferencja naukowa Gdańsk – Krynica, 11-16 września
- [6] T. Harman, J. Bukowski, F. Moutier, G. Huber, J. McGennis, *The history and future challenges of Gyration Compaction 1939 to 2001*, The Transportation Research Board, 2002
- [7] J. Judycki, *Fatigue of Asphalt Mixtures*, Oulu, Finland 1991
- [8] A.F.F. Mahmoud, H. Bahia, *Using gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Report WHRP 02/5 (0092-01-02)*, Wisconsin Highway Research Program, 2004
- [9] J. Piłat, P. Radziszewski, *Nawierzchnie asfaltowe*, WKŁ, 2004
- [10] Superpave Mix Design. Asphalt Institute, Superpave Series No. 2, 2001
- [11] E. Sanchez-Alonso, A. Vega-Zamanillo i inni, *Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives*, Construction and Building Materials. 25, 2010
- [12] WT-2 2010 Mieszanki mineralno-asfaltowe; Wymagania techniczne; Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych
- [13] PN-EN-12697-31: Mieszanki mineralno asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno – asfaltowych na gorąco –Próbki zagęszczane w prasie żyratorowej
- [14] PN-EN-12697-5: Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Oznaczenie gęstości [14] AASTO T 283-85 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage
- [15] AASHTO PP41-00 Standard Practice for Designing Stone Mastix Asphalt
- [16] PN-EN-12697-10: Mieszanki mineralno asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Zagęszczalność ■