



SALVATORE CAFISO<sup>1)</sup>  
 CARMELO D'AGOSTINO<sup>2)</sup>  
 MARIUSZ KIEĆ<sup>3)</sup>  
 GIUSEPPINA PAPPALARDO<sup>4)</sup>

## SURROGATE MEASURE OF SAFETY FROM ROAD INSPECTION DATA - EXPERIMENTAL TEST ON POLISH ROADS

### WYKORZYSTANIE DANYCH Z KONTROLI BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO JAKO POŚREDNIEJ MIARY BEZPIECZEŃSTWA - BADANIA NA POLSKICH DROGACH

**STRESZCZENIE.** Dyrektywa Europejska 2008/96/WE w sprawie zarządzania bezpieczeństwem infrastruktury drogowej kładzie duży nacisk na kontrolę stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego *SI* jako narzędzia do zarządzania bezpieczeństwem istniejącej infrastruktury drogowej. W tym kontekście rozwój pośrednich miar bezpieczeństwa ruchu na podstawie danych gromadzonych podczas kontroli bezpieczeństwa może stanowić źródło informacji do oceny ryzyka w ruchu drogowym. Wyniki kontroli bezpieczeństwa mogą również stanowić źródło informacji dla administracji drogowej do optymalizacji wyboru stosowanych środków poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego, a także wskazywania odcinków wymagających interwencji. W tym celu wprowadzony został wskaźnik ryzyka *RI*, jako pośrednia miara bezpieczeństwa ruchu drogowego dla lokalnych dróg zamiejskich jednojezdniowych dwupasowych, który został opracowany we Włoszech w wyniku projektu badawczego finansowanego przez Unię Europejską w 2004 r. Stworzona metoda została dostosowana do nowych polskich wytycznych dotyczących kontroli bezpieczeństwa, a następnie skalibrowana z uwzględnieniem danych o wypadkach na drogach wojewódzkich, województwa małopolskiego w Polsce. Opisane w artykule badania przeprowadzone na odcinku około 100 km jednojezdniowych dwupasowych dróg zamiejskich w Polsce wskazują na występowanie zależności pomiędzy wskaźnikiem ryzyka *RI*, a częstością wypadków.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza skupień, bezpieczeństwo ruchu drogowego, Dyrektywa Europejska, kontrola stanu bezpieczeństwa, pośrednia miara bezpieczeństwa ruchu, SPF.

**ABSTRACT.** The European Directive 2008/96/CE on Road Infrastructures Safety Management gives great emphasis to road Safety Inspections *SI* as tool for safety management of existing roads. In this framework, development of surrogate measures of safety derived from data collected during safety inspections can provide a source of information for risk assessment. Furthermore, *SIs* derived information seems to be promising for road Agencies as a tool to prioritize measures and sections to treat. As a result of a research project funded by the European Union in 2004 and successful application in Italy, a Risk Index *RI* was developed and available as surrogate measure of safety for local two-lane rural roads. The procedure was adapted to the new Polish guideline for safety inspection and re-calibrated on the local crash type distribution. Experimental application on about 100 km of Polish two lane rural road shows a promising correlation between the *RI* and the crash frequency.

**KEYWORDS:** cluster analysis, European Directive, risk index, safety inspection, safety performance function, surrogate measures of safety.

DOI: 10.7409/rabdim.017.008

<sup>1)</sup> University of Catania, Department of Civil Engineering and Architecture, Piazza Università, 2 - 95131 Catania, Italy; dcafiso@dica.unict.it

<sup>2)</sup> University of Catania, Department of Civil Engineering and Architecture, Catania, Italy; carmelo.dagostino@dica.unict.it

<sup>3)</sup> Cracow University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Warszawska 24, 31-155 Kraków; mkiec@pk.edu.pl (✉)

<sup>4)</sup> University of Catania, Department of Civil Engineering and Architecture, Catania, Italy; giusy.pap@dica.unict.it

