

dr inż. Marta Wasilewska<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-6834-5206

dr hab. inż. Mariusz Wesółowski<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-5545-8831

dr inż. Krzysztof Blacha<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0002-4599-4294

# Comparison of methods to determine the texture based on measurements with various profilometers

## Porównanie metod oceny tekstury nawierzchni lotniskowych na podstawie pomiarów różnymi profilometrami

DOI: 10.15199/33.2024.07.08

**Abstract.** The paper presents a comparative analysis of the results of the MPD (*Mean Profile Depth*) parameter based on three methods for determining the texture of airport pavements using a dynamic profilometer (2D/3D scan CHS (*CONTROL HIGH-SPEED scanner*)) and stationary profilometers (*Circular Track Meter; ElaTexture*). The measurements were performed on test sections with different surface technologies, which were located on the Warsaw-Modlin Masovian Airport. Using the R&R (*repeatability & reproducibility*) method, the ability of measurement systems to monitor the texture was analyzed. The expanded uncertainty of EV (*Equipment Variability*) repeatability was 0.066 mm, and AV (*Appraiser Variability*) repeatability was 0.169 mm. The value of repeatability and reproducibility % R&R equal to 21.9% proves that the source of variability in obtaining MPD results is the difference in the recorded area of the test surface in individual measurement systems. Additionally, measurements of the friction coefficient were carried out using the ASFT tester (*Airport Surface Friction Trailer*), which enabled verification of the skid resistance of the test sections in relation to changes in their texture.

**Keywords:** macrotecture; microtexture; friction coefficient; airfield pavement.

Skid resistance is one of the technical features of airport surfaces that affects the safety of air operations. Their monitoring makes it possible to estimate the grip between the aircraft tire and the surface of the functional element of the airport, which determines its correct trajectory when moving in the field of ground air traffic. Consequently, this allows for decisions to be made regarding the scope of work to ensure the proper technical condition of the surface [1, 2]. For this purpose, dynamic devices are used to continuously measure the friction coefficient, which is a measure of the level of skid resistance. However, the threshold values of the friction coefficient depending on the type of equipment used are specified in Defense Standard NO-17-A501 [3]. In the case of insufficient skid resistance, the easiest renovation procedure is to texturize the surface, which is primarily

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę porównawczą wyników badania parametru MPD (*Mean Profile Depth*) z wykorzystaniem profilometru dynamicznego (Skaner 2D/3D scan CHS (*CONTROL HIGH-SPEED*)) i profilometrów stacjonarnych (*Circular Track Meter; ElaTexture*), które są przeznaczone do oceny tekstury nawierzchni lotniskowych. Pomiary wykonano na odcinkach testowych o zróżnicowanej technologii nawierzchni dróg kołowania Mazowieckiego Portu Lotniczego Warszawa – Modlin. Wykorzystując metodę R&R (*repeatability & reproducibility*) dokonano analizy zdolności systemów pomiarowych do monitorowania tekstury. Niepewność rozszerzona powtarzalności EV (*Equipment Variability*) wyniosła 0,066 mm, a odtwarzalność AV (*Appraiser Variability*) 0,169 mm. Wypadkowa wartość powtarzalności i odtwarzalności %R&R równa 21,9% świadczy, że źródłem zmienności w pozyskiwaniu wyników MPD jest różnica w rozmieszczeniu czujników w poszczególnych systemach pomiarowych, rejestrujących profile powierzchni. Dodatkowo przeprowadzono pomiary współczynnika tarcia testerem ASFT (*Airport Surface Friction Trailer*), które umożliwiły weryfikację właściwości przeciwpoślizgowych odcinków testowych w odniesieniu do zmian w ich teksturze.

**Słowa kluczowe:** makrotekstura; mikrotekstura; współczynnik tarcia; nawierzchnia lotniskowa.

Właściwości przeciwpoślizgowe są jedną z cech technicznych nawierzchni lotniskowych, która ma wpływ na bezpieczeństwo operacji lotniczych. Ich monitoring umożliwia oszacowanie przyczepności pomiędzy oponą statku powietrznego a powierzchnią elementu funkcjonalnego lotniska, która determinuje jego prawidłową trajektorię podczas poruszania się w polu naziemnego ruchu lotniczego. W konsekwencji pozwala to na podjęcie decyzji dotyczącej zakresu prac do zapewnienia właściwego stanu technicznego nawierzchni [1, 2]. Do tego celu są wykorzystywane dynamiczne urządzenia do ciągłego pomiaru współczynnika tarcia, który jest miarą poziomu właściwości przeciwpoślizgowych. Kryteria dotyczące progowych wartości współczynnika tarcia, w zależności od typu użytego sprzętu, są określone w Normie Obronnej NO-17-A501 [3]. W przypadku niedostatecznych właściwości przeciwpoślizgowych, najłatwiejszym zabiegiem remontowym jest wykonanie teksturowania nawierzchni, które przede wszystkim ma na celu zwiększenie głębokości tekstury. Wynika to z faktu, że współczynnik tarcia jest ściśle związany za-

<sup>1)</sup> Białystok University of Technology

<sup>2)</sup> Military Institute of Armor and Automotive Technology

<sup>3)</sup> Air Force Institute of Technology

\*) Correspondence address: marta.wasilewska@pb.edu.pl

aimed at increasing the depth of the texture. This is due to the fact that the coefficient of friction is closely related to both the tire characteristics and the surface texture. Depending on the wavelength and frequency, the texture is divided into megatexture, macrotexture and microtexture. Irregularities above 50 mm are defined as megatexture. They are the result of damage and contribute to the deterioration of comfort and traffic safety. The macrotexture is characterized by unevenness in the wavelength range of 0.5 – 50 mm and depends on the technology of production and texturing of the upper surface layer. However, irregularities with wavelengths below 0.5 mm concern the microtexture, which is related to the resistance to polishing of protruding grains of coarse aggregate and the fraction content below 2 mm in the mineral mixture. Macrotexture and microtexture play the most important role at the level of skid resistance [4, 5]. Therefore, in addition to controlling the friction coefficient, global aviation organizations, i.e. EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) [6], ICAO (*International Civil Aviation Organization*) [7 – 9] and FAA (*Federal Aviation Agency*) [10] have defined requirements for texture depth of pavement surface elements at airports. Changes in the friction coefficient during the service life of the surface result primarily from changes occurring in the texture caused by the impact of traffic and environmental factors [11]. Therefore, the obligation to control this surface property is justified.

Macrotextures are assessed using the volumetric method based on the MTD (*Mean Texture Depth*) parameter determined in accordance with PN-EN 13036 [12] or the profilometric method based on the MPD (*Mean Profile Depth*) parameter in accordance with PN-EN ISO 13473-1 [13]. Other parameters calculated based on the profile are the Ra (*Root Mean Absolute*) and Rms (*Root Mean Square*) values. Studies are being conducted around the world aimed at using advanced surface image registration techniques to develop new methods for texture assessment. The primary goal of such activities is to use them for predictions, among others. skid resistance, tire rolling resistance and road noise [4, 5, 14]. Some researchers emphasize that the division of texture into rocks presented in PN-EN ISO 13473-1 is simplified and has limitations because it only defines irregularities based on wavelength dimensions [5, 14]. The use of decomposition methods, i.e. wavelet transform, Hilbert-Huang transform or Fourier transform to identify individual scales showed that the simplified division between microtexture and macrotexture does not reflect their complex impact on the level of skid resistance [5]. An alternative approach to describing pavement texture is the analysis of surface irregularities that vary in height, shape and density. However, it has been proven that the characterization of textures, including them, depends largely on the resolution of the recorded surface topography and the individual measurement techniques used. This means that using the parameters developed in this way to predict skid resistance, it is possible to obtain different levels of texture of the same surface, depending on the resolution of irregularities registration [14, 15]. Therefore, when using both new and

równy z charakterystyką opony, jak i teksturą nawierzchni. W zależności od długości fal i częstotliwości teksturę dzieli się na **megateksturę**, **makroteksturę** i **mikroteksturę**. Nierówności w przypadku długich fal (powyżej 50 mm) są definiowane jako megatekstura. Powstają one w wyniku uszkodzeń i przyczyniają się do pogorszenia komfortu oraz bezpieczeństwa ruchu. Makrotekstura charakteryzuje się nierównościami przy długości fal 0,5 – 50 mm i zależy od technologii wykonania i teksturowania górnej warstwy nawierzchni. Natomiast nierówności o długości fal poniżej 0,5 mm dotyczą mikrotekstury, która jest związana z odpornością na polerowanie wystających ziaren kruszywa grubego i zawartością frakcji poniżej 2 mm w mieszance mineralnej wbudowanej do górnej warstwy. Z punktu widzenia właściwości przeciwpoślizgowych największy wpływ na wartość współczynnika tarcia ma makrotekstura i mikrotekstura [4, 5], dlatego też poza kontrolą współczynnika tarcia, światowe organizacje lotnicze, tj. EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) [6], ICAO (*International Civil Aviation Organization*) [7 – 9] i FAA (*Federal Aviation Agency*) [10] określiły wymagania dotyczące głębokości tekstury nawierzchni elementów lotniskowych. Zmiana współczynnika tarcia w okresie użytkowania nawierzchni wynika przede wszystkim ze zmian zachodzących w teksturze spowodowanych oddziaływaniem ruchu i czynników atmosferycznych [11]. W związku z tym, obowiązek kontroli tej cechy nawierzchni jest uzasadniony.

Nierówności makrotekstury ocenia się, korzystając z metody objętościowej, na podstawie parametru MTD (*Mean Texture Depth*) wyznaczonego zgodnie z PN-EN 13036 [12] lub metody profilometrycznej, wykorzystując parametr MPD (*Mean Profile Depth*) zgodnie z PN-EN ISO 13473-1 [13]. Innymi parametrami obliczonymi na podstawie profilu nierówności są średnie arytmetyczne odchylenie profilu Ra (*Root Mean Absolute*) i średnie kwadratowe odchylenie profilu Rms (*Root Mean Square*). Na świecie prowadzone są programy badawcze, które mają na celu wykorzystanie zaawansowanych technik rejestracji obrazu powierzchni w celu opracowania nowych metod do oceny tekstury. Nadzędnym celem takich działań jest wykorzystanie ich do predykcji m.in. właściwości przeciwpoślizgowych, oporu toczenia opony i poziomu hałasu nawierzchni [4, 5, 14]. Niektórzy badacze podkreślają, że podział tekstury na skale, przedstawiony w PN-EN ISO 13473-1, jest uproszczony i ma ograniczenia, ponieważ definiuje jedynie nierówności na podstawie wymiarów długości fali [5, 14]. Wykorzystanie metod dekompozycji, tj. transformata falkowa, transformata Hilberta-Huanga czy transformata Fouriera w celu identyfikacji poszczególnych skal wykazały, że uproszczony podział między mikroteksturą a makroteksturą nie odzwierciedla ich złożonego wpływu na poziom właściwości przeciwpoślizgowych [5]. Alternatywnym podejściem do opisu tekstury nawierzchni jest analiza nierówności powierzchni, które różnią się wysokością, kształtem i gęstością. Dowiedziono jednak, że charakterystyka tekstury z ich uwzględnieniem zależy w dużej mierze od rozdzielczości zarejestrowanej topografii powierzchni i zastosowanych indywidualnych technik pomiarowych. Oznacza to, że wykorzystując opracowane w ten sposób parametry do predykcji wła-

long-used texture assessment tools, one should be aware of their advantages and limitations. In particular, when they are the basis for verifying the technical condition of the surface at the stage of acceptance of the quality of construction works or at the stage of use of the facility.

In practice, stationary and dynamic laser profilometers are most often used to assess texture. The first of them, due to their size, allow for point measurements both in laboratory and field conditions. The disadvantage of their use in the field is the time-consuming measurement and the need to close the tested surface against movement. However, dynamic profilometers are mounted on the vehicle. As a result, they have better performance compared to stationary profilometers. This also allows data to be recorded continuously. Depending on the manufacturer, profilographs are equipped with laser sensors that determine the profile with different frequency, resolution, speed, etc. Additionally, their measurement ranges also differ. The software of both dynamic and stationary profilometers that calculates MPD values must comply with the algorithm presented in PN-EN ISO 13473-1. This is particularly important due to the accuracy and precision of measurement methods. Nevertheless, measurement results obtained with different types of profilometers may give different values of texture assessment parameters in the testing area on the same surface.

The objective of the paper is to present a comparative analysis of the results obtained based on methods for assessing macrotexture used on airport pavements, which are based on measurements of the MPD parameter with a stationary and dynamic profilometer.

## Research program

The tests were carried out using three profilometric methods to assess macrotexture using stationary profilometers: CTM (*Circular Track Meter*) and ElaTexture (Photo 1), and a dynamic profilometer scanCHS (scanCONTROL HIGH-SPEED 2D/3D (LLT 2660-100)). These devices are equipped with laser sensors for vertical registration of the surface profile, based on which the software calculates the average depth of the MPD profile and the mean square deviation of the Rms profile (*Root Mean Square*) in accordance with the PN-EN ISO 13473-1 standard.

CTM has a CCD laser displacement sensor that moves in a circle with a circumference of 892 mm. During rotation, the heights are read at 1024 points with a spacing of 0.87 mm. The circumference of the circle of the tested surface is divided into 8 segments from A to H. The macrotexture measure is the average MPD value recorded on individual segments. In the case of ElaTexture, a laser sensor moves around the circumference of a 400 mm circle, recor-

ściwości przeciwpoślizgowych, można uzyskać różną wartość tekstury tej samej powierzchni, w zależności od rozdzielczości rejestracji nierówności [14, 15]. Korzystając zarówno z nowych, jak i stosowanych od wielu lat narzędzi do oceny tekstury, trzeba więc mieć świadomość ich zalet i ograniczeń przede wszystkim wtedy, kiedy są podstawą do weryfikacji stanu technicznego nawierzchni na etapie odbioru jakości robót budowlanych lub na etapie użytkowania obiektu.

W praktyce do oceny tekstury najczęściej wykorzystuje się stacjonarne i dynamiczne laserowe profilometry. Pierwsze z nich, ze względu na rozmiar, pozwalają na wykonanie pomiarów punktowych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i terenowych. Minusem ich użycia w terenie jest czasochłonność pomiarów i konieczność zamknięcia testowanej powierzchni przed ruchem. Natomiast **profilometry dynamiczne** są zamontowane na pojeździe, w wyniku czego mają lepszą wydajność w porównaniu ze **stacjonarnymi**. Umożliwia to również rejestrację danych w sposób ciągły. W zależności od producenta, profilometry są wyposażone w czujniki laserowe, które określają profil z różną częstotliwością, rozdzielczością, prędkością itp. Dodatkowo ich zakresy pomiarowe też różnią się między sobą. Oprogramowanie profilometrów zarówno dynamicznych, jak i stacjonarnych, które oblicza wartości MPD, musi być zgodne z algorytmem przedstawionym w PN-EN ISO 13473-1. Jest to szczególnie ważne ze względu na dokładność i precyzję metod pomiarowych. Mimo to wyniki pomiarów uzyskiwane różnymi typami profilometrów mogą dawać różne wartości parametrów oceny tekstury w obszarze testowania na tej samej powierzchni.

Celem artykułu jest przedstawienie analizy porównawczej wyników uzyskanych podczas oceny makrotekstury metodami stosowanymi na nawierzchniach lotniskowych, które bazują na pomiarach parametru MPD profilometrem stacjonarnym i dynamicznym.

## Program badań

Badania przeprowadzono, wykorzystując trzy metody profilometryczne do oceny makrotekstury z użyciem profilometrów stacjonarnych: CTM (*Circular Track Meter*) i ElaTexture (fotografia 1) oraz profilometru dynamicznego scanCHS (scanCONTROL HIGH-SPEED 2D/3D (LLT 2660-100)). Urządzenia te wyposażone są w czujniki laserowe do pionowej rejestracji profilu powierzchni. Na podstawie uzyskanych danych oprogramowanie oblicza średnią głębokość profilu MPD i średnie kwadratowe odchylenie profilu Rms (*Root Mean Square*) zgodnie z PN-EN ISO 13473-1.

CTM ma laserowy czujnik przymieszczony CCD, który porusza się po okręgu o obwodzie 892 mm. Podczas obrotu odczytywana jest wysokość w 1024 punktach w odstępach 0,87 mm. Obwód okręgu testowanej powierzchni jest podzielony na 8 segmentów (od A do H). **Za miarę makrotekstury przyjmuje się średnią wartość MPD zarejestrowaną na poszczególnych segmentach.** W przypadku



Photo 1. Measurements made with ElaTexture and CTM stationary devices

Fot. 1. Pomiary wykonywane urządzeniami stacjonarnymi ElaTexture i CTM

ding heights at 2,000 points at 0.20 mm intervals. The measurement result is the average MPD value calculated from the profile after two laser revolutions. For both CTM and ElaTexture, the software allows you to generate a profile in the test pavement area. Foto 1 shows stationary devices during measurement.

The ASFT (*Airport Surface Friction Trailer*) skid resistant tester enables continuous recording of the friction coefficient at a steady wheel slip of 13% (Photo 2). During measurement, water is dosed under the wheel using a pump system, creating a theoretical water film 1.0 mm thick.

The software allows for the aggregation of results from unit sections from 10 to 50 m. The scanCHS 2D/3D laser scanner is mounted on the T-10 trailer of the ASFT tester, creating a unique system enabling simultaneous, continuous measurement of the texture and friction coefficient. Due to the fact that the surface must be dry



Photo 2. ASFT tester on a T-10 trailer  
Fot. 2. Tester ASFT na przyczepie T-10

when measuring with a laser device, the scanner is mounted so that the profile is recorded before the friction coefficient is measured. Unlike known point laser sensors, the scanCHS 2D/3D scanner (Fig. 1) generates a laser line on the surface of the examined object. High-quality optics reproduces the reflected, diffused light of the laser line on a photosensitive matrix. The controller calculates distance information (Z axis) and position along the laser line (X axis) from the camera image and sends both values to the sensor's two-dimensional coordinate system. In the case of moving objects or when the sensor moves in a certain way, it is possible to display information in three dimensions. The scanner allows measurement with an accuracy of 0.01 mm (texture depth value) and provides measurement speed (frequency) up to 4000 Hz with the number of points/profiles up to 640 with a bandwidth of 60 mm.

Three test sections (OT) located on the roads of the Masovian Airport Warsaw – Modlin (DK-A1 and DK-A3) were selected for testing. Their upper surface layers differed in construction technology and period of use. The section on the DK-A1 road had a new concrete surface, textured by transverse brushing (OT-1). However, the upper layers on the DK-A3 road were made of asphalt concrete (OT-2) and cement concrete without visible traces of texturing treatments (OT-3). Photo 3 shows an image of the surface of individual sections along with their texture profile.

Measurement tracks with a length of 100 m were marked on each section. In the case of stationary profilometers, measurements were performed at 10 points located along the

ElaTexture laserowy czujnik przemieszcza się po okręgu o obwodzie 400 mm, rejestrując wysokość w 2000 punktów w odstępnie 0,20 mm. Rezultat pomiaru jest średnią wartością MPD obliczoną z profilu po dwóch obrotach lasera. Zarówno w przypadku CTM, jak i ElaTexture oprogramowanie umożliwia wygenerowanie profilu w testowanym obszarze nawierzchni. Na fotografii 1 przedstawiono urządzenia stacjonarne w trakcie prowadzenia pomiarów.

Tester ASFT (*Airport Surface Friction Trailer*) do oceny właściwości przeciwpślizgowych umożliwia ciągłą rejestrację współczynnika tarcia przy ustalonym poślizgu koła wynoszącym 13% (fotografia 2). Podczas pomiaru przy użyciu systemu pomp pod koło dozowana jest woda, tworząc teoretyczny film wodny o grubości 1,0 mm. Oprogramowanie pozwala na agregację wyników z odcinków jednostkowych od 10 do 50 m. Laserowy skaner scanCHS 2D/3D (rysunek 1) jest natomiast zamontowany na przyczepie

T-10 testera ASFT, tworząc unikatowy układ umożliwiający równoczesny, ciągły pomiar średniej głębokości tekstury i współczynnika tarcia. Z uwagi na fakt, że nawierzchnia przy pomiarze urządzeniem laserowym musi być sucha, skaner jest zamocowany tak, aby rejestracja profilu odbywała się przed pomiarem współczynnika tarcia. W przeciwieństwie do znanych, punktowych czujników laserowych, skaner scanCHS 2D/3D generuje linię laserową na powierzchni badanego obiektu. Kontroler wylicza z obrazu kamery informację o odległości (oś Z) oraz pozycję wzdłuż linii lasera (oś X) i wysyła obie wartości do dwuwymiarowego układu współrzędnych czujnika. W przypadku ruchomych obiektów lub w sytuacji, gdy czujnik przemieszcza się w określony sposób, możliwe jest zobrazowanie informacji trójwymiarowo. Skaner umożliwia pomiar z dokładnością do 0,01 mm (wartość głębokości tekstury) i zapewnia szybkość pomiarów (częstotliwość) do 4000 Hz przy liczbie punktów/profilu do 640 o szerokości pasma 60 mm.

Do badań wytypowano trzy odcinki testowe (OT) zlokalizowane na drogach kołowania Mazowieckiego Portu Lotniczego Warszawa – Modlin (DK-A1 i DK-A3). Ich górne warstwy nawierzchni różniły się technologią wykonania i okresem użytkowania. Odcinek na drodze kołowania DK-A1 miał nową nawierzchnię betonową, teksturowaną przez szczotkowanie poprzeczne (OT-1). Natomiast górne warstwy na drodze DK-A3 były wykonane z betonu asfaltowego (OT-2) i betonu cementowego bez widocznych śladów zabiegów teksturowania (OT-3). Na fotografii 3 przedstawiono obraz powierzchni poszczególnych odcinków wraz z ich profilem tekstury. Na każdym z odcinków wyznaczono tory pomiarowe o długości 100 m. W przypadku profilometrów stacjonarnych pomiary były wykonywane w dziesięciu

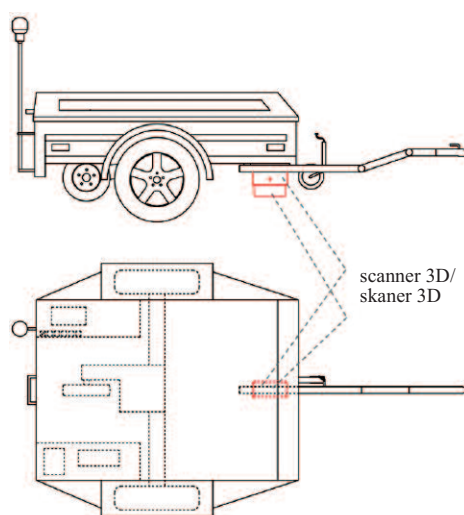
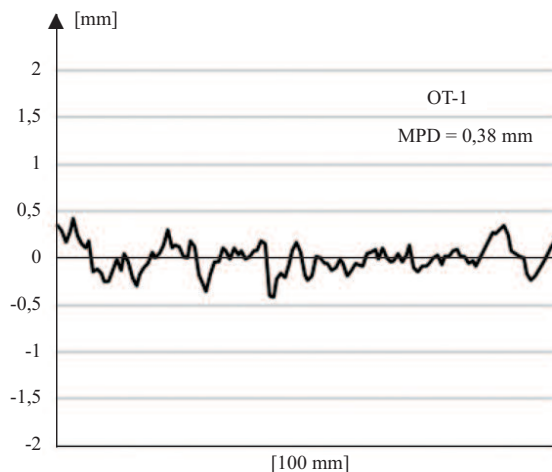
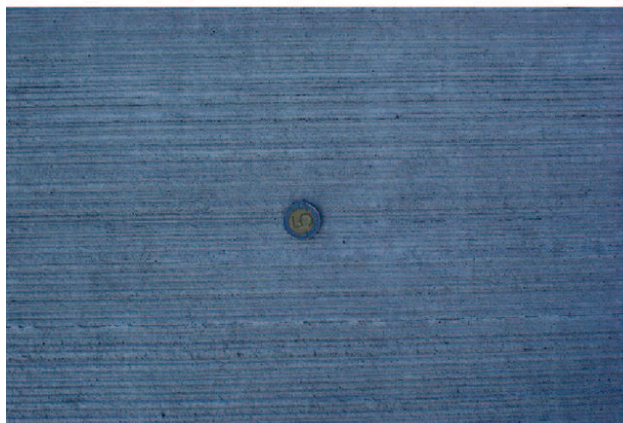


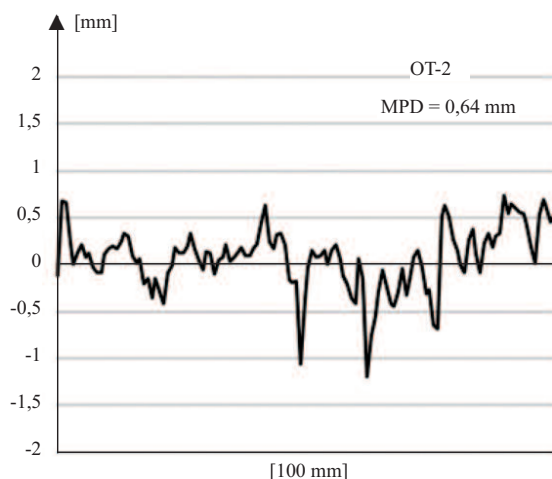
Fig. 1. Scheme of placing the scanner 3D scanCHS scanner (LLT 2660-100) on the T-10 trailer

Rys. 1. Schemat umieszczenia skanera 3D scanCHS (LLT 2660-100) na przyczepie T-10

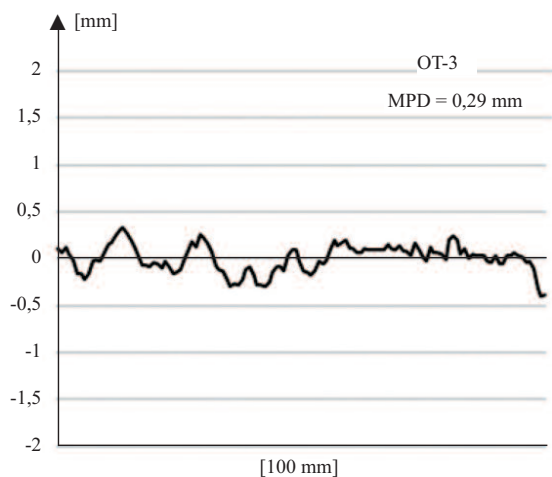
a)



b)



c)



**Fot. 3. Surfaces of the upper layers and their unevenness profiles: a) OT-1; b) OT-2; c) OT-3**

*Fot. 3. Powierzchnia górnych warstw i ich profile nierówności: a) OT-1; b) OT-2; c) OT-3*

track at 10 m intervals. The following numbering of points in relation to the test sections was adopted: from 1 to 10 – OT-1; from 11 a.m. to 8 p.m. – OT-2; from 9 p.m. to 30 p.m. – OT-3. A set of dynamic devices recorded data continuously along the measurement track, aggregating them as average values of MPD and friction coefficient from unit sections of 10 m in

punktach, rozmieszczonych wzdłuż toru w odstępach 10 m. Przyjęto następującą numerację punktów względem odcinków testowych: od 1 do 10 – OT-1; od 11 do 20 – OT-2; od 21 do 30 – OT-3. Zestaw urządzeń dynamicznych rejestrował dane w sposób ciągły, wzdłuż toru pomiarowego, agregując je jako średnie wartości MPD i współczynnika tarcia z odcinków jednostkowych

length. The point at which the measurement was made with a stationary profilometer was placed in the center of the unit section. They were numbered in the same way as in the case of points during measurements with a stationary profilometer. It should be noted that the friction coefficient was recorded on the same track where the surface texture profile was determined.

**Results and analysis**

Figure 2 shows the average values of MPD and friction coefficient at measurement points on given test sections. Although the surface technology has a major influence on the differences in macrotexture, some differences in the results are always obtained on a given test section. These variations result from different intensity of wear of the surface texture along the cross-section and longitudinal section of the road.

Tables 1 – 3 present descriptive statistics (average, STD standard deviation, coefficient of variation V, maximum, minimum, range) calculated on the basis of MPD results recorded with a given device on test sections. Higher values of coefficients of variation on OT-1 indicate significant variations in macrotexture. In the case of this concrete surface texturing technique, especially when it has a short service life, this is a typical phenomenon [11]. However, slight scatters of results were recorded on the OT-3 section, which is the longest used surface of this road. The asphalt concrete surface with a maximum grain size of 11 mm (OT-2) was characterized by the deepest unevenness

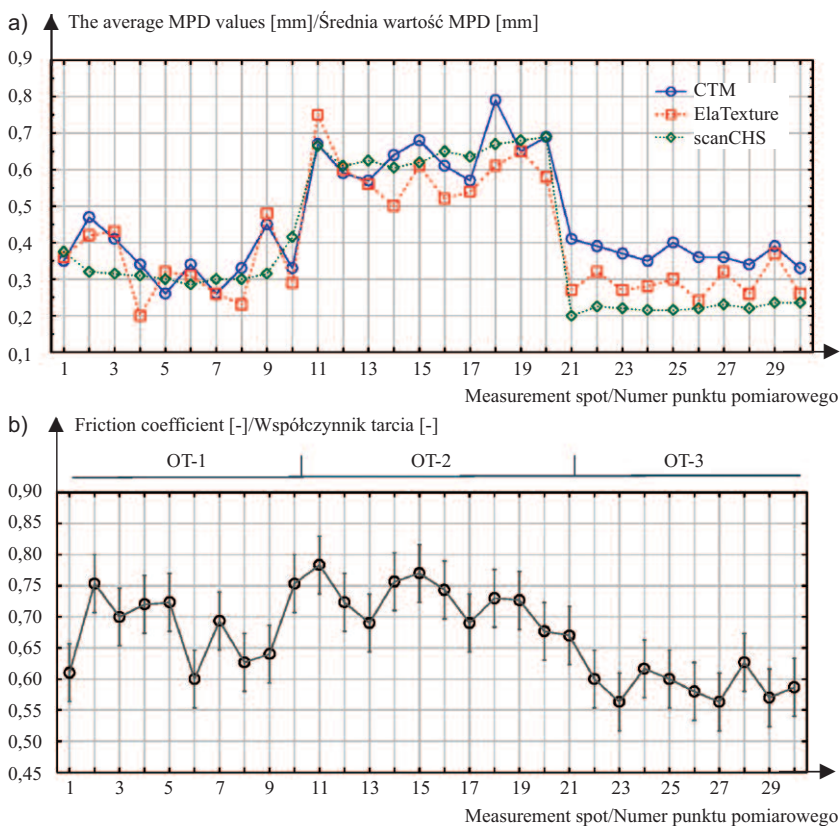
o długości 10 m. Punkt, w którym był wykonany pomiar profilometrem stacjonarnym, znajdował się w środku odcinka jednostkowego. Punkty pomiarowe numerowano analogicznie jak w przypadku pomiarów profilometrem stacjonarnym. Należy zaznaczyć, że rejestracja współczynnika tarcia odbywała się na tym samym torze, na którym był określony profil tekstury nawierzchni.

**Wyniki i ich analiza**

Na rysunku 2 zamieszczono średnie wartości MPD i współczynnika tarcia w punktach pomiarowych na danych odcinkach testowych. Pomimo że zasadniczy wpływ na różnice w makroteksturze ma technologia wykonania nawierzchni, to zawsze otrzymuje się pewne różnice w wynikach na danym odcinku testowym. Zmienności te wynikają z różnej intensywności zużycia się tekstury powierzchni wzdłuż przekroju poprzecznego i podłużnego drogi.

W tabelach 1 – 3 przedstawiono statystyki opisowe (średnia, odchylenie standardowe STD, współczynnik zmienności V, maksimum, minimum, rozstęp) obliczone na podstawie wyników MPD zarejestrowanych danym urządzeniem na odcinkach testowych. Większe wartości współczynników zmienności na OT-1 wskazują na istotne zmiany w makroteksturze. W przypadku tej techniki teksturowania nawierzchni betonowej jest to typowe zjawisko szczególnie wtedy, gdy odznacza się krótkim okresem użytkowania [11]. Nieznaczne rozrzuty wyników odnotowano natomiast na odcinku OT-3, który jest najdłużej użytkowaną nawierzchnią tej drogi kołowania. Nawierzchnia z betonu asfaltowego o maksymalnym uziarnieniu 11 mm (OT-2), odznaczała się najgłębszym profilem nierówności wśród odcinków testowych – MPD<sub>sr</sub> od 0,59 do 0,65 mm.

Należy podkreślić, że w przypadku nawierzchni drogowych preferowane są głębokie profile nierówności, przede wszystkim na drogach o prędkości dopuszczalnej większej niż 70 km/h. Z tego powodu zaleca się projektowanie warstw sycieralnych z mieszanek mineralno-asfaltowych, takich jak SMA, BBTM, a warstw nawierzchniowych – z betonu cementowego, teksturowanego



**Fig. 2. Average values of MPD (a) and friction coefficient at measurement spots (b)**  
*Rys. 2. Średnie wartości MPD (a) i współczynnika tarcia w punktach pomiarowych (b)*

profile among the test sections – the average MPD value from 0.59 to 0.65 mm. It should be noted that in the case of road surfaces, deeper uneven profiles are preferred, especially on roads with a speed limit above 70 km/h. Therefore, it is recommended to design wearing layers from mineral-asphalt mixtures such as SMA, BBTM, and in the case of surface layers – cement concrete, textured using diamond blades or the exposed aggregate method. Studies shows that when used, the level of macrotexture allows to achieve MPD

**Table 1.** Descriptive statistics calculated from measurements taken on the OT-1 section

Tabela 1. Statystyki opisowe obliczone z pomiarów wykonanych na odcinku OT-1

Device/Statystyki opisowe	Profilometers/Profilometry		
	CTM	ElaTexture	ScanCHS
MPD <sub>sr</sub> [mm]	0,35	0,31	0,32
STD [mm]	0,065	0,078	0,067
V [%]	18,5	25,1	20,6
Max [mm]	0,50	0,48	0,54
Min [mm]	0,26	0,19	0,25
Range [mm]	0,24	0,29	0,29

**Table 2.** Descriptive statistics calculated from measurements taken on the OT-2 section

Tabela 2. Statystyki opisowe obliczone z pomiarów wykonanych na odcinku OT-2

Device/Statystyki opisowe	Profilometers/Profilometry		
	CTM	ElaTexture	ScanCHS
MPD <sub>sr</sub> [mm]	0,63	0,59	0,65
STD [mm]	0,062	0,073	0,043
V [%]	9,9	12,3	6,7
Max [mm]	0,79	0,76	0,75
Min [mm]	0,55	0,47	0,59
Range [mm]	0,24	0,29	0,16

**Table 3.** Descriptive statistics calculated from measurements taken on the OT-3 section

Tabela 3. Statystyki opisowe obliczone z pomiarów wykonanych na odcinku OT-3

Device/Statystyki opisowe	Profilometers/Profilometry		
	CTM	ElaTexture	ScanCHS
MPD <sub>sr</sub> [mm]	0,37	0,30	0,22
STD [mm]	0,032	0,035	0,013
V [%]	8,7	11,9	5,7
Max [mm]	0,44	0,37	0,24
Min [mm]	0,33	0,24	0,20
Range [mm]	0,11	0,13	0,04

values from 0.75 to 1.4 mm [4]. However, surfaces with such a texture depth built on functional elements of the airport may contribute to damage to aircraft tires during landing or take-off and result in their faster wear. Experience from measurements carried out on surfaces in numerous airports prove that their surfaces are characterized by an average texture depth in the range of 0.25 ÷ 0.50 mm. At the same time, they achieve very good levels of skid resistance [1, 2]. This is also confirmed by measurements of the friction coefficient on individual test sections (Fig. 2). It should be noted that there are differences in the criteria for threshold values of texture depth included in documents developed by individual organizations [6 ÷ 10]. This raises numerous questions. What minimum threshold value should be adopted when assessing new surfaces – 1.0 mm [6 ÷ 8] or 1.14 mm [10]? In turn, document [9] requires that the permissible depth of the surface texture be below 1.0 mm? These requirements are contradictory. This leads to the need to start a discussion on the need to verify and standardize the criteria for texture depth, taking into account the required minimum value of the friction coefficient.

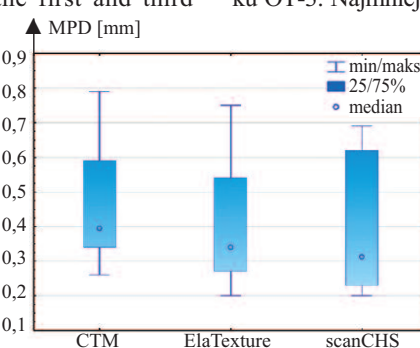
Analyzing the MPD results in individual measurement spots of the OT-1 and OT-2 sections, there is no clear tendency indicating that a given device indicates higher or lower MPD values. The differences are visible only on the OT-3 section. The lowest MPD values were obtained with the scanCHS dynamic profilometer, and the highest with the stationary profilometer – CTM. Figure 3 shows the first and third quartiles and medians for each device, which were calculated from the data sets from the three sections. In the case of ElaTexture and scanCHS, the medians are at a comparable level. Slightly higher median, maximum and minimum values were recorded by CTM. The stationary devices also have a comparable interquartile range, which is smaller than that of the dynamic scanCHS device.

Due to the characteristics and arrangement of laser sensors, it is not possible for each of these devices to scan the profile in exactly the same place on the tested surface. As a consequence, this

za pomocą tarcz diamentowych lub metodą odkrytego kruszywa. Badania dowodzą, że można wówczas osiągnąć wartości MPD od 0,75 do 1,4 mm [4]. Nawierzchnie o takiej głębokości tekstury, wybudowane na elementach funkcjonalnych lotniska, mogą jednak przyczynić się do uszkodzenia opon samolotu podczas lądowania lub startu i wpływać na ich szybsze zużycie. Doświadczenia z pomiarów przeprowadzonych na nawierzchniach w wielu portach lotniczych dowodzą, że ich powierzchnie charakteryzują się średnią głębokością tekstury 0,25 ÷ 0,50 mm. Osiągają przy tym bardzo dobre właściwości przeciwpoślizgowe [1, 2]. Potwierdzają to również przeprowadzone pomiary współczynnika tarcia na poszczególnych odcinkach testowych (rysunek 2). Należy zaznaczyć, że są różnice w kryteriach dotyczących progowych wartości głębokości tekstury, zamieszczonych w dokumentach opracowanych przez poszczególne organizacje [6 ÷ 10]. W związku z tym nasuwa się pytanie, jaka progowa minimalna wartość powinna być przyjęta przy ocenie nowych nawierzchni – 1,0 mm [6 ÷ 8] czy 1,14 mm [10]? Z kolei w dokumencie [9] wymaga się, aby dopuszczalna głębokość tekstury nawierzchni wynosiła mniej niż 1,0 mm! Należy więc zweryfikować i ujednoczyć kryteria dotyczące głębokości tekstury z uwzględnieniem wymaganej minimalnej wartości współczynnika tarcia.

Analizując wyniki MPD w poszczególnych punktach pomiarowych odcinków OT-1 i OT-2, nie obserwuje się wyraźnej tendencji świadczącej, że dane urządzenie wskazuje na większe bądź mniejsze wartości MPD. Różnice są widoczne jedynie na odcinku OT-3. Najmniejsze wartości MPD otrzymano profilometrem dynamicznym scanCHS, a największe stacjonarnym CTM. Na rysunku 3 zestawiono pierwsze i trzecie kwartyle oraz mediany w odniesieniu do każdego z urządzeń, które obliczono ze zbiorów danych z trzech odcinków. W przypadku ElaTexture i scanCHS mediany są na porównywalnym poziomie. Nieznacznie większe wartości mediany oraz maksimum i minimum zarejestrował profilometr CTM. Urządzenia stacjonarne mają też porównywalny rozstęp kwartyłowy, który jest mniejszy niż przy urządzeniu dynamicznym, scanCHS.

Ze względu na charakterystykę i rozmieszczenie czujników laserowych nie

**Fig. 3.** Median, first and third quartiles for the individual device dataset

Rys. 3. Mediana, pierwszy i trzeci kwartył w odniesieniu do zbioru danych z poszczególnych urządzeń

results in differences in the obtained results. In order to check whether they are acceptable and the obtained results reliable for verifying the surface texture, an assessment of repeatability and reproducibility was carried out based on the R&R method.

Repeatability means the degree of consistency of the results of subsequent measurements performed under specific conditions with the same measuring device, by the same operator, in the same place on the airport pavement, measured by the EV (*Equipment Variability*) value. Reproducibility means the degree of compliance of measurement results performed in the same place on the surface, but by different measuring devices at the same time or by the same device at a different time or with a different operator, the measure of which is the AV (*Appraiser Variability*) value. Repeatability and reproducibility of measurement always refer to the joint expression of the variability of a given parameter at the measurement point and the measurement capabilities of the devices used together with the skills of the operators [16]. The result of the analysis is the resultant value of repeatability and reproducibility R&R calculated according to formula (1):

$$R\&R = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2} \quad (1)$$

The EV and AV values are determined from formulas (2) and (3):

$$EV = K_1 \cdot R_{sr} \quad (2)$$

where:

$K_1$  – the coefficient depends on the number of measured parts (measuring spots)  $n = 30$  and number of repetitions  $r = 2$ ;  
 $R_{sr}$  – average range for all measuring devices;

$$AV = \sqrt{(RX_{sr} \cdot K_2)^2 - EV^2/n \cdot r} \quad (3)$$

where:

$K_2$  – the coefficient depends on the number of measured parts (measuring spots)  $n = 30$ ; number of repetitions  $r = 2$  and number of devices  $i = 3$ ;  
 $RX_{sr}$  – range, which is calculated from the average extreme values ( $\max X_{sr}$ ,  $\min X_{sr}$ ) from the data set specific to individual devices.

Performing a percentage tolerance analysis allows you to estimate: relative repeatability %EV; relative reproducibility of %AV, gage %R&R measurement systems, according to the formulas (4 - 6):

$$\%EV = (EV/TV) \cdot 100\% \quad (4)$$

$$\%AV = (AV/TV) \cdot 100\% \quad (5)$$

$$\%R\&R = (R\&R/TV) \cdot 100\% \quad (6)$$

where:

TV (Total Variation) – total variability of the measurement process using individual devices according to the formula (7)

$$TV = \sqrt{(R\&R)^2 + (PV)^2} \quad (7)$$

where:

PV (Part Variation) – part variability resulting from texture variations in test section areas.

The algorithm is described in detail in numerous publications [17, 18]. The calculations were performed in Statistica 13. Table 4 presents the results of the analysis. Figure 4 shows a graph of the repeatability and reproducibility of the system generated from the Statistica program.

The EV value was 0.066 mm and AV – 0.169 mm. For both CTM and ElaTexture, no differences in results were observed

ma możliwości, aby każde z tych urządzeń skanowało profil dokładnie w tym samym miejscu na testowanej powierzchni, dlatego też otrzymuje się różne wyniki. W celu sprawdzenia, czy są one wiarygodne do weryfikacji tekstury nawierzchni, przeprowadzono ocenę powtarzalności i odtwarzalności zgodnie z metodą R&R. Powtarzalność oznacza stopień zgodności wyników kolejnych pomiarów, wykonywanych w określonych warunkach tym samym urządzeniem pomiarowym, przez tego samego operatora, w tym samym miejscu na nawierzchni lotniskowej. Miarą takiego stopnia zgodności jest niepewność rozszerzona powtarzalności EV (*Equipment Variability*). Natomiast odtwarzalność oznacza stopień zgodności wyników pomiarów wykonanych w tym samym miejscu na nawierzchni, ale przez różne urządzenia pomiarowe w tym samym czasie lub przez to samo urządzenie w innym czasie lub z innym operatorem. Jego miarą jest niepewność rozszerzona odtwarzalności AV (*Appraiser Variability*). Powtarzalność i odtwarzalność pomiaru odnoszą się zawsze do łącznego wyrażania zmienności danego parametru w punkcie pomiarowym oraz zdolności pomiarowych stosowanych urządzeń wraz z umiejętnościami operatorów [16]. Wynikiem analizy jest wypadkowa wartość powtarzalności i odtwarzalności R&R obliczona wg wzoru (1):

$$R\&R = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2} \quad (1)$$

Niepewność rozszerzoną powtarzalności i odtwarzalności wyznacza się ze wzorów (2) i (3):

$$EV = K_1 \cdot R_{sr} \quad (2)$$

gdzie:

$K_1$  – stabelaryzowany współczynnik zależny od liczby mierzonych części (punktów pomiarowych)  $n = 30$  i liczby powtórzeń  $r = 2$ ;  
 $R_{sr}$  – średni rozstęp dla wszystkich urządzeń pomiarowych;

$$AV = \sqrt{(RX_{sr} \cdot K_2)^2 - EV^2/n \cdot r} \quad (3)$$

gdzie:

$K_2$  – stabelaryzowany współczynnik zależny od liczby mierzonych części (punktów pomiarowych)  $n = 30$ ; liczby powtórzeń  $r = 2$  i liczby urządzeń  $i = 3$ ;

$RX_{sr}$  – rozstęp, który jest obliczony ze średnich wartości ekstremalnych ( $\max X_{sr}$ ,  $\min X_{sr}$ ) ze zbioru danych wyznaczonych w przypadku poszczególnych urządzeń.

Przeprowadzenie procentowej analizy tolerancji umożliwia oszacowanie: względnej powtarzalności %EV; względnej odtwarzalności %AV; względnej powtarzalności i odtwarzalności systemów pomiarowych %R&R wg wzorów 4 ÷ 6):

$$\%EV = (EV/TV) \cdot 100\% \quad (4)$$

$$\%AV = (AV/TV) \cdot 100\% \quad (5)$$

$$\%R\&R = (R\&R/TV) \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie:

TV (Total Variation) – zakres pola tolerancji mierzonej wielkości, czyli ogólna zmienność procesu pomiarowego z użyciem poszczególnych urządzeń zgodnie ze wzorem (7)

$$TV = \sqrt{(R\&R)^2 + (PV)^2} \quad (7)$$

gdzie:

PV (Part Variation) – zmienność części, wynikająca ze zróżnicowania tekstury na obszarach odcinków testowych.

Algorytm metody jest szczegółowo opisany w publikacjach [17, 18]. Obliczenia wykonano w programie Statistica 13. W tabeli 4 przedstawiono wyniki analizy. Na rysunku 4 pokazano wy-



when repeating at a given measurement point. The operator activated the function of re-registering the profile on the device, without moving it to another place. If the sensors and software work correctly, the results are the same when repeated because the laser moves exactly over the same surface profile. Additionally, these devices are equipped with calibration plates with a known profile, which enable checking the operation of sensors and software before starting tests on surfaces. However, the probability of recording the same profile with a dynamic device is lower, even though the operator makes every effort to maintain the same measurement path during the repetition. Hence, there are slight differences in the results from the scanCHS device.

Most of the variability in the MPD results comes from the variability between parts ( $PV = 0.805\%$   $PV = 97.56\%$ ), i.e. differences in texture

profiles at individual measurement points located on the three sections. This proves that each device works positively and is sensitive to differences resulting from the condition of the surface texture.

The criteria for assessing the measurement system based on the R&R method are as follows [17]:

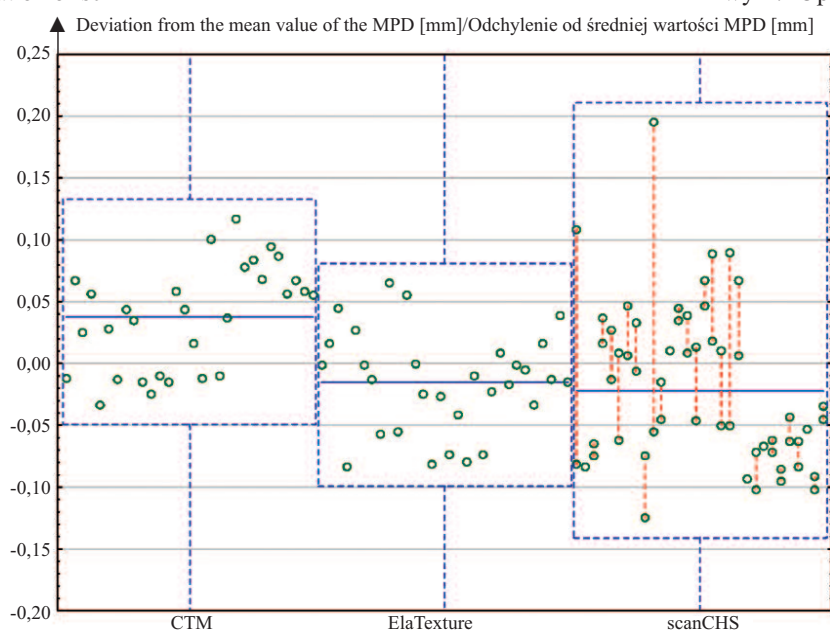
- $\%R\&R \leq 10$  – acceptable,
- $30 \geq \%R\&R > 10$  – conditionally acceptable,
- $\%R\&R > 30$  – unacceptable.

Based on calculations, the gage  $\%R\&R$  of texture verification measurement systems is 21.94%. According to the criteria, they are accepted conditionally. When interpreting this result, it should be taken into account that the MPD results from three types of laser devices for recording the surface profile were compared. If the same measurement systems were used in comparative studies, the gage  $\%R\&R$  value could be required to be  $\leq 10$ . The obtained differences in the MPD results obtained by each of the stationary profilometers and the dynamic profilometer are within an acceptable range. And each of them can be used to assess the surface texture, taking into account their limitations

**Table 4. Results of the R&R method**

Tabela 4. Rezultaty metody R&R

Source/Źródło	Unit of measurement/Jednostka pomiaru	Percent variation/Procentowa zmienność [%]
Repeatability/Powtarzalność	0,066	7,99
Reproducibility/Odtwarzalność	0,169	20,44
Part Variation/Zmienność części	0,805	97,56
R&R	0,181	21,94
Total Variation/Ogólna zmienność procesu	0,825	100,00
Tolerance/Tolerancja	1,000	–



**Fig. 4. Deviation from the mean value of MPD**

Rys. 4. Odchylenie od średniej wartości MPD

kres powtarzalności i odtwarzalności systemu wygenerowany z programu Statistica.

Niepewność rozszerzona powtarzalności EV (ang. *Equipment Variability*) wyniosła 0,066 mm, a odtwarzalności AV (ang. *Appraiser Variability*) 0,169 mm. Zarówno w przypadku CTM, jak i ElaTexture nie zaobserwowano różnicy wyników podczas powtórzeń w danym punkcie pomiarowym. Operator uruchamiał na

urządzeniu funkcję powtórnego rejestrowania profilu bez przesuwania go w inne miejsce. W przypadku, gdy czujniki i oprogramowanie działają w poprawny sposób, to wyniki przy powtórzeniu są takie same, gdyż laser przesuwa się dokładnie po tym samym profilu powierzchni. Dodatkowo urządzenia te są wyposażone w płyty kalibracyjne o znanym profilu, które umożliwiają sprawdzenie pracy czujników i oprogramowania przed rozpoczęciem testów

na powierzchniach. Natomiast prawdopodobieństwo rejestracji tego samego profilu przy urządzeniu dynamicznym jest mniejsze, mimo że operator dokłada wszelkich starań, aby utrzymać ten sam tor pomiarowy podczas powtórzenia. Wynika z tego nieznaczna różnica w wynikach z urządzenia scanCHS.

Większość zmienności w wynikach MPD pochodzi ze zmienności między częściami ( $PV = 0,805$ ,  $\%PV = 97,56\%$ ), czyli różnic w profilach tekstury w poszczególnych punktach pomiarowych zlokalizowanych na trzech odcinkach. Wynika z tego, że każde z urządzeń działa pozytywnie i jest czułe na różnice wynikające ze stanu tekstury powierzchni.

Kryteria oceny systemu pomiarowego, przeprowadzonej zgodnie z metodą R&R, są następujące [17]:

- $\%R\&R \leq 10$  – system jest akceptowalny;
- $30 \geq \%R\&R > 10$  – system jest akceptowalny warunkowo;
- $\%R\&R > 30$  – system jest nie do przyjęcia.

Na podstawie obliczeń względna powtarzalność i odtwarzalność  $\%R\&R$  systemów pomiarowych do oceny tekstury wynosi 21,94%. Zgodnie z kryteriami są one akceptowane warunkowo. Interpretując ten wynik, trzeba mieć na uwadze, że porównywano wyniki MPD z trzech typów urządzeń laserowych do re-

related to the characteristic technical features of a given device, i.e. sampling frequency, ability to record data continuously or point-wise, etc.

## Conclusion

Ensuring safety during flight operations is the priority task of aircraft cabin and ground personnel, as well as infrastructure personnel who ensure the operational readiness of airport pavements. In terms of ensuring the safety of aviation operations, the surface is characterized by determining its technical condition. One component of this process is the skid resistance assessment, which includes measurements of the coefficient of friction and texture depth. There are many devices to verify these parameters. The most effective are those that enable continuous data recording. An example of this is a measurement system in which the scanCHS 2D/3D laser scanner is mounted on the T-10 trailer of the ASFT tester. Continuous, simultaneous measurement of the friction coefficient and texture depth enables quick and efficient inspection of the technical condition of airport pavements. However, testers for recording friction coefficients used on airport pavements are not always equipped with laser sensors to measure the depth of the surface texture. It is then possible to use stationary profilometers for point measurements, such as ElaTexture, CTM. Both dynamic and stationary laser profilometers for calculating the MPD parameter must meet the requirements of the PN-EN ISO 13473-1 standard. Although all presented devices meet the requirements of this standard, the technical properties of individual profilometers influence differences in the obtained results. Based on the assessment of the precision of measurement results obtained from two stationary laser profilometers: ElaTexture, CTM and the scanCHS dynamic profilometer, it was found that the differences are at an acceptable level. This device can be used to check the technical condition of the surface to ensure the required texture depth. However, when interpreting the results, factors related to a given profilometer must be taken into account, which may be a source of variability in the obtained MPD results.

Comparative tests using different devices designed to measure the same feature are extremely valuable in verifying and checking the accuracy of a given measurement method. However, when interpreting precision, the method of obtaining the results should be taken into account - continuous and point, which are the basis of the analysis. Devices that record data in a point manner will have better repeatability than dynamic devices. However, they will not provide as much information about texture variability as dynamic devices.

*Received: 19.02.2024*

*Revised: 05.04.2024*

jestrowania profilu nawierzchni. W przypadku, kiedy w badaniach porównawczych wykorzystano by te same systemy pomiarowe, można byłoby wymagać, aby wartość  $R$  była  $\leq 10$ . Różnice w wynikach MPD otrzymanych przez każdy z profilometrów stacjonarnych i profilometr dynamiczny są w akceptowalnym zakresie. Każde z tych urządzeń może być wykorzystywane do oceny tekstury nawierzchni z uwzględnieniem ograniczeń związanych z charakterystycznymi cechami technicznymi danego urządzenia, takimi jak częstotliwość próbkowania, możliwość rejestracji danych w sposób ciągły lub punktowy itp.

## Podsumowanie

Zapewnienie bezpieczeństwa podczas wykonywania operacji lotniczych jest zadaniem priorytetowym lotniczego personelu pokładowego, naziemnego, jak i personelu infrastruktury, który czuwa nad gotowością eksploatacyjną nawierzchni lotniskowych. W aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa operacji lotniczych nawierzchnia jest oceniana przez pomiar współczynnika tarcia i głębokości tekstury nawierzchni. Istnieje wiele urządzeń do weryfikacji tych parametrów. Najbardziej efektywne są te, które umożliwiają ciągłą rejestrację danych. Takim przykładem jest układ pomiarowy, w którym laserowy skaner scanCHS 2D/3D zamontowany został na przyczepie T-10 testera ASFT. Jednoczesny pomiar współczynnika tarcia i głębokości tekstury w sposób ciągły umożliwia szybkie i wydajne badania kontrolne stanu technicznego nawierzchni lotniskowych. Nie zawsze jednak testery do rejestracji współczynników tarcia, stosowane na nawierzchniach lotniskowych, są wyposażone w czujniki laserowe do pomiaru głębokości tekstury nawierzchni. Wówczas jest możliwość wykorzystania profilometrów stacjonarnych do pomiarów punktowych, tj. ElaTexture i CTM. Zarówno dynamiczne, jak i stacjonarne profilometry laserowe do obliczenia parametru MPD muszą spełniać wymagania normy PN-EN ISO 13473-1. Pomimo tego, że wszystkie przedstawione urządzenia spełniają wymagania tej normy, cechy techniczne poszczególnych profilometrów mają wpływ na różnice w wynikach.

Na podstawie oceny precyzji wyników pomiarów otrzymanych z dwóch stacjonarnych profilometrów laserowych ElaTexture i CTM oraz profilometru dynamicznego scanCHS stwierdzono, że różnice są na akceptowalnym poziomie. Urządzenia te mogą być wykorzystywane do kontroli stanu technicznego nawierzchni pod względem zapewnienia wymaganej głębokości tekstury. Przy interpretacji wyników trzeba jednak uwzględnić czynniki związane z danym profilometrem, które mogą stanowić źródło zmienności pozyskiwanych wyników MPD.

Badania porównawcze z wykorzystaniem różnych urządzeń przeznaczonych do pomiaru tej samej cechy są niezwykle cenne przy weryfikacji i sprawdzeniu dokładności danej metody pomiarowej. Przy interpretacji precyzji należy jednak uwzględnić sposób pozyskania wyników – ciągły i punktowy, które są podstawą analizy. Urządzenia rejestrujące dane w sposób punktowy będą miały lepszą powtarzalność niż urządzenia dynamiczne. Nie dostarczą one jednak tak wielu informacji o zmienności tekstury, jak urządzenia dynamiczne.

*Wpłynął do redakcji: 19.02.2024 r.*

*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.04.2024 r.*

## Literature

- [1] Wesołowski M, Blacha K. Evaluation of airfield pavement micro and macrotexture in the light of skid resistance (friction coefficient) measurements. MATEC Web Conf. 2019 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926205017>.
- [2] Zieja M, Wesołowski M., Blacha K, Iwanowski P. Analysis of the Anti-Skid Properties of New Airfield Pavements in Aspect of Applicable Requirements, Coatings 2021 <https://doi.org/10.3390/coatings11070778>.
- [3] Norma Obronna NO-17-A501:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Badanie szorstkości.
- [4] Gardziejczyk W. Hałaśliwość nawierzchni drogowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej; 2018.
- [5] Kane M, Edmondson V. Skid resistance: understanding the role of road texture scales using a signal decomposition technique and a friction model. Int. J. Pavement Eng. 2020. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1757669Xx>.
- [6] EASA, Annex to ED Decision 2021/003/R „AMC & GM to Authority, Organisation and Operations Requirements for Aerodromes – Issue 1, Amendment 5”, 2021.
- [7] Załącznik 14 ICAO do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, Lotniska Tom I – Projektowanie i eksploatacja lotnisk, Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), 2016 (wydanie 7).
- [8] Doc. 9157 Podręcznik projektowania lotnisk. Część 1 – Drogi startowe (Aerodrome Design Manual Part 1 – Runways), ICAO, 2006.
- [9] Doc. 9137 Podręcznik służb portu lotniczego. Część 2 – Stan nawierzchni lotniskowych” (Airport Services Manual Part 2 – Pavement Surface Conditions), ICAO, 2002.
- [10] Advisory Circular no: 150/5320-12C, U. S. Department of Transportation, FAA, 1997 z późn. zm.
- [11] Gierasimiuk P, Wasilewska M, Gardziejczyk W. A comparative study on skid resistance of concrete pavements differing in texturing technique, Materials, 2021 <https://doi.org/10.3390/ma14010178>.
- [12] PN-EN 13036-1:2010 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych. Metody badań. Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową.
- [13] PN-EN ISO 13473-1:2019-04E Charakterystyka tekstury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych – Część 1: Określanie średniej głębokości profilu.
- [14] Torbruegge S, Wies B. Characterization of pavement texture by means of height difference correlation and relation to wet skid resistance. J. Traffic Trans. Eng. (Engl. Ed.) 2015 <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.001>.
- [15] Brown CA, Hansen, 4HN, Jiang XJ, Blateyron F, Berglund J, SeninN, Bartkowiak T, Dixon B, Goić GL, Quinsat Y, Stemp WJ, Thompson MK, Ungar PS, Zahouani EH. Multiscale analyses and characterizations of surface topographies. CIRP Annals. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.06.001>
- [16] PN-ISO 5725-1:2002 Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów – Część 1: Ogólne zasady i definicje
- [17] Antosz K. Zastosowanie metod R&R do analizy wybranych systemów pomiarowych. Technologia i Automatyzaacja Montażu. 2012; 3: 57-61
- [18] Diering M, Kujawińska A. MSA – Analiza Systemów Pomiarowych – przewodnik po procedurach. AR Comprint; 2012.