



RIPUNJOY GOGI<sup>1)</sup>  
BHUPALI DUTTA<sup>2)</sup>

## REHABILITATION NEEDS ASSESSMENT OF FLEXIBLE PAVEMENTS BASED ON CRACKING AND RUTTING DISTRESS

## OCENA ZAPOTRZEBOWANIA NA REMONTY NAWIERZCHNI PODATNYCH NA PODSTAWIE WYSTĘPOWANIA SPĘKAŃ I KOLEIN

**STRESZCZENIE.** W przedstawionych w artykule badaniach podjęto próbę określenia stanu nawierzchni podatnych na podstawie występowania uszkodzeń w postaci spękań i kolein. Celem jest rozpoznanie stanu, w jakim znajduje się nawierzchnia, jak również sprawdzenie, czy niezbędnym jest jej remont. Praca odchodzi od podejścia opartego na pojedynczym zbiorczym wskaźniku stanu nawierzchni, a konkretnie na wskaźniku przydatności eksploatacyjnej, w którym różne rodzaje parametrów strukturalnych i użytkowych uwzględniane są jednocześnie w procesie decyzyjnym dotyczącym remontu. Zaproponowany w artykule system decyzyjny sformułowany został w oparciu o teorię logiki rozmytej. Uwzględnia on różne stopnie szkodliwości uszkodzeń (spękań i kolein), pozwalając na rozpoznanie krytycznie uszkodzonych odcinków. Wartości pierwiastka błędów średniokwadratowego (*RMSE*) oraz średniego błędów bezwzględnego (*MAE*) wyniosły odpowiednio 2,242 oraz 1,541, co wskazuje, iż wyniki uzyskane z przedstawionego modelu decyzyjnego są stosunkowo dokładne.

**SŁOWA KLUCZOWE:** koleinowanie, logika rozmyta, nawierzchnia podatna, remont nawierzchni, spękania, wskaźnik przydatności eksploatacyjnej nawierzchni, wskaźnik stanu nawierzchni.

**ABSTRACT.** The present study is an attempt to investigate the flexible pavement condition based on cracking and rutting distress which are modes of structural failures. The objective is to identify the structural condition of the pavement and to verify whether the pavement requires any structural treatments such as repairs or rehabilitation. The study departs from the approach of a single summary indicator of pavement condition, namely the serviceability index, where different types of functional and structural distresses are considered simultaneously in rehabilitation decision-making. The proposed decision-making system is formulated based on the fuzzy logic theory. The system takes into account different severity levels of cracking and rutting to identify the critically distressed pavement sections. The root mean square error (*RMSE*) and the mean absolute error (*MAE*) values of 2.242 and 1.541, respectively, show that the results obtained from the present decision-making model are reasonably accurate.

**KEYWORDS:** cracking, flexible pavement, fuzzy logic, pavement condition index, rehabilitation, rutting, serviceability index.

DOI: 10.7409/rabdim.021.019

<sup>1)</sup> Amity University Madhya Pradesh, Amity School of Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Gwalior City 474005, India; rgogoi@gwa.amity.edu (✉)

<sup>2)</sup> Indian Institute of Technology Kanpur, Department of Civil Engineering, Kanpur 208016, India; bhupali@iitk.ac.in

## 1. WSTĘP

Remont stanowi istotną czynność naprawczą mającą na celu przywrócenie pierwotnych parametrów istniejącej nawierzchni. Decyzja o wykonaniu remontu uzależniona jest od aktualnego stanu nawierzchni. W ramach remontów wykonuje się takie działania jak naprawa płytka, naprawa głęboka, nałożenie nowych warstw czy remixing. Proces decyzyjny dotyczący remontu dzieli się na trzy części: a) ocena stanu nawierzchni, b) badania terenowe, c) dobór odpowiednich czynności naprawczych (Rys. 1). W ramach oceny stanu nawierzchni bieżący stan konstrukcji opisywany jest przy pomocy wskaźników przydatności eksploatacyjnej, takich jak *PSI* (ang. *Present Serviceability Index*) [1], *PCI* (ang. *Pavement Condition Index*) [2], *IRI* (ang. *International Roughness Index*) [3-4] czy *MCI* (ang. *Maintenance Control Index*) [5]. Następnie przeprowadza się oględziny i badania w terenie, mające na celu ocenę nawierzchni metodami niszczącymi bądź nieniszczącymi. Na podstawie dokonanych obserwacji dobiera się odpowiednie czynności mające przywrócić pierwotne parametry uszkodzonej nawierzchni. Można zatem stwierdzić, że remont to istotna czynność naprawcza, wymagająca znacznych nakładów finansowych. Ważne jest więc staranne planowanie, dobór odpowiednich strategii naprawy oraz określenie harmonogramu prac. Przed zarządcami dróg stoi zadanie rozsądnego wyznaczenia odcinków drogi wymagających remontu oraz określenia czasu i sposobu wykonania prac. W celu sprawnego rozwiązania zagadnień związanych z utrzymaniem i remontami nawierzchni często stosuje się dwa ogólne podejścia: określenie całkowitego niezbędnego budżetu [6-8] lub alokację dostępnego budżetu [9-10]. W przypadku pierwszego podejścia celem jest zminimalizowanie całkowitych kosztów remontów w rozpatrywanym okresie, przy założeniu określonych warunków dotyczących stanu nawierzchni. W drugim podejściu ogólnym celem jest maksymalizacja efektów remontów nawierzchni i minimalizacja zużycia środków, z uwzględnieniem pewnych określonych ograniczeń. Analizy te zazwyczaj zaliczyć można do grupy analiz kosztów cyklu życia (LCCA). Gdy rozpatrywane są koszty cyklu życia, do wydatków agencji drogowej zalicza się pierwotne koszty budowy drogi oraz koszty utrzymania i remontów w analizowanym okresie, a decyzje dotyczące wydatków podejmowane są z uwzględnieniem wspomnianych powyżej celów. W takiej analizie wiarygodność uzyskanych wyników zależy od zastosowanych modeli przewidywania uszkodzeń nawierzchni oraz metod oceny stanu nawierzchni. Jak wspomniano wcześniej, obecnie stan nawierzchni wyrażany jest za pomocą wskaźników przydatności eksploatacyjnej, w których uwzględniane są zarówno parametry funkcjonalne, jak i strukturalne [1, 8, 11]. Ponieważ

## 1. INTRODUCTION

Rehabilitation is a major maintenance procedure applied to an existing pavement to restore its structural integrity. Application of rehabilitation depends upon the current health of the pavement. In rehabilitation, actions such as partial depth repair, full-depth repair, overlaying, and milling are used. The rehabilitation process has three distinct parts: a) evaluation of pavement health, b) on-field investigation, and c) selection of appropriate rehabilitation actions (Fig. 1). In pavement health evaluation, the current condition of the pavement is assessed using serviceability index models, such as Present Serviceability Index (*PSI*) [1], Pavement Condition Index (*PCI*) [2], International Roughness Index (*IRI*) [3-4] and Maintenance Control Index (*MCI*) [5]. Subsequently, an on-field investigation is carried out to inspect the pavement by either destructive or non-destructive testing. Later, based on the observations, an appropriate rehabilitation activity is selected to restore the distressed pavement. Thus, it can be inferred that rehabilitation is a major maintenance activity and requires considerable financial resources. Hence, it is important to carefully plan, select and schedule appropriate rehabilitation strategies. Highway agencies deal with the task of judiciously identifying pavement sections that require rehabilitation, determining the time and manner of rehabilitation and deciding upon the type of actions that are necessary. To find an efficient solution, pavement rehabilitation and maintenance problems are often solved using two general approaches: finding the total budget needed [6-8] and allocation of the budget [9-10]. In the required budget approach, the objective is to minimize the total rehabilitation cost within the planning period considered, so that certain conditions regarding the state of the pavements are satisfied. In the budget allocation approach, the broad objective is to maximize the effect of pavement rehabilitation and to minimize the use of funds taking into account certain limitations, described as constraints. These analyses largely fall in the domain of life-cycle cost analysis (LCCA). In LCCA, the expenditures borne by the highway agencies include the initial cost of construction, maintenance, and rehabilitation cost within the planning period and are decided upon considering the objectives mentioned above. In such an analysis, the reliability of the outcome depends on the pavement distress prediction models and evaluation methods used. As discussed earlier, presently the condition of pavements is assessed in terms of serviceability index models, where both the functional and structural distresses of pavements are considered [1, 8, 11]. Since a combination of different

rozpatruje się kombinację różnych rodzajów parametrów (spękania, deformacje, równość, uskoki itp.), wskaźniki te nazywane są często wskaźnikami złożonymi. Przydatność eksploatacyjna prognozowana z zastosowaniem modeli wskaźników złożonych oceniana jest przede wszystkim z myślą o zapewnieniu użytkownikom wygodnych, bezpiecznych i równych dróg.

W artykule rozpoznano ograniczenia modeli opartych na wskaźnikach złożonych, tym samym poddając weryfikacji ich przydatność w procesach decyzyjnych dotyczących remontów nawierzchni. Na podstawie poczynionych obserwacji zaproponowano powiązanie planowania remontów nawierzchni wyłącznie z zasięgiem uszkodzeń strukturalnych. Takie podejście pozwala na uniknięcie rozpoznanych ograniczeń modeli opartych na wskaźnikach złożonych.

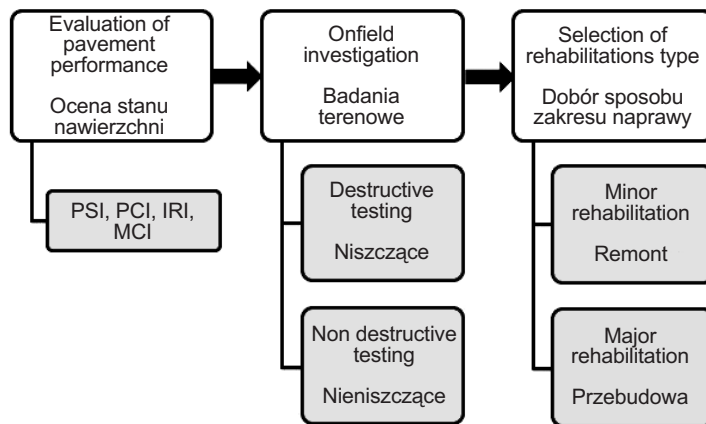


Fig. 1. Stepwise illustration of activities involved in pavement rehabilitation

Rys. 1. Schemat postępowania w doborze czynności naprawczych

## 2. RODZAJE WSKAŹNIKÓW ZŁOŻONYCH

Wskaźniki złożone stanowią grupę zbiorczych miar uwzględniających albo kombinację różnych rodzajów uszkodzeń nawierzchni, albo kombinację dwóch lub więcej innych wskaźników złożonych. We wskaźnikach tych bierze się pod uwagę zarówno parametry funkcjonalne, jak i uszkodzenia strukturalne. Niektóre z tych wskaźników zostały już wspomniane w rozdziale 1. Uszkodzenia strukturalne stanowią reakcję nawierzchni na wielokrotne obciążenia pojazdami [12-13]. Parametry funkcjonalne natomiast opisują stan nawierzchni w kontekście jej równości, właściwości przeciwpoślizgowych i innych cech powierzchniowych [12-13]. Agencje zarządzające drogami skupiają się przede wszystkim na uszkodzeniach strukturalnych, ponieważ najistotniejsza jest

types of distress is considered (such as cracking, surface deformation, roughness, depression, etc.), the serviceability index models are often termed composite index models. Serviceability of pavement predicted using the composite index models is assessed with the primary objective of providing vehicle users with comfortable, safe, and smooth roads.

In this study, the limitations of the composite index models are identified, and thus their viability in the pavement rehabilitation decision-making process is verified. Based on the observed limitations, it is proposed that pavement rehabilitation should be based on the extent of structural distresses only. This helps to counter the limitations identified with the composite index models.

The paper is organized into six sections of which this is the first. The types of composite index models which are currently in use are discussed in Section 2. The limitations of the composite index models are discussed in Section 3. In Section 4, the problem statement is discussed. The proposed approach to assess the pavement rehabilitation needs is discussed in Section 5. The conclusions of the present study are discussed in Section 6.

## 2. TYPES OF COMPOSITE INDEX MODELS

Composite indices are a group of measures involving either different types of pavement distresses or a combination of two or more composite indices. Both functional and structural distresses of pavements are considered in the indices. Some of the composite indices were mentioned earlier in Section 1. Structural distresses represent the response of the pavement under traffic load repetitions [12-13]. The features that define pavement condition in terms of smoothness, frictional resistance or other pavement surface properties are the functional distresses [12-13]. Highway agencies primarily focus on structural distresses, because they are responsible for pavement health and, consequently, its performance during the service life [11-14]. The functional distresses are predominantly related to ride quality experienced by vehicle users. Some studies in the past have attempted structural maintenance based on features that represent the ride quality, which proved unjustifiable [15].

The composite index models were developed by researchers and engineers by correlating field data with expert opinion. In all these models, serviceability of the pavement is expressed numerically. For example, in the *PSI* model, numerical values ranging from 0 to 5 are used to

dla nich perspektywa stanu technicznego drogi oraz jej funkcjonowania w założonym okresie eksploatacji [11-14]. Parametry funkcjonalne związane są głównie z jakością drogi postrzeganą przez użytkowników. W niektórych pracach w przeszłości podejmowano próby uzależnienia decyzji o czynnościach naprawczych i utrzymaniowych od parametrów funkcjonalnych, okazało się to jednak nieuzasadnione [15].

Modele oparte na wskaźnikach złożonych zostały opracowane przez badaczy i inżynierów poprzez skorelowanie danych uzyskanych w terenie z oceną stanu drogi dokonaną przez ekspertów. Na przykład we wskaźniku *PSI* stosuje się wartości liczbowe z zakresu od 0 do 5, wyrażające ogólny stan nawierzchni, gdzie 0 to najgorszy możliwy stan, zaś 5 – najlepszy [1]. Zastosowanie wskaźnika przydatności eksploatacyjnej w doborze czasu remontu nawierzchni przedstawiono na Rys. 2. Wykres przedstawia pogorszenie stanu istniejącej nawierzchni wyrażone wartością złożonego wskaźnika przydatności eksploatacyjnej. Zazwyczaj w miarę, jak stan nawierzchni się pogarsza, zarządcy drogi starają się podtrzymać jej przydatność eksploatacyjną powyżej założonego poziomu (na przykład wartość wskaźnika *PSI* większą od 2), stosując bieżące utrzymanie oraz okresowe prace remontowe. Niemniej jednak, dobór minimalnej przydatności eksploatacyjnej jest procesem złożonym; jak wspomniano wcześniej, dotyczące jej decyzje zapadają w agencjach zarządzających drogami na podstawie analizy kosztów cyklu życia inwestycji.

### 3. OGRANICZENIA MODELI OPARTYCH NA WSKAŹNIKACH ZŁOŻONYCH

Na podstawie przeglądu literatury zaobserwowano wymienione poniżej ograniczenia modeli zakładających planowanie napraw nawierzchni w oparciu o wskaźniki złożone:

1. W praktyce remont uważa się za wskazany, gdy udział powierzchni spękanej osiągnie około 20-25% powierzchni nawierzchni. Tymczasem nawet przy udziale powierzchni spękanej równym 100% spadek przydatności eksploatacyjnej wyrażony wskaźnikiem *PSI* wynosi zaledwie 0,33, a więc teoretycznie remont nie jest konieczny. Podobnie jest w przypadku kolein - nawierzchnie są zazwyczaj remontowane przy głębokości koleiny wynoszącej 20 mm lub więcej. Niemniej jednak, przy takiej głębokości koleiny spadek wskaźnika *PSI* wynosi tylko 0,75. Można zatem stwierdzić, że koncepcja planowania zabiegów naprawczych na podstawie zarówno parametrów funkcjonalnych jak i strukturalnych nie pozwala na właściwe rozpoznanie konieczności przeprowadzenia remontu.
2. Jak dotąd nie rozpoznano jednoznacznej zależności między równością nawierzchni a wskaźnikiem *PSI*. Dostępne

signify overall pavement condition, 0 being the worst state and 5 being the best possible state [1]. Application of such a serviceability index in pavement rehabilitation is illustrated in Fig. 2. The figure shows deterioration of an existing pavement evaluated using the composite index models. Typically, as the pavements deteriorate, highway agencies try to keep the serviceability above a minimum level (for example, a *PSI* value of 2) through maintenance and, if necessary, occasional rehabilitation. However, the choice of minimum serviceability is a complex process and such decisions are taken by the highway agencies through LCCA, as discussed earlier.

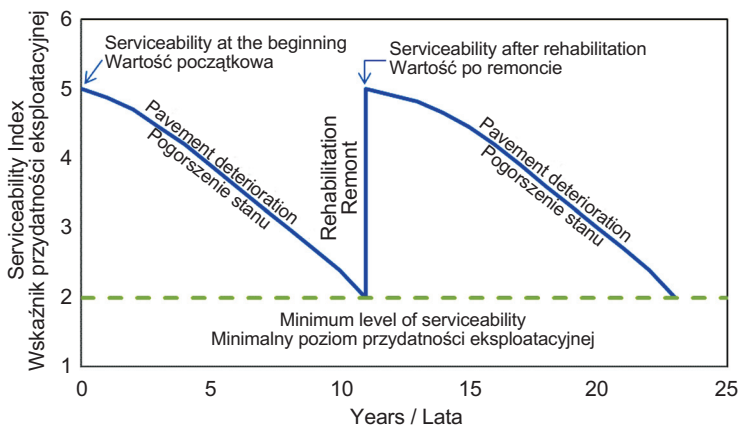


Fig. 2. Deterioration of pavement over time and its rehabilitation to restore to its original undistressed state

Rys. 2. Postępujące pogorszenie stanu nawierzchni oraz remonty przywracające jej pierwotne parametry

### 3. LIMITATIONS OF COMPOSITE INDEX MODELS

Based on the review of past literature, the observed limitations of the composite index models are discussed below:

1. Rehabilitation is practically considered appropriate when cracking is about 20-25% of the pavement area. But even at 100% cracking, the loss of serviceability in terms of the *PSI* value is only 0.33, which, theoretically, doesn't necessitate rehabilitation. Similarly, a pavement is generally rehabilitated at a rut depth level of 20 mm or more. However, at this level of rut depth, the loss of serviceability is only 0.75. Thus, the serviceability concept of pavement maintenance based on both functional and structural distresses fails to recognize the need for rehabilitation.
2. No conclusive interdependency between pavement roughness and the present serviceability index *PSI* has been established yet. Past studies have suggested that

publikacje sugerują, że te dwie miary odzwierciedlają dwa odmienne aspekty stanu nawierzchni [12, 16]. Co więcej, biorąc pod uwagę, iż oceny ekspertów zastosowane do sformułowania funkcji *PSI* odbiegają znacząco od oczekiwań użytkowników, oceny stanu nawierzchni mogą zmieniać się w zależności od regionu.

3. Szybkości przyrostu poszczególnych uszkodzeń nie są identyczne. Zależą one od rodzaju nawierzchni, warunków środowiskowych i charakterystyki ruchu. Zatem modelowanie stanu nawierzchni za pomocą pojedynczego złożonego wskaźnika, takiego jak *PSI*, nie pozwala na odzwierciedlenie wpływu poszczególnych czynników, a proces decyzyjny oparty jest na wartości stanowiącej zaledwie ogólne podsumowanie dostępnych danych.
4. Względne wagi (istotność) poszczególnych uszkodzeń zmieniają się w zależności od wpływu środowiska. Na przykład wagi uszkodzeń opracowane dla nawierzchni w klimatach ciepłych i suchych mogą nie odpowiadać wagom w klimatach zimnych i wilgotnych. A zatem model *PSI* opracowany przez AASHTO [1] nie może być automatycznie zastosowany w dowolnej lokalizacji.

Biorąc pod uwagę wymienione ograniczenia, słuszniejsze wydaje się oparcie decyzji dotyczących utrzymania i zabiegów naprawczych na indywidualnym modelowaniu poszczególnych uszkodzeń. W związku z tym w niniejszym artykule podjęto próbę sformułowania strategii procesu decyzyjnego dotyczącego remontów nawierzchni na podstawie uszkodzeń strukturalnych – spękań i głębokości koleiny.

## 4. PROBLEM BADAWCZY

Celem przedstawionych badań było sformułowanie metody oceny stanu nawierzchni podatnych na podstawie poziomu spękań oraz głębokości koleiny. Podejście to wiąże się z rezygnacją z zastosowania pojedynczego wskaźnika złożonego, tj. ze wskaźnika przydatności eksploatacyjnej, w którym uwzględnia się jednocześnie parametry funkcjonalne i strukturalne. Podsumowując, badany problem można wyrazić w postaci zagadnienia: „Czy analizowana nawierzchnia jest w stanie krytycznym i czy obecny stan wymaga wykonania prac remontowych, biorąc pod uwagę znane poziomy spękań i głębokość koleiny?”.

## 5. METODOLOGIA PRZEDSTAWIONEGO BADANIA

### 5.1. UWAGI OGÓLNE

Uszkodzenia uwzględnione w niniejszym badaniu to spękania zmęczeniowe (FC), spękania krawędziowe (EC), spękania blokowe (BC), spękania podłużne (LC), spękania

they represent physically different attributes of pavement condition [12, 16]. Moreover, since the expert ratings which were used to formulate the *PSI* function tend to vary significantly from the expectations of the users, the ratings can vary from region to region.

3. The progression rates of individual distresses are different and depend on the type of pavement, environmental conditions, and traffic type. Therefore, modeling pavement performance with a single composite index, such as *PSI*, would ignore the effects of relevant attributes, as only summarized information is used to predict the pavement condition.
4. The relative weight (significance) of individual distresses will vary according to the environmental conditions. For example, the weights developed for pavements in dry and hot climatic conditions may not apply to pavements in wet and cold climatic conditions. Thus, the *PSI* model developed by AASHTO [1] is not applicable everywhere.

Considering the discussed limitations, it seems more appropriate to base the maintenance and rehabilitation decisions on modeling of pavement distresses individually. Therefore, this study attempts to formulate a strategy for rehabilitation decision-making by considering the structural distress – cracking and rut depth.

## 4. PROBLEM STATEMENT

The objective of the present study is to formulate an approach to assess the condition of flexible pavements based on cracking and rut depth. The approach thus departs from the existing single summary indicator, namely the serviceability index, where both functional and structural distresses are considered simultaneously. Overall, the present problem can be stated as: “Given the known levels of pavement cracking and rut depth, is the pavement in critical structural condition, and does it necessitate pavement rehabilitation?”.

## 5. METHODOLOGY OF THE PRESENT STUDY

### 5.1. GENERAL REMARKS

The distresses considered in this study are fatigue cracking (FC), edge cracking (EC), block cracking (BC), longitudinal cracking (LC), transverse cracking (TC), and rut depth (RD). All the distresses are an indicator of the structural health of a flexible pavement. The severity levels of the individual distresses are used to evaluate pavement condition and to decide whether rehabilitation is required to

poprzeczne (TC) i głębokość koleiny (RD). Wszystkie te uszkodzenia stanowią wyznacznik trwałości strukturalnej nawierzchni asfaltowych. Do oceny stanu nawierzchni oraz stwierdzenia, czy niezbędne jest przywrócenie zadowalającego stanu poprzez wykonanie remontu, stosuje się stopnie szkodliwości poszczególnych uszkodzeń. Proces decyzyjny w przedstawionym podejściu oparty jest na teorii logiki rozmytej. Najważniejsze powody, dla których w przedstawionym badaniu zastosowano logikę rozmytą, opisane są poniżej.

1. Natężenia uszkodzeń strukturalnych klasyfikowane są jako „niskie”, „średnie” lub „wysokie”, a zatem za pomocą ocen językowych, stanowiących wartości zmiennej lingwistycznej. Słowa te reprezentują szerokie zakresy wartości, są więc trudne do przełożenia na liczby. Teoria logiki rozmytej pozwala na rozdzielenie tych wartości na grupy poprzez utworzenie zbiorów rozmytych [17-18]. Zbiory rozmyte opisane są przez funkcje przynależności, określające stopień, w jakim wyrażone liczbowo wartości stwierdzonych uszkodzeń przynależą do poszczególnych wartości zmiennej lingwistycznej. Na tej samej zasadzie (na podstawie wartości wskaźnika *PCI*) utworzono pięć grup wynikowych stanu nawierzchni: „dobry”, „słaby”, „bardzo słaby”, „poważny” i „niewystarczający”.
2. Pod uwagę wzięto sześć różnych rodzajów uszkodzeń strukturalnych, a kombinacje ich stopnie szkodliwości mają determinować decyzję o zapotrzebowaniu na remont lub jego braku. A zatem, z natury „rozmyte” związki przyczynowo-skutkowe w zastosowanym podejściu mogą być sformułowane z zastosowaniem logiki rozmytej. W systemie wnioskowania rozmytego reguły *if-then* („jeżeli... to...”) są wyrażone przez kombinacje wartości zmiennych lingwistycznych [19]. Reguły te pozwalają na lepszą ocenę uzyskanych rezultatów.

Kroki, które podjęto w ramach formułowania zaprezentowanej metody, przedstawione są na Rys. 3. Metodologia opracowania systemu wnioskowania rozmytego oparta była na następujących podstawowych elementach teorii logiki rozmytej [17]:

- a) rozmywanie danych wejściowych z użyciem zmiennej lingwistycznej,
- b) dobór funkcji przynależności (wejścia i wyjścia) dla modelu rozmytego na podstawie bazy danych,
- c) baza reguł typu *if-then*,
- d) moduł decyzyjny – wnioskowanie na podstawie reguł,
- e) system przekształcający wartości rozmyte na wartości ilościowe – proces nazywany wyostrzaniem.

restore it to satisfactory condition. The present approach to assess the requirement for pavement rehabilitation is formulated using fuzzy logic theory. The primary reasons for using fuzzy logic in the present study are discussed below.

1. The severities of the structural distresses are classified as “low”, “medium”, and “high”, which are linguistic ratings. The linguistic rating represents a wide range of values and is hence difficult to quantify. Fuzzy logic theory can separate these ranges into different groups by forming fuzzy sets [17-18]. A fuzzy set comprises of numbers, called the membership grades, which show the degree to which a severity level of distress belongs to different linguistic ratings. By the same method, the five groups in the output (*PCI* value), namely “good”, “poor”, “very poor”, “severe”, and “failed” are also formed.
2. There are six different types of structural distresses considered and the combination of the severity levels of the distresses will determine whether the pavement requires rehabilitation or not. Thus, the inherently fuzzy cause-effect interactions in the present approach could be formulated using fuzzy logic. For example, in a fuzzy inference system, the if-then fuzzy rules are represented by fuzzy sets and are expressed in linguistic ratings [19]. These rules enable better judgement of the outcome.

The stepwise approach of formulating the present methodology is illustrated in Fig. 3. The methodology adopted here to develop the fuzzy inference system (FIS) incorporates the following basic components of fuzzy logic [17]:

- a) fuzzification of inputs from the linguistic variable values,
- b) selection of membership functions (input and outputs) for the fuzzy model based on the database,
- c) a system of if-then rules,
- d) a module used for decision-making operation for inference of fuzzy rules,
- e) a system to convert the fuzzy inputs into crisp output, the process termed as defuzzification.

The *PCI* values are estimated based on cracking and rut depth only. Information on different types of cracking and rutting distresses were used to develop the proposed FIS. The distress data were used to calculate the membership functions for both inputs and outputs in the FIS. As shown in Fig. 3, through the process of fuzzification and defuzzification, the severely distressed pavement sections were identified for rehabilitation. A detailed description of the present methodology is presented below.

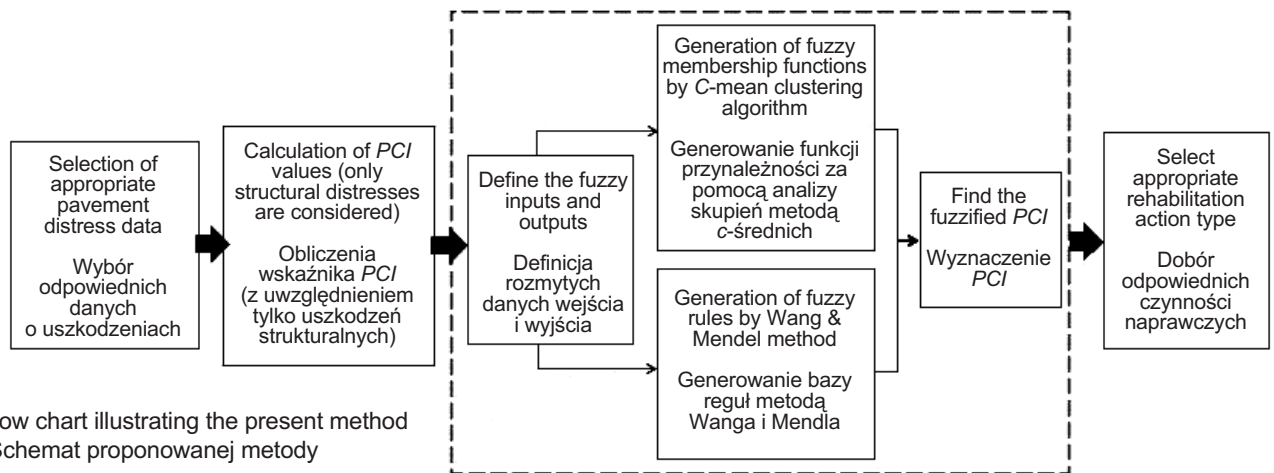


Fig. 3. Flow chart illustrating the present method  
Rys. 3. Schemat proponowanej metody

Wartości wskaźnika *PCI* są szacowane wyłącznie na podstawie ilości spękań oraz głębokości koleiny. Przedstawiony system wnioskowania rozmytego przygotowano, korzystając z danych o różnych rodzajach spękań i kolein. Dane o uszkodzeniach wykorzystano do określenia funkcji przynależności dla wartości zmiennych lingwistycznych zarówno dla wejścia, jak i dla wyjścia. Jak pokazano na Rys. 3, dzięki procesom rozmywania i wyostrzania zidentyfikowano poważnie uszkodzone nawierzchnie, które wymagały remontu. Poniżej przedstawiony jest szczegółowy opis proponowanej metody.

## 5.2. DANE O USZKODZENIACH

Dane o uszkodzeniach wykorzystane w niniejszym badaniu zostały pozyskane z zasobów amerykańskiej agencji Federal Highway Administration (FHWA) [20]. Agencja ta rutynowo gromadzi dane o uszkodzeniach nawierzchni w USA oraz Kanadzie i przechowuje je w bazie danych programu Long-Term Pavement Performance (LTPP). Dane o spękaniach są udostępniane w formie liczbowej jako całkowita powierzchnia spękana (w stopach kwadratowych) przypadająca na jednostkowy odcinek nawierzchni (500 stóp × 12 stóp). Głębokość koleiny wyrażona jest jako zagłębienie pionowe (w milimetrach) mierzone w prawym i lewym śladzie koła.

## 5.3. WARTOŚĆ *PCI* NA PODSTAWIE DANYCH O SPĘKANIACH I GŁĘBOKOŚCI KOLEIN

Przedstawiony system wnioskowania rozmytego wymaga oszacowania wartości *PCI* odcinków nawierzchni. Wartość *PCI* jest tutaj określana wyłącznie na podstawie ilości spękań oraz głębokości kolein. Dla poszczególnych rodzajów spękań oraz głębokości koleiny określa się „gęstość uszkodzenia” (ang. *distress density*) zgodnie z normą ASTM D6433 [2]. Uzyskane wartości stosuje się do wyznaczenia „wartości redukującej” *DV* (ang. *deduct value*), osobno dla każdego

## 5.2. DISTRESS DATA INFORMATION

The pavement distress data required for the presented study was obtained from the Federal Highway Administration (FHWA) [20]. The distress data of pavements is routinely collected by FHWA across USA and Canada and stored in the Long-Term Pavement Performance (LTPP) database. The cracking data are available as the total cracked area (in square feet) of the unit pavement sections (500 feet × 12 feet). The rut depth reported is the vertical depression (in millimeter) measured along the right and left vehicle wheel paths on the pavement.

## 5.3. *PCI* VALUE BASED ON CRACKING AND RUT DEPTH

The proposed fuzzy decision-making system requires the *PCI* values of the pavement sections to be estimated. The *PCI* value is estimated by considering only the cracking distresses and rut depth. The distress density of cracking and rut depth is estimated as per the ASTM D6433 standard [2]. The distress density is used to find the deduct value *DV* corresponding to individual distresses. The deduct value is calculated using equation (1) [21, 22]. Once the *DV* is determined, the *PCI* value of individual pavement sections is estimated using equation (2) [21, 22].

$$DV = F_s \times F_e \times W, \quad (1)$$

where:

$F_s$  – the severity factor,

$F_e$  – the extent factor,

$W$  – the distress weight,

$$PCI = 100 - \sum DV. \quad (2)$$

z uszkodzeń, zgodnie z równaniem (1) [21, 22]. Po określeniu wszystkich wartości  $DV$  dla danego odcinka nawierzchni, wartość jego wskaźnika  $PCI$  jest określana według równania (2) [21, 22].

$$DV = F_s \times F_e \times W, \quad (1)$$

gdzie:

$F_s$  – współczynnik szkodliwości,

$F_e$  – współczynnik zasięgu,

$W$  – waga danego rodzaju uszkodzenia,

$$PCI = 100 - \sum DV. \quad (2)$$

Uszkodzenia klasyfikuje się do różnych grup stopni oraz zasięgu szkodliwości. Uszkodzenia w bazie danych FHWA były dzielone na trzy kategorie szkodliwości: „niskie”, „średnie” i „wysokie”. Wartości  $F_s$  odpowiadające trzem kategoriom szkodliwości przedstawione są w Tabl. 1. Prace [21, 22] oparte były na przeprowadzonej wśród ekspertów ankiecie, która pozwoliła na powiązanie danych o uszkodzeniach z poziomami intensywności. Na podstawie ankiety wyróżniono pięć poziomów zasięgu. Zastosowane wartości współczynnika zasięgu  $F_e$  przedstawiono w Tabl. 2. Wagi poszczególnych uszkodzeń odzwierciedlające ich znaczenie w systemie decyzyjnym przypisano według Tabl. 3.

Table 1. Severity factor values of distresses as per different levels of severity [21, 22]

Tablica 1. Wartości współczynnika szkodliwości dla różnych stopni szkodliwości uszkodzenia [21, 22]

Severity level Stopień szkodliwości	Severity factor Współczynnik szkodliwości
Low / Niski	0.5
Moderate / Średni	0.7
High / Wysoki	0.9

## 5.4. SYSTEM WNIOSKOWANIA ROZMYTEGO NA POTRZEBY DECYZJI DOTYCZĄCYCH PRAC REMONTOWYCH

### 5.4.1. Zasady ogólne

W proponowanym systemie wnioskowania rozmytego wejście stanowią ilości spękań różnego rodzaju oraz głębokość koleiny, wyjściem natomiast są wartości  $PCI$ . Rodzaj niezbędnych czynności remontowych określa się na podstawie wartości  $PCI$  odcinka nawierzchni. Zmienne lingwistyczne opisujące stopień szkodliwości uszkodzeń mogą przyjmować wartości „niskie”, „średnie” i „wysokie”. Wyjściową wartość  $PCI$  odzwierciedla jedna z pięciu wartości zmiennej lingwistycznej opisującej stan nawierzchni: „dobry”, „słaby”, „bardzo słaby”, „poważny” i „niewystarczający”. Uszkodzona nawierzchnia wytypowana jest do remontu, jeśli jej stan zostaje

There are different groups of severity and extent levels of cracking and rutting distresses. The FHWA distress data used were reported in the severity categories of “low”, “medium”, and “high”. The  $F_s$  values used for the three severity categories are shown in Table 1. The studies [21, 22] are based on a survey which was conducted among experts to group the distress data in terms of extent levels. According to the survey, five groups of extent level were suggested by the experts. The rating values of the extent levels  $F_e$  used in this study are shown in Table 2. The weights of individual distresses according to their impact on the decision-making system are assigned using the values shown in Table 3.

Table 2. Extent factor values [21, 22]

Tablica 2. Wartości współczynnika zasięgu [21, 22]

Extent level Zasięg	Extent factor Współczynnik zasięgu
Slight / Lekki	0.3
Low / Niski	0.5
Moderate / Średni	0.7
High / Wysoki	0.9
Very high / Bardzo wysoki	1.0

Table 3. Weights of distresses [21, 22]

Tablica 3. Wagi poszczególnych uszkodzeń [21, 22]

Distress / Uszkodzenie	Weight value / Waga
Fatigue cracking Spękania zmęczeniowe	10
Longitudinal cracking Spękania podłużne	5
Transverse cracking Spękania poprzeczne	5
Edge cracking Spękania krawędziowe	5
Block cracking Spękania blokowe	5
Rut depth Głębokość koleiny	10

## 5.4. THE FUZZY INFERENCE SYSTEM FOR REHABILITATION DECISION-MAKING

### 5.4.1. General principles

In the proposed fuzzy inference system (FIS), the inputs are the cracking distresses and rut depth, and the output is the  $PCI$  value. The type of rehabilitation required is decided upon based on the  $PCI$  value of the pavement



zaliczony do kategorii „słaby”, „bardzo słaby” lub „poważny”. Kształt oraz parametry funkcji przynależności dla wejścia i wyjścia są określane poprzez analizę skupień danych opisujących uszkodzenia. Reguły logiczne *if-then*, stanowiące istotną pomoc w procesie decyzyjnym, generowane są na podstawie metody Wang i Mendla [23]. Proponowana analiza przeprowadzona została na platformie FISPro [24]. Funkcje przynależności oraz wygenerowana baza reguł *if-then* systemu wnioskowania rozmytego zostały omówione poniżej.

### 5.4.2. Funkcje przynależności

W przedstawionym badaniu zastosowano trójkątne i trapezowe funkcje przynależności. Parametry kształtu funkcji przynależności (wejścia oraz wyjścia) zostały wyznaczone za pomocą rozmytej analizy skupień metodą *c*-średnich [25]. Algorytm ten oparty jest na zasadzie, iż każdy z punktów danych charakteryzuje się stopniem, w jakim przynależy do kategorii [17]. Dane o uszkodzeniach z bazy LTTP zostały poddane takiej analizie celem wyodrębnienia poszczególnych grup. Wyniki wykazały, że uszkodzenia należą do trzech głównych skupień, nazwanych: „niskie”, „średnie” i „wysokie”. Następnie na podstawie analizy oszacowanych wartości *PCI* odcinków nawierzchni zaobserwowano pięć skupień. Grupy te nazwano: „dobry”, „słaby”, „bardzo słaby”, „poważny” i „niewystarczający”. Funkcje przynależności przedstawiono na Rys. 4-10.

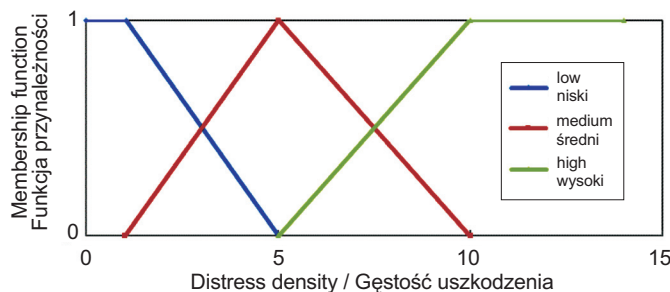


Fig. 4. Membership function of fatigue cracking *FC*  
Rys. 4. Funkcja przynależności dla spękań zmęczeniowych *FC*

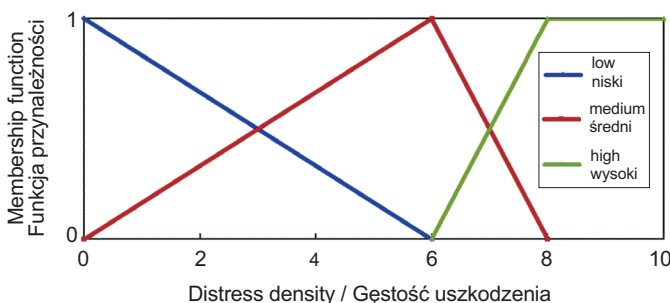


Fig. 5. Membership function of edge cracking *EC*  
Rys. 5. Funkcja przynależności dla spękań krawędziowych *EC*

section. Three linguistic rating terms of “low”, “medium”, and “high” are used to represent the severity of input distresses. The output *PCI* value is represented with five linguistic rating terms: “good”, “poor”, “very poor”, “severe”, and “failed”. The distressed pavement is chosen for rehabilitation if it is in the “poor”, “very poor”, and “severe” category. The shape and parameters of the fuzzy membership functions of the inputs and output are determined through clustering analysis of the distress data. The fuzzy *if-then* rules, a major aid in rehabilitation decision-making, are generated based on Wang and Mendel method [23]. The proposed fuzzy analysis is carried out on the FISPro platform [24]. The membership functions and the generated *if-then* rules of the fuzzy system are discussed below.

### 5.4.2. Membership functions

The triangular and trapezoidal-shaped membership functions were used in the present study. The shape parameters of the membership functions (for both inputs and outputs) were derived through fuzzy *C*-Mean analysis [25]. The algorithm is based on the principle that individual data points have a degree to which they belong to a cluster group, termed grade membership [17]. The distress data obtained from the LTTP database were analyzed to find the cluster groups. Results of the analysis show that the distresses belong to three major cluster groups, which were named “low”, “medium”, and “high”. Next, based on the analysis of the estimated *PCI* values of the pavement sections, five clusterings were observed. The groups were named: “good”, “poor”, “very poor”, “severe” and “failed”. The membership functions are shown in Figs 4-10.

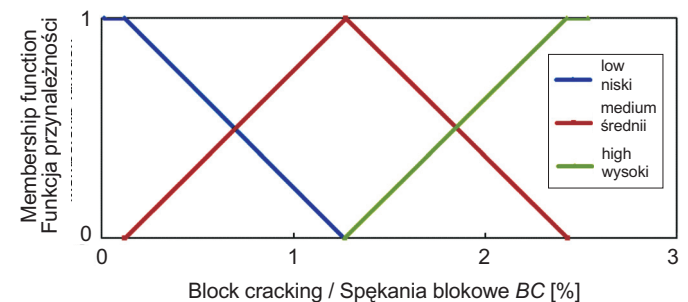


Fig. 6. Membership function of block cracking *BC*  
Rys. 6. Funkcja przynależności dla spękań blokowych *BC*

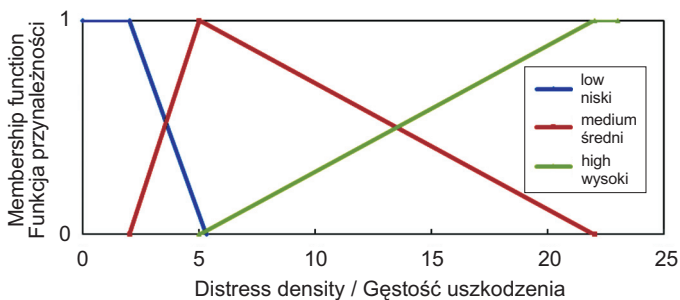


Fig. 7. Membership function of transverse cracking *TC*  
Rys. 7. Funkcja przynależności dla spękań poprzecznych *TC*

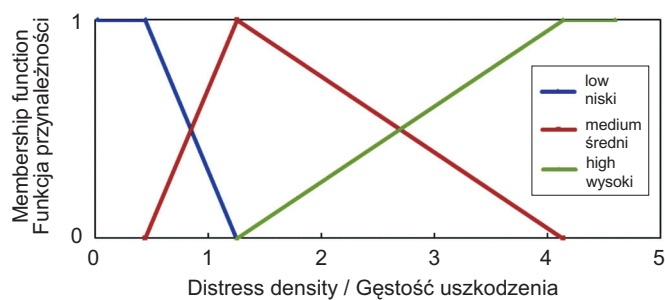


Fig. 8. Membership function of longitudinal cracking *LC*  
Rys. 8. Funkcja przynależności dla spękań podłużnych *LC*

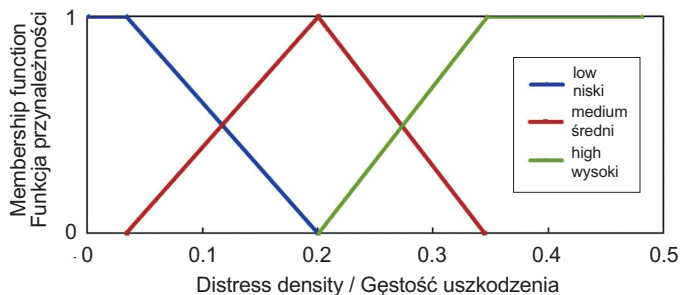


Fig. 9. Membership function of rutting distress *RD*  
Rys. 9. Funkcja przynależności dla głębokości koleiny *RD*

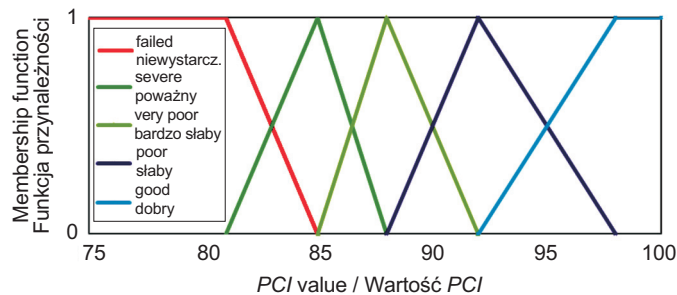


Fig. 10. Membership function of pavement condition index *PCI*  
Rys. 10. Funkcja przynależności dla wskaźnika stanu nawierzchni *PCI*

### 5.4.3. Reguły rozmyte

Działanie systemu wnioskowania rozmytego oparte jest na bazie reguł logicznych typu *if-then*. Część *if* reguły zwana jest poprzednikiem, zaś część *then* – następnikiem. W wielowymiarowym modelu rozmytym wygenerowanie wszystkich możliwych reguł jest bardzo złożonym zadaniem. W przedstawionym badaniu wygenerowano reguły z zastosowaniem metody, którą zaproponowali Wang i Mendel [23]. Metoda generuje reguły na podstawie porównania predefiniowanych wejść i wyjść parami. Kombinacje o najwyższym stopniu dopasowania uznaje się za reguły logiki rozmytej. Reguły wygenerowane dla proponowanego systemu wnioskowania rozmytego przedstawiono w Tabl. 4.

Oprogramowanie generuje podgląd reguł umożliwiając interpretację systemu wnioskowania rozmytego. Podgląd reguł ilustruje wpływ funkcji przynależności na ostateczne wyniki. Może on również umożliwić szczegółowy wgląd w działanie systemu. W przykładzie przedstawionym na Rys. 11 widać, że dla danych wartości gęstości *FC* (6,8%), gęstości *EC* (4,7%), gęstości *BC* (1,26%), gęstości *LC* (12,071%), gęstości *TC* (2,369%) oraz gęstości *RD* (0,221%) wynikowa wartość *PCI* wyniosła 80,87.

### 5.4.3. Fuzzy rules

In the proposed fuzzy inference system, the working principle is based on if-then fuzzy rules. The if part in the fuzzy rule is known as the antecedent and the then part is called the consequent. In a multidimensional fuzzy model, the generation of all the possible rules is a very complex task. In the present study, the rules were generated using the method suggested by Wang and Mendel [23]. The method generates the rules from the pair-wise comparison of predefined inputs and outputs. The highest degrees of matching among the pairs are considered fuzzy rules. The generated rules for the presented FIS are shown in Table 4.

The rule viewer is generated to interpret the fuzzy inference system. The rule viewer illustrates the impact of membership functions on the overall outcome. It can also present a detailed view of the fuzzy inference system. For example, in Fig. 11 it can be seen that for the given values of *FC* density (6.8%), *EC* density (4.7%), *BC* density (1.26%), *LC* density (12.071%), *TC* density (2.369%), and *RD* density (0.221%), the corresponding output value of *PCI* is 80.87.

Table 4. Generated fuzzy rules for the model  
 Tablica 4. Wygenerowane reguły logiki rozmytej

Rule Reguła	if <i>FC</i> jeżeli <i>FC</i>	and <i>EC</i> oraz <i>EC</i>	and <i>BC</i> oraz <i>BC</i>	and <i>LC</i> oraz <i>LC</i>	and <i>TC</i> oraz <i>TC</i>	and <i>RD</i> oraz <i>RD</i>	then <i>PCI</i> to <i>PCI</i>
1	high / wysokie	high / wysokie	high / wysokie	high / wysokie	high / wysokie	high / wysokie	failed / niewystarczający
2	high / wysokie	high / wysokie	high / wysokie	medium / średnie	high / wysokie	high / wysokie	failed / niewystarczający
3	high / wysokie	medium / średnie	high / wysokie	medium / średnie	medium / średnie	high / wysokie	failed / niewystarczający
4	high / wysokie	medium / średnie	medium / średnie	medium / średnie	medium / średnie	high / wysokie	failed / niewystarczający
5	high / wysokie	low / niskie	medium / średnie	medium / średnie	medium / średnie	high / wysokie	failed / niewystarczający
6	high / wysokie	low / niskie	low / niskie	medium / średnie	medium / średnie	high / wysokie	severe / poważny
7	medium / średnie	low / niskie	low / niskie	medium / średnie	medium / średnie	high / wysokie	severe / poważny
8	medium / średnie	low / niskie	low / niskie	medium / średnie	low / niskie	high / wysokie	severe / poważny
9	medium / średnie	low / niskie	low / niskie	medium / średnie	low / niskie	medium / średnie	severe / poważny
10	low / niskie	low / niskie	low / niskie	medium / średnie	low / niskie	medium / średnie	severe / poważny
11	low / niskie	low / niskie	low / niskie	low / niskie	low / niskie	medium / średnie	very poor / bardzo słaby
12	low / niskie	low / niskie	low / niskie	low / niskie	low / niskie	low / niskie	good / dobry

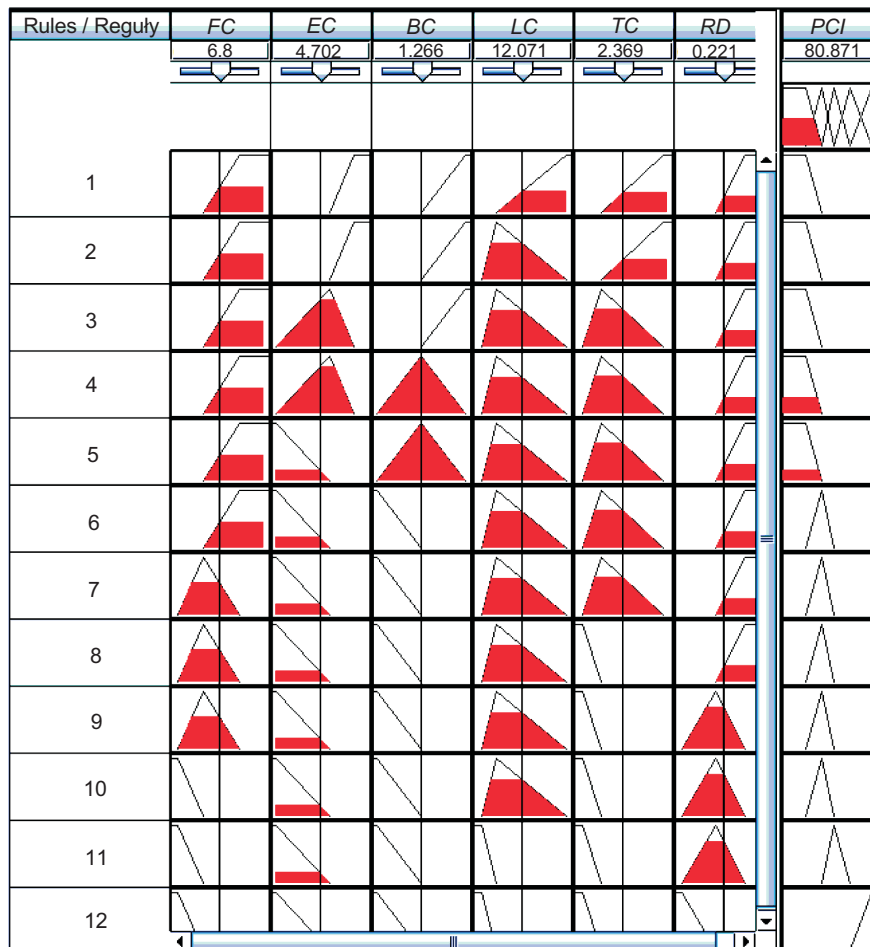


Fig. 11. Rule viewer of the fuzzy rehabilitation needs assessment model (FISPro software)

Rys. 11. Podgląd reguł modelu oceny zapotrzebowania na remont nawierzchni (oprogramowanie FISPro)

#### 5.4.4. Wyniki i dyskusja

Po zdefiniowaniu funkcji przynależności oraz sformułowaniu reguł rozmytych poddano weryfikacji działanie systemu w ramach oceny zapotrzebowania na prace naprawcze. Rys. 12 przedstawia wykres zaobserwowanych wartości *PCI* w zestawieniu z wartościami *PCI* określonymi przez proponowany system. Z wykresu wynika, że korelacja między tymi wartościami jest wysoka ( $R^2 = 0,921$ ). Ponadto dokładność opracowanego systemu wnioskowania rozmytego można ocenić na podstawie wartości błędów: pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE), średniego błędu bezwzględnego (MAE) oraz błędu maksymalnego (ME). *RMSE*, *MAE* i *ME* mogą przyjmować wartości od 0 do  $\infty$ . Model uznawany jest za lepszy, gdy wartości tych parametrów są niższe. Uzyskane wartości *RMSE*, *MAE* oraz *ME* opracowanego systemu wynoszą odpowiednio 2,24, 1,541 oraz 5,2, co oznacza, że system jest stosunkowo dokładny. Błędy dla różnych kategorii *PCI* przedstawione są na Rys. 13. Można zaobserwować, że błędy (*RMSE*, *MAE*, i *ME*) są szczególnie małe w kategoriach stanu: „niewystarczający” i „dobry”. Zmiany wartości *PCI* w przedstawionym systemie wnioskowania rozmytego odpowiadające poszczególnym rodzajom uszkodzeń przedstawiono na Rys. 14. Na Rys. 15 przedstawiono liczbę odcinków nawierzchni przypadających na różne kategorie gęstości uszkodzeń dla poszczególnych rodzajów uszkodzeń. Liczba odcinków nawierzchni w różnych grupach *PCI* pokazana jest na Rys. 16. Dane dotyczące wskaźnika *PCI* oszacowanego przez przedstawiony system wnioskowania rozmytego pokazują, że znaczna liczba odcinków nawierzchni charakteryzowała się wartością *PCI* między 85 a 95.

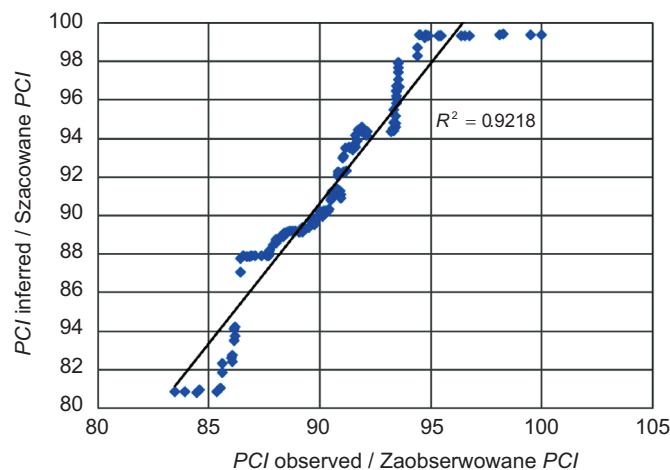


Fig. 12. Plot of the inferred *PCI* values vs the observed *PCI* values

Rys. 12. Zestawienie wartości *PCI* oszacowanych przez model z zaobserwowanymi wartościami *PCI*

#### 5.4.4. Results and discussion

The performance of the fuzzy system for the pavement rehabilitation needs assessment was verified once the membership functions had been defined and fuzzy rules had been formulated. Fig. 12 shows the plot of the observed *PCI* versus the *PCI* obtained from the present FIS. From the plot it can be inferred that the two values are highly correlated ( $R^2 = 0.921$ ). Furthermore, the accuracy of the developed FIS can be checked based on the error values, namely RMSE (root mean square error), MAE (mean absolute error), and the maximum error (ME). The *RMSE*, *MAE*, and *ME* values can range from 0 to  $\infty$ . The model is regarded better with lower values of the *RMSE*, *MAE*, and *ME* parameters. The *RMSE*, *MAE*, and *ME* values of the developed FIS are 2.24, 1.541, and 5.2, respectively, indicating that the system is reasonably accurate. The error for different *PCI* categories is shown in Fig. 13. It is observed that the errors (*RMSE*, *MAE*, and *ME*) are particularly low in the “failed” and “good” categories. The variations in the *PCI* value for the present fuzzy inference system specific to individual modes of distress are illustrated in Fig. 14. Fig. 15 shows the number of pavement sections in specific distress density categories for particular types of distress. The number of pavement sections in different *PCI* groups is shown in Fig. 16. The data regarding the *PCI* class, as estimated using the proposed FIS, show that a high number of pavement sections lies in the *PCI* range from 85 to 95.

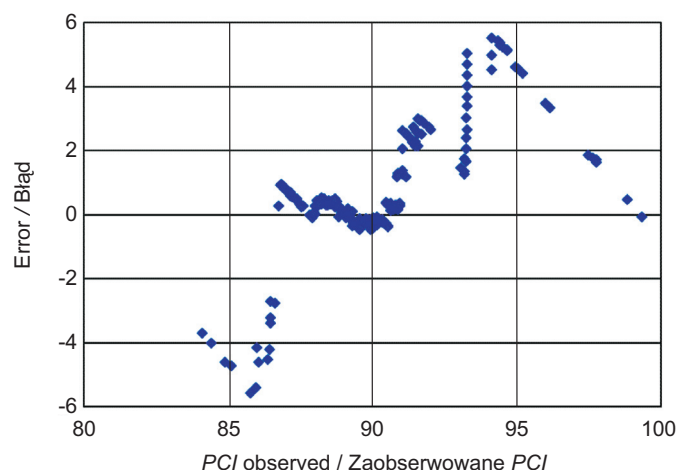


Fig. 13. Plot showing the observed error of the present fuzzy model

Rys. 13. Wykres błędu zaobserwowanego w rozpatrywanym modelu wnioskowania rozmytego

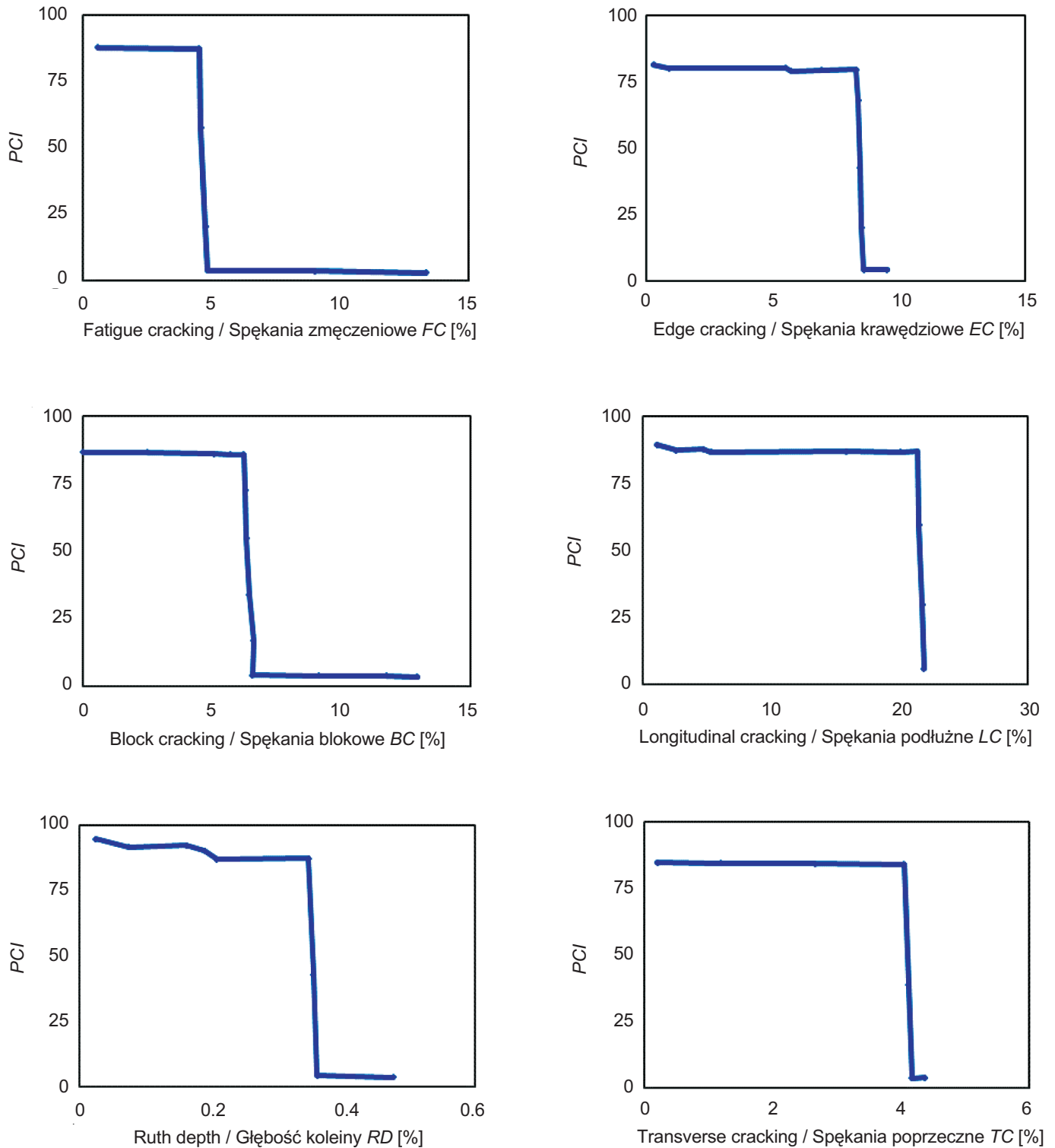


Fig. 14. Response of the fuzzy inference system concerning individual distresses

Rys. 14. Odpowiedź systemu wnioskowania rozmytego na zmiany gęstości poszczególnych uszkodzeń

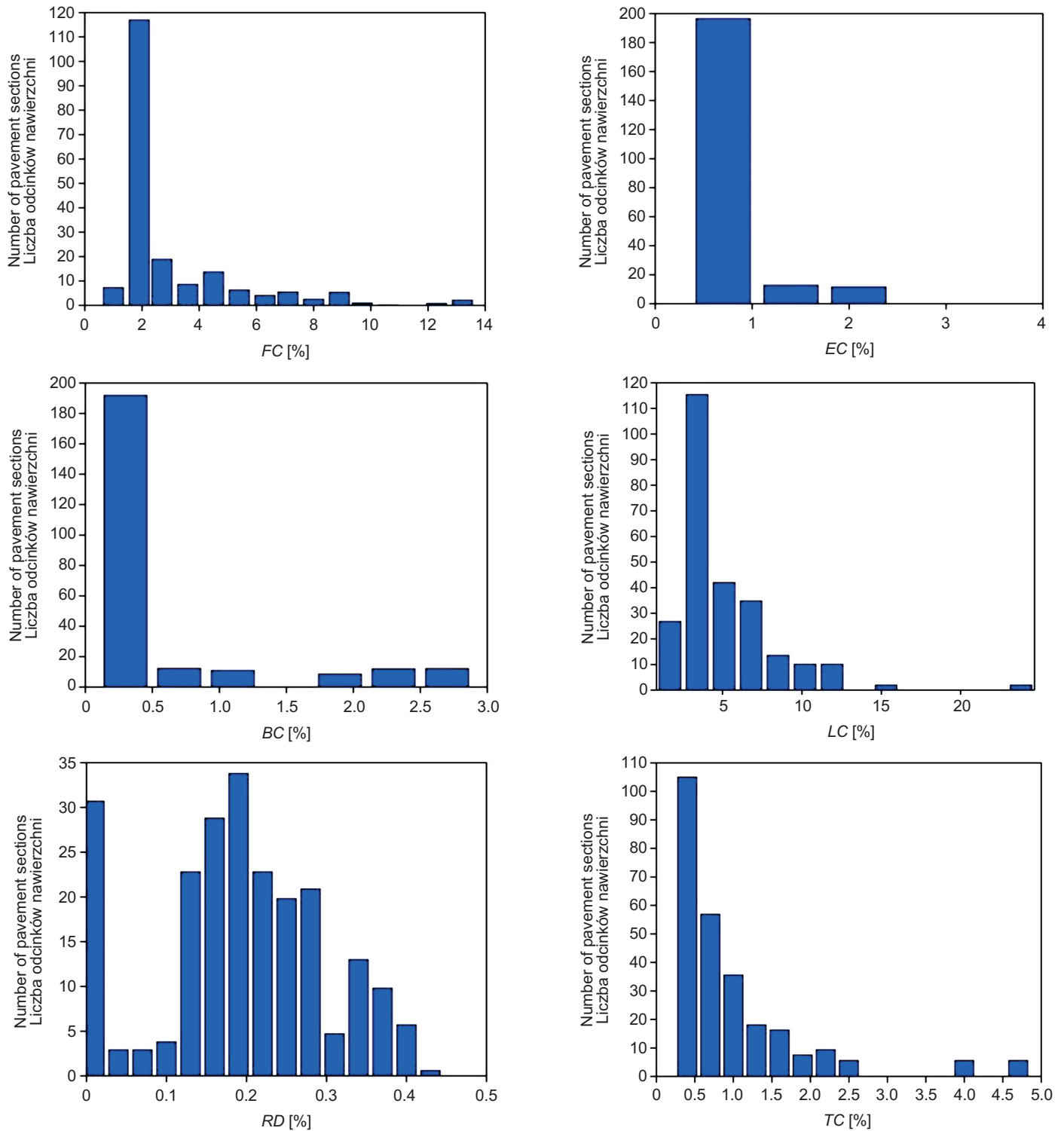


Fig. 15. Number of pavement sections in different categories of distress density

Rys. 15. Liczba odcinków nawierzchni charakteryzujących się wartościami z danych grup gęstości uszkodzeń

## 6. WNIOSKI

W artykule sformułowano podejście do oceny stanu nawierzchni podatnych oparte na poziomie spękań i głębokości kolein. Podejście to, opracowane z użyciem teorii logiki rozmytej, może uprościć proces decyzyjny dotyczący remontów nawierzchni. Aby określić w proponowanym systemie wnioskowania rozmytego zależności przyczynowo-skutkowe między uszkodzeniami a stanem nawierzchni, wygenerowano bazę reguł *if-then*. Sformułowane reguły mogą zapewnić ocenę stanu istniejącej nawierzchni, uwzględniając różne stopnie szkodliwości i zasięg spękań oraz kolein. Oszacowana w ten sposób wartość wskaźnika *PCI* stanowi miarę bieżącego stanu nawierzchni. Wartości parametrów *RMSE* i *MAE* przedstawionego modelu wskazują, iż oszacowana wartość *PCI* jest wysoce skorelowana z obserwowaną wartością *PCI*. Poważnie uszkodzone odcinki nawierzchni mogą zostać zidentyfikowane na podstawie oszacowanej wartości *PCI* i w razie konieczności poddane odpowiednim zabiegom remontowym przez zarządcę drogi. Przedstawiony system wnioskowania rozmytego pozwala na uniknięcie ograniczeń modeli opartych na złożonych wskaźnikach przydatności eksploatacyjnej, które w niektórych sytuacjach okazują się nieskuteczne w rozpoznaniu uszkodzonych strukturalnie odcinków nawierzchni wymagających remontu.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] AASHTO Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993
- [2] ASTM D6433-18 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International, West Conshohocken, 2018, DOI: 10.1520/D6433-18
- [3] ASTM E1926-08 Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements. ASTM International, West Conshohocken, 2015, DOI: 10.1520/E1926-08R15
- [4] IRC SP-16 Guidelines on measuring road roughness and norms, 2<sup>nd</sup> Revision. Indian Roads Congress, New Delhi, 2019
- [5] Maintenance guidebook for road pavements. Japan Road Association, Tokyo, 2017
- [6] Abaza K.A.: Optimum flexible pavement life-cycle analysis model. Journal of Transportation Engineering, **128**, 6, 2002, 542-549, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(542)
- [7] Fwa T.F., Sinha K.C.: Pavement performance and life-cycle cost analysis. Journal of Transportation Engineering, **117**, 1, 1991, 33-46, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1991)117:1(33)

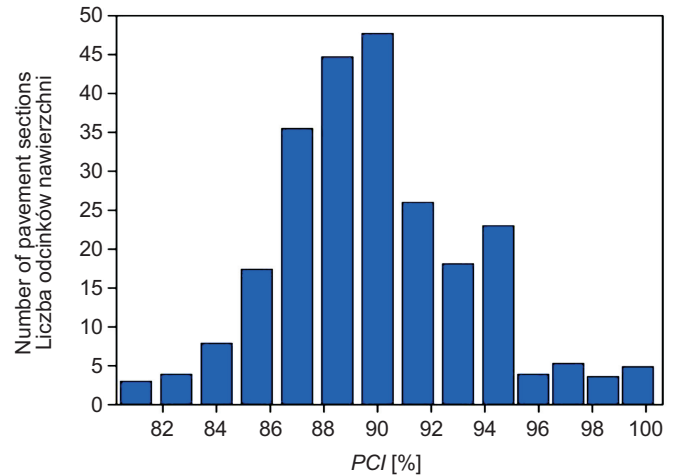


Fig. 16. Number of pavement sections in different categories of pavement condition index *PCI*

Rys. 16. Liczba odcinków nawierzchni charakteryzujących się wartościami z danych grup wskaźnika stanu nawierzchni *PCI*

## 6. CONCLUSIONS

In this study, an approach was formulated to evaluate the condition of flexible pavements based on cracking and rutting distress. The approach was developed using fuzzy logic theory and can facilitate decision-making process concerning rehabilitation of pavements. The if-then rules were generated to find the cause-effect relationship of the distresses in the proposed fuzzy inference system. The generated fuzzy rules can assess the existing pavement condition by taking into account different levels of severity and extent of cracking and rutting. The *PCI* value estimated by the approach is an indication of the current pavement condition. The values of the *RMSE* and *MAE* parameters of the present model suggest that the estimated *PCI* value is highly correlated to the observed *PCI* value. Based on the estimated *PCI* value, severely damaged pavement sections can be identified and appropriate rehabilitation activities can be employed by the highway agencies if required. The proposed fuzzy model seems to mitigate the limitations of the serviceability index approach, which is at times inadequate in terms of identification of structurally failed pavement sections in need of rehabilitation.

- [8] NCHRP Report No. 1-37A, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated flexible pavement structures. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, 2004
- [9] *France-Mensah J., O'Brien W.J.*: Budget allocation models for pavement maintenance and rehabilitation: Comparative case study. *Journal of Management in Engineering*, **34**, 2, 2018, 05018002, DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000599
- [10] *Gao L., Xie C., Zhang Z., Waller S.T.*: Network level road pavement maintenance and rehabilitation scheduling for optimal performance improvement and budget utilization. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **27**, 4, 2012, 278-287, DOI: 10.1111/j.1467-8667.2011.00733.x
- [11] Pavement design manual. Arizona Department of Transportation, Roadway Engineering Group, Pavement Design Section, Phoenix, 2017
- [12] *Huang Y.H.*: Pavement analysis and design, 2<sup>nd</sup> Edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2008
- [13] *Haas R., Hudson W.R.*: Pavement asset management. John Wiley & Sons, Hoboken, 2015
- [14] Pavement design manual. Georgia Department of Transportation, Atlanta, 2005
- [15] *Li Y., Madanat S.*: A steady-state solution for the optimal pavement resurfacing problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **36**, 6, 2002, 525-535, DOI: 10.1016/S0965-8564(01)00020-9
- [16] *Gogoi R.*: Optimal rehabilitation strategy for asphalt pavements, Thesis (Ph.D.). Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, 2018
- [17] *Ross T.J.*: Fuzzy logic with engineering applications, 3<sup>rd</sup> Edition. John Wiley & Sons, Hoboken, 2011
- [18] *Sun L., Gu W.*: Pavement condition assessment using fuzzy logic theory and analytic hierarchy process. *Journal of Transportation Engineering*, **137**, 9, 2011, 648-655, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000239
- [19] *Gogoi R., Dutta B.*: Maintenance prioritization of interlocking concrete block pavement using fuzzy logic. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **13**, 2, 2020, 168-175, DOI: 10.1007/s42947-019-0098-9
- [20] Federal Highway Administration: Long Term Pavement Performance (LTPP) program, data retrieved from LTPP InfoPave, <https://infopave.fhwa.dot.gov>, 2019
- [21] *Shahin M.Y., Kohn S.D.*: Airfield Pavement Performance Prediction and Determination of Rehabilitation Needs, 5<sup>th</sup> International Conference on the Design of Asphalt Pavements, ISAP, Delft, 1982, 05044
- [22] *Ibraheem A.T.*: Modeling the methods of flexible pavements maintenance. *Journal of Transportation Engineering*, **140**, 3, 2014, 04013014, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000479
- [23] *Wang L.X., Mendel J.M.*: Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **22**, 6, 1992, 1414-1427, DOI: 10.1109/21.199466
- [24] *Guillaume S., Charnomordic B., Lablée J.L.*: FisPro: An open source portable software for fuzzy inference systems, 2021, <https://www.fispro.org/download/documentation/fispro-inline.pdf> (20.08.2021)
- [25] *Chiu S.L.*: Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent & fuzzy systems*, **2**, 3, 1994, 267-278, DOI: 10.3233/IFS-1994-2306