## 1. WPROWADZENIE

Dyrektywa europejska 2008/96/WE [1] zobowiązała państwa członkowskie do ustanowienia i wdrożenia procedur dotyczących m.in.: oceny wpływu na bezpieczeństwo ruchu drogowego, audytu bezpieczeństwa ruchu drogowego, zarządzania bezpieczeństwem sieci drogowej inspekcjami bezpieczeństwa oraz kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego. W dyrektywie przywiązano dużą wagę do kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego (*SI*), jako skutecznego narzędzia do zarządzania bezpieczeństwem istniejących dróg, stwierdzając że: „Po odpowiednim oznakowaniu odcinków dróg o dużej koncentracji wypadków i wprowadzeniu środków zaradczych należy położyć większy nacisk na kontrole bezpieczeństwa jako środki zapobiegawcze. Regularnie przeprowadzane kontrole są podstawowym narzędziem zapobiegania zagrożeniom dla użytkowników dróg, w tym użytkowników niechronionych...”. Zgodnie z artykułem 6 „Kontrola bezpieczeństwa” stwierdzono również, że państwa członkowskie przeprowadzają kontrole bezpieczeństwa na istniejących drogach w celu określenia cech związanych z bezpieczeństwem ruchu drogowego i zapobiegania wypadkom. Kontrole powinny być przeprowadzane okresowo i przez właściwy podmiot. Zachęca się również państwa członkowskie UE do stosowania tej dyrektywy w odniesieniu do innych dróg krajowych, które nie należą do Trans-europejskiej Sieci Drogowej. Drogi zamiejskie jednojezdniowe dwupasowe – czyli odcinki dróg analizowane w opisanych badaniach – stanowią podstawową część krajowej i regionalnej sieci drogowej w Polsce, która obsługuje ruch tranzytowy i lokalny. Wykorzystanie *SI* jest jednym z działań mających na celu poprawę bezpieczeństwa ruchu w Europie, na podstawie oceny zagrożeń dla istniejących elementów infrastruktury drogowej. *SI* mogą być źródłem danych do wyboru środków poprawy bezpieczeństwa ruchu na odcinkach dróg o największym potencjale redukcji wypadków i/lub najwyższym stosunku korzyści do kosztów. Niestety, wprowadzona instrukcja prowadzenia kontroli stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce [2] nie pozwala na ilościowe oceny zagrożeń wynikających z przeprowadzonych kontroli. Taka możliwość została wprowadzona w opracowanej we Włoszech instrukcji, opisanej w „Identification of Hazard Locations and Ranking of Measures to Improve Safety on Local Rural Roads” (*IASP*) [3], która w połączeniu ze wskaźnikiem ryzyka *RI* [4-7] służy do predykcji częstości i ciężkości wypadków na podstawie wyników kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego.

W celu opisu powyższego problemu artykuł został podzielony na cztery części przedstawiające:

## 1. INTRODUCTION

The European Directive 2008/96/CE [1] requires member states to establish and implement procedures related to road safety impact assessments, road safety audits, the management of road network safety and safety inspections. In the Directive, great emphasis was given to road Safety Inspections (*SIs*) as an effective tool for the safety management of existing roads stating: “Once road sections with a high accident concentration have been treated and remedial measures have been taken, safety inspections as a preventive measure should assume a more important role. Regular inspections are an essential tool for preventing possible dangers for all road users, including vulnerable users”. Within the Article 6 “Safety Inspections” it is, also, recognized that member states shall carry out safety inspections on existing roads in order to identify the road safety related features and to prevent collisions. These inspections should be performed periodically and by a competent entity. Member states are also encouraged to apply this directive on other national roads, which are not part of the Trans - European Road Network. Two-lane rural roads – that is, the class of highways investigated in this study – are the main part of the national and regional road network in Poland that provides through and local traffic. The use of *SIs* is one of the measures to improve traffic safety in Europe associated with the assessment of the hazards for the existing elements of road infrastructure. *SIs* can be a source of information to prioritize treatments in road sections producing the highest accident reduction potential and/or the highest safety' benefit-cost ratio. Unfortunately, a guideline for carrying out road safety inspections [2], implemented in Poland, does not allow quantifying hazards resulting from conducted *SIs*. Such possibility is introduced in a method developed in Italy “Identification of Hazard Locations and Ranking of Measures to Improve Safety on Local Rural Roads” (*IASP*) [3] in conjunction with Risk Index *RI* [4-7] to predict frequency and severity of accidents by using *SIs*.

In order to describe problems mentioned above, this paper is divided into four main sections presenting:

- *IASP* procedure for road safety inspection,
- Hardware and Software tools for field inspection,
- Risk Index *RI* as a surrogate measure of safety and application on two lane regional roads in Poland,
- Statistical correlations between *RI* and the expected crash frequency.

- Procedurę IASP prowadzenia kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego;
- Aparaturę oraz oprogramowanie wykorzystywane do kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego;
- Wskaźnik ryzyka *RI* jako pośredniej miary bezpieczeństwa ruchu i jego zastosowanie na wojewódzkich, jednojezdniowych, dwupasowych drogach zamiejscowych w Polsce;
- Zależność pomiędzy *RI* i oczekiwaną liczbą wypadków.

## 2. OPIS KONTROLI BEZPIECZEŃSTWA RUCHU I PROCEDURY IASP

Kontrola bezpieczeństwa ruchu drogowego SI jest oceną potencjalnych zagrożeń i stanu bezpieczeństwa ruchu dla istniejącej drogi przez niezależny i wykwalifikowany zespół inspektorów. SI są uznawane za skuteczne narzędzie do identyfikowania potencjalnych zagrożeń bezpieczeństwa i stosowane są w praktyce przez wielu zarządców dróg na całym świecie. Kontrole bezpieczeństwa uważane są za część narzędzi do zarządzania bezpieczeństwem sieci drogowej wg Dyrektywy Europejskiej 2008/96/WE. W zależności od złożoności prac kontrola może być prowadzona przez jednego inspektora lub grupę kilku inspektorów. Inspektorzy powinni być niezależni, tzn. nie powinni należeć do zespołu, który zaprojektował, zbudował lub utrzymuje drogę.

W procesie SI wyróżnia się cztery kroki:

- Krok 1: Prace przygotowawcze;
- Krok 2: Przeprowadzenie SI w terenie;
- Krok 3: Przygotowanie raportu z kontroli bezpieczeństwa;
- Krok 4: Wskazanie środków poprawy bezpieczeństwa i ich wdrożenie.

W celu uzyskania wiarygodnej kontroli bezpieczeństwa, należy ją prowadzić samochodem, a w skomplikowanych przypadkach pieszo. Przejazdy kontrolowanych odcinków powinny być wykonywane wielokrotnie wraz z dokumentacją zdjęciową dla miejsc specyficznych z uwagi na bezpieczeństwo ruchu. W trakcie inspekcji należy stosować i wypełniać listy kontrolne. Stosowane są różne listy kontrolne, a proces kontroli bezpieczeństwa może obejmować krótkie odcinki drogi z powtarzającymi się listami kontrolnymi lub dłuższe odcinki wzdłuż całej drogi przy użyciu jednej z list kontrolnych. Wybrana długość odcinka, na którym prowadzona jest kontrola bezpieczeństwa zależy od złożoności problemów na drodze. Listy kontrolne są dość szczegółowe,

## 2. BACKGROUND OF SIs AND IASP PROCEDURE

A safety inspection SI is a formal examination of an existing road, in which an independent, qualified team reports on the road's crash potential and safety performance. Safety inspections are recognized as an effective tool for identifying potential hazards and are becoming an accepted practice in many agencies around the world. SIs are considered as part of the network safety management in The European Directive 2008/96/CE. Depending on the complexity of the work, an inspection may be done by a single inspector or by a group of inspectors. Members of the group should be "independent", i.e. not part of the team that designed and built the road or maintains the road.

There are four steps in the SI process:

- Step 1: Preparatory work in the office;
- Step 2: On site field study;
- Step 3: SI report;
- Step 4: Remedial measures and follow up.

For a reliable inspection report the inspection should be made both by car and on foot where needed. The road should be driven a number of times if possible and photographs taken of specific issues. During the inspection, checklists should be used and completed. Different checklists are required and the process can involve small sections of the road with repeated checklists or several runs along the whole road using a single checklist. The length chosen depends on the complexity of the road. The checklists are quite detailed and consequently there should be a systematic collection of the deficiencies that were found. Due to subjective nature of the process, it may give rise to inconsistencies which limit inspections effectiveness, but the research presented in the paper shows that well defined operative procedures and methodologies for identifying safety problems can improve both the effectiveness and the reliability of the safety inspections.

The IASP procedure [3] was funded by European Commission (DG TREN) and Province of Catania (Italy) with the scientific coordination and operative support of the University of Catania. As part of the project, safety inspections procedures, which address rural two-lane highways, have been defined. Albeit many safety inspection procedures already exist, the IASP procedures present some innovative elements and, above all, they are very operational in nature. The IASP safety inspection can cover

a zatem kontrole należy prowadzić systematycznie w celu identyfikacji defektów w infrastrukturze. Subiektywny charakter kontroli bezpieczeństwa może prowadzić do niejednorodności oceny, która ogranicza jej skuteczność. Przedstawione w artykule badania wskazują, że dobrze określone procedury prowadzenia kontroli oraz metody identyfikacji problemów bezpieczeństwa mogą poprawić zarówno efektywność, jak i wiarygodność inspekcji bezpieczeństwa.

Procedura opisana w IASP [3], która została sfinansowana przez Komisję Europejską (DG TREN) i region Katania (Włochy), była koordynowana pod względem naukowym i organizacyjnym przez Uniwersytet w Katanii. W ramach projektu zostały określone procedury kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego dla zamiejskich jednojezdniowych dróg dwupasowych. Pomimo tego, że istnieje wiele procedur kontroli bezpieczeństwa wprowadzonych w różnych krajach, procedura IASP zawiera pewne innowacyjne elementy, a przede wszystkim jest bardzo funkcjonalna. Kontrola bezpieczeństwa w ramach procedury IASP zapewnia wykonanie oceny około 30 km drogi w ciągu jednego dnia. Do tego celu niezbędny jest trzy osobowy zespół składający się z: kierowcy, inspektora na przednim siedzeniu i inspektora na tylnym siedzeniu. Zalecany wyposażeniem inspektorów są: odbiorniki GPS, cyfrowa kamera i listy kontrolne. Kontrola bezpieczeństwa prowadzona jest w dwóch kierunkach z bardzo niską prędkością (około 30 km/h).

Listy kontrolne stosowane są w celu ograniczenia możliwości pominięcia istotnych problemów związanych z bezpieczeństwem ruchu drogowego. Stanowią one podpovedzi dla inspektorów w zakresie występujących problemów, a nie mogą zastępować ich wiedzy i doświadczenia, tzn. listy kontrolne powinny pomagać w wykorzystaniu doświadczenia inżynierskiego w zakresie oceny bezpieczeństwa ruchu. Listy kontrolne w procedurze IASP są bardzo syntetyczne [3], ponieważ odnoszą się jedynie do głównych cech bezpieczeństwa ruchu, które zwykle występują na drogach zamiejskich jednojezdniowych dwupasowych. Dodatkowo na listach kontrolnych znalazły się te charakterystyki drogi i jej otoczenia, które można łatwo zidentyfikować w trakcie kontroli bezpieczeństwa. Nie uwzględnia się cech, które dotyczą trasy i niwelety drogi (geometria trasy drogi, jednorodność projektowa drogi, itp.) ponieważ w procedurze IASP wprowadzona została ich oddzielna ocena ilościowa.

Listy kontrolne wypełniane są w obu kierunkach jazdy poprzez zaznaczenie pól w formularzu dla każdego odcinka o długości 200 m (w czasie 24 s przy prędkości 30 km/h), przez inspektorów siedzących na przednim i tylnym fotelu, którzy mają różne listy kontrole ze względu na różne widoki drogi. W celu uproszczenia pracy inspektorów, każda lista

in one day about 30 km of road. At least three operators are needed: the driver, the inspector in front seat and the inspector in back seat. Recommended equipment are GPS receiver, digital video camera and checklists. The road is ran in both directions at very low speed (about 30 km/h).

Checklists are aimed at ensuring that important safety problems are not overlooked. Checklists are a prompt and not a substitute for knowledge and experience, that is, checklists should aid using safety engineering experience and judgment. IASP checklists are very synthetic [3], since they relate only to the main safety features which usually are present along two lane rural roads. Moreover, only features which are easily detectable during inspections have been inserted. Features which concern horizontal and vertical alignment (geometric alignment, design consistency, etc.) are not considered since in the IASP safety analysis alignment evaluation is performed as a separate quantitative procedure.

Checklists must be filled in both directions. Front seat and back seat inspectors, which have different views of the road, compile different checklists filling the boxes with a step of 200 m (24 s at 30 km/h). In order to simplify the inspectors' task, any checklist is split in two parts: part A has to be compiled on site, part B can be compiled both on site and during the video examination performed in the office. Safety issues are ranked as:

- high level problem (rank 2),
- low level problem (rank 1),
- no problem (rank 0).

Ranking of safety issues can be used both as an aid for the prioritization of the safety measures and as an aid to road agencies in measuring the effectiveness over time of their safety improvement programs. After the preliminary inspection, in the office, the team analyzes videos and (if it wasn't done on site) complete part B of the checklists. Checklists are compiled in both directions referring in particular to the right side. By brainstorming among the team members' checklist results are examined and the final version of the checklists is edited.

The IASP manual [3] suggests for each problem the recommendation typologies. Recommendations are engineering solutions to the reported problems. They indicate the type of measures, without specifying detailed technical issues. Problems and recommendations are disaggregated in order to highlight the safety issues of each road feature, but road safety improvement requires an integrated approach where interaction among different measures must be taken into account. As final result of the meeting,

kontrolna jest podzielona na dwie części: część A musi zostać wypełniona na miejscu, część B może być wypełniona zarówno na miejscu, jak i podczas analizy obrazu przeprowadzonej poza drogą. Problemy bezpieczeństwa klasyfikowane są jako:

- wysokie (ocena 2),
- niskie (ocena 1),
- brak (ocena 0).

Klasyfikacja problemów bezpieczeństwa może być wykorzystana jako pomoc dla zarządców dróg przy ustalaniu kolejności i sposobu stosowania środków poprawy bezpieczeństwa ruchu, jak również w ocenie skuteczności programów poprawy bezpieczeństwa. Po wstępnej kontroli w terenie, inspektorzy analizują nagrane filmy w biurze oraz uzupełniają część B listy kontrolnej, jeśli nie zostało to zrobione w trakcie kontroli na drodze. Listy kontrolne są zestawiane dla obu kierunków jazdy w odniesieniu do prawej krawędzi drogi. Na podstawie konsultacji pomiędzy inspektorami weryfikowane są wyniki kontroli bezpieczeństwa ruchu i przygotowywana jest ostateczna lista problemów wraz z ich klasyfikacją.

Instrukcja IASP [3] wskazuje dla każdego z identyfikowanych problemów bezpieczeństwa rekomendowane inżynierskie środki jego poprawy, które przedstawione są bez określania szczegółowych kwestii technicznych. Problemy bezpieczeństwa i zalecane działania przedstawiane są oddzielnie w celu podkreślenia kwestii bezpieczeństwa każdej z analizowanych cech drogi. Ponieważ poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego wymaga zintegrowanego podejścia, dlatego należy uwzględnić interakcje między różnymi środkami jego poprawy. Jako efekt końcowy przeprowadzonej kontroli bezpieczeństwa redagowany jest wstępny raport opisujący podstawowe problemy bezpieczeństwa ruchu i zalecenia jego poprawy. W trakcie prac identyfikowane są również miejsca, które wymagają przeprowadzenia kontroli szczegółowej.

### **3. APARATURA ORAZ OPROGRAMOWANIE WYKORZYSTYWANE DO KONTROLI BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO**

W procedurze IASP inspektorzy oceniają na podstawie obserwacji warunki drogowe, wypełniając dwie różne listy kontrolne. Wymaga to odpowiedniej wiedzy i umiejętności inspektorów. Przedstawiony w artykule innowacyjny system prowadzenia kontroli został opracowany przez Uniwersytet w Katanii [8]. Uwalnia on inspektorów od konieczności sprawdzania lokalizacji na odcinku drogi z wypełnianymi właściwymi listami kontrolnymi. Inspektorzy wypełniają

a preliminary report describing general problems and recommendations is edited. Moreover, some sites requiring specific inspection (site visits) might be identified.

### **3. HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS FOR IN FIELD INSPECTION**

In the IASP procedure inspectors observe and evaluate road conditions, filling two different checklists. This task requires relevant expertise and skills of the inspectors. The innovative system developed by the University of Catania [8] and presented in this paper relieves the operator of the concern to link the position in the road segment to the appropriate checklist. The inspectors fill the checklists touching the screen of the tablet connected via Bluetooth to the GPS. In this way data are easily collected, stored and linked to the road segment stretch where they are taken and synchronized with the video records. The system has the objective to simplify the operator's work but opens up a whole set of issues that the software should solve without user's concern:

1. Allows easy data insertion to the user;
2. Links inspection data with an unique road section travelling the route in both directions;
3. Stores all information to allow the post inspection review.

In order to get an easy and low cost solution, it was decided to create an Android application. By means of an easy-to-use interface the application allows the user to insert inspection data for each section of the road using his/her own tablet. To improve accuracy in vehicle positioning, an external GPS receiver can be connected with Android application running on the tablet. Finally, to associate also images of the road space, frames recorded by a video-camera installed on the vehicle can be geo-referenced and linked to the inspection data through a system of synchronization based on the GPS UTC time used as a metronome for all devices. If the GPS module is the "heart" of the system, the Data Acquisition Module is the "brain". This module uses data from GPS to support the inspector's task via the Graphic User Interface (GUI). The most important part of the infield inspection is the assessment of safety issues and filling of the checklist for each road section of fixed length composing the road segment under investigation.

For each inspection two check-list-forms are available: one for the operator in the front seat and one for the operator in the rear one. The checklist-form may be modified

listy kontrolne, dotykając ekranu tabletu podłączonego przez Bluetooth do urządzenia GPS. W ten sposób dane są łatwo gromadzone, przechowywane i łączone z analizowanymi odcinkami drogi oraz synchronizowane z zapisami wideo. System ma na celu uproszczenie pracy inspektora, dlatego oprogramowanie rozwiązuje bez jego udziału wiele zadań:

1. Umożliwia łatwe wprowadzanie danych;
2. Łączy dane z inspekcji z analizowanymi odcinkami drogi – w przypadku przejazdów w obu kierunkach;
3. Przechowuje wszystkie dane umożliwiając ich przegląd po kontroli w terenie.

Aby uzyskać proste i tanie rozwiązanie, postanowiono stworzyć aplikację na system Android. Za pomocą łatwego w obsłudze interfejsu, aplikacja umożliwia użytkownikowi wstawienie danych z kontroli dla kolejnych analizowanych odcinków drogi przy użyciu tabletu. Ponadto, dla poprawy dokładności pozycjonowania pojazdu stosowany jest zewnętrzny odbiornik GPS, połączony z aplikacją Android. Rejestrowany kamerą zainstalowaną w pojeździe obraz przestrzeni drogowej jest powiązany z danymi z kontroli drogi za pomocą systemu geo-referencyjnego i synchronizacji czasu w oparciu o GPS używany dla wszystkich urządzeń. Moduł GPS jest „sercem” systemu, a moduł zbierania danych jego „mózgiem”. Moduł ten wykorzystuje dane z GPS do wspierania pracy inspektora za pośrednictwem graficznego interfejsu użytkownika (GUI). Najważniejszą częścią kontroli bezpieczeństwa jest ocena problemów z nim związanych i wypełnienie listy kontrolnej dla każdego odcinka drogi o stałej długości, który stanowi część składową analizowanej drogi.

Dla każdej kontroli bezpieczeństwa dostępne są dwie listy pytań kontrolnych: jedna dla operatora na przednim siedzeniu, a druga dla operatora z tyłu. Forma listy kontrolnej może zostać zmodyfikowana przed kontrolą, ponieważ jest zapisywana w postaci pliku XML, który można edytować w dowolnym momencie. W przypadku prowadzenia kontroli bezpieczeństwa dla drogi jednojezdniowej dwupasowej, po przejeździe odcinka w jednym kierunku, inspektor musi przeprowadzić kontrolę w kierunku przeciwnym. W takim przypadku system automatycznie pomaga znaleźć punkt początkowy dla kierunku przeciwnego. Gdy proces zbierania danych zostanie zakończony w obu kierunkach, aplikacja łączy ze sobą dane zgromadzone na podstawie przejazdów w obu kierunkach.

Po zakończeniu kontroli w terenie moduł gromadzenia danych eksportuje wszystkie dane w postaci plików tekstowych, które mogą być czytane i przetwarzane przez moduł analizy danych. Służy on do przeprowadzenia ostatniej części

before the inspection because it is saved in the form of XML file which can be edited at any time. If the inspection is carried out for a two-lane road, after the forward path inspection, the operator must begin a return path inspection in the opposite direction and the system helps to find the starting point of the return path. Once the acquisition procedure is concluded in both directions, the application merges data obtained in the forward path to those obtained in the return path.

At the end of the infield inspection, the Data Acquisition Module exports all data in the form of text files that can be read and processed by the Data Analysis Module. The Data Analysis Module concludes in the office the last part of the inspection process. Once in field data acquisition phase is completed, in the office the Data Analysis Module allows the inspection team to review the checklists and, supported by the video, to fill missed information or to correct errors before drawing the inspection report. In this step, the Module puts together data recorded by the front seat operator and the rear seat operator. The user can investigate every single step of the inspection by moving from sheet to sheet and from time to time with the opportunity of reviewing the corresponding video sequence and, if necessary, modify the values of each checklist.

#### 4. RISK INDEX *RI* AS A SURROGATE MEASURE OF SAFETY AND APPLICATION IN POLAND

The Risk Index *RI* is a surrogate safety measure, which was defined to supplement crash investigation studies in the safety evaluation of two-lane rural roads by using data from SIs and design consistency models [4]. This measure allows to assess relative safety performance of rural road segments. *RI* is a quantitative measure which fills the gap in the use of Safety Inspection that are qualitative in their nature, in road network safety management.

Cafiso et al. [4] formulated the *RI* by combining the main components of risk according to (1):

$$RI = EF \cdot AFF \cdot ASF, \quad (1)$$

where:

- EF* – exposure of road users to road hazards,
- AFF* – probability of a vehicle being involved in a collision,
- ASF* – resulting consequences, in a case of crash occurrence.

procesu kontroli, po zakończeniu etapu pozyskiwania danych w terenie. W pracy biurowej moduł analizy danych umożliwia zespołowi inspektorów przeglądanie list kontrolnych z wykorzystaniem nagrań filmów, w celu uzupełnienia brakujących informacji lub korekty błędów, przed sporządzeniem raportu z kontroli bezpieczeństwa. W tym kroku, moduł analizy danych łączy dane rejestrowane przez inspektorów siedzących na przednim i tylnym fotelu. Użytkownik może analizować każdy krok kontroli, wybierając arkusz lub czas z równoczesną możliwością sprawdzenia odpowiedniego fragmentu filmu i zmodyfikować wartości każdej listy kontrolnej, jeżeli jest to konieczne.

#### 4. WSKAŹNIK RYZYKA *RI* JAKO POŚREDNIA MIARA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU I JEGO ZASTOSOWANIE W POLSCE

Wskaźnik ryzyka *RI* jest pośrednią miarą bezpieczeństwa ruchu, który został zdefiniowany w celu uzupełnienia analiz wypadkowych w badaniach bezpieczeństwa ruchu na drogach zamiejskich jednojezdniowych dwupasowych przy użyciu danych z kontroli bezpieczeństwa i modeli jednorodności projektowej drogi [4]. Miara ta pozwala względnie ocenić stan bezpieczeństwa ruchu na odcinkach dróg zamiejskich. *RI* jest miarą ilościową, która wypełnia lukę w stosowaniu kontroli bezpieczeństwa w zarządzaniu bezpieczeństwem sieci drogowej, która jest oceną jakościową.

Cafiso [4] sformułował *RI* poprzez kombinację najważniejszych elementów ryzyka, według (1):

$$RI = EF \cdot AFF \cdot ASF, \quad (1)$$

gdzie:

*EF* – ekspozycja użytkowników dróg na zagrożenia,

*AFF* – prawdopodobieństwo uczestniczenia w wypadku drogowym,

*ASF* – konsekwencja wystąpienia wypadku.

W dalszej części opisane są w sposób syntetyczny teoretyczne podstawy i analityczne sformułowanie wskaźnika ryzyka *RI*. Szczegółowe wyjaśnienie modelu nie jest przedmiotem niniejszego artykułu, dlatego czytelnik zainteresowany bardziej szczegółowymi informacjami na temat tego zagadnienia może znaleźć więcej informacji w załączonej bibliografii.

##### Wskaźnik Ekspozycji *EF*

Wskaźnik ekspozycji ocenia ekspozycję użytkowników dróg na występujące zagrożenia i obliczany jest następująco:

$$EF = L \cdot AADT, \quad (2)$$

In the following the theoretical background and the analytical formulation of *RI* will be synthetically reported. The detailed explanation of the model is beyond the scope of this paper, but the reader interested in more details will be able to find all the information in the referenced papers.

##### Exposure Factor *EF*

The exposure factor measures the exposure of road users to road hazards and is assessed as follows:

$$EF = L \cdot AADT, \quad (2)$$

where:

*L* – length of each unit (in kilometers),

*AADT* – average annual daily traffic (in 1000 vehicles per day).

##### Accident Frequency Factor *AFF*

The accident frequency factor depends on the safety features of the road segment, which are assessed by two analysis methodologies:

- road Safety Inspection,
- design consistency evaluations and design standard check.

The accident frequency factor is obtained by:

$$AFF = SI_{AF} \cdot GD_{AF}, \quad (3)$$

where:

*SI<sub>AF</sub>* – quantify the presence of safety issues which can be assessed on the basis of road safety inspections. *SI<sub>s</sub>* relate to the main safety issues that can be effectively detected in two lane rural roads by means of inspections (accesses, cross sections, delineation, markings, signs, pavement, roadside, sight distance, alignment);

*GD<sub>AF</sub>* – represents the component related to the design consistency and, more generally, to the horizontal alignment characteristics of the road.

For each safety issue *j* the related *SI<sub>AF<sub>j</sub></sub>* is computed as follows:

$$SI_{AF_j} = 1 + WS_j \cdot \Delta AF_j \cdot P_j, \quad (4)$$

where:

*WS<sub>j</sub>* – is the score assigned to each issue during the Safety Inspection,

*ΔAF<sub>j</sub>* – is the estimated relative increase in accident risk due to issue *j*,

*P<sub>j</sub>* – is the proportion of accident typologies affected by issue *j*.

gdzie:

- $L$  – długość odcinka jednostkowego [km],  
 $AADT$  – średniodobowe natężenie ruchu [tys. P/24h].

### Wskaźnik Częstości Wypadków $AF$

Wskaźnik częstości wypadków zależy od cech odcinka drogi, które wpływają na bezpieczeństwo ruchu i obliczany jest z uwzględnieniem wyników:

- kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego,
- oceny jednorodności projektowej i standardu projektowania.

Wskaźnik częstości wypadków obliczany jest z następującego wzoru:

$$AFF = SI AF \cdot GD AF, \quad (3)$$

gdzie:

$SI AF$  – składnik określający ilościowo występowanie cech drogi związanych z bezpieczeństwem ruchu, który może być wyznaczony na podstawie kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego. Kontrola pozwala na efektywne identyfikowanie na drogach zamiejskich jednojezdniowych dwupasowych głównych czynników wpływających na bezpieczeństwo ruchu (dostępność, przekrój poprzeczny, prowadzenie, oznakowanie pionowe i poziome, stan nawierzchni, pobocze, skarpy, przeszkody boczne, odległość widoczności, przebieg trasy i niwelety);

$GD AF$  – reprezentuje składnik związany z jednorodnością projektową drogi, zwłaszcza w odniesieniu do parametrów geometrycznych trasy.

Dla każdej cechy drogi związanej z bezpieczeństwem ruchu  $j$  odpowiednie  $SI AF_j$  jest obliczane na podstawie wzoru:

$$SI AF_j = 1 + WS_j \cdot \Delta AF_j \cdot P_j, \quad (4)$$

gdzie:

- $WS_j$  – jest to wynik przypisany do każdej ocenianej cechy drogi  $j$  podczas kontroli bezpieczeństwa,  
 $\Delta AF_j$  – jest szacunkową względną zmianą zagrożenia wypadkami z powodu występowania cechy  $j$ ,  
 $P_j$  – jest to udział procentowy rodzajów wypadków powodowanych przez występowanie cechy drogi  $j$ .

Udział procentowy rodzajów wypadków przyjęto na podstawie danych wypadkowych dla dróg wojewódzkich w Małopolsce z okresu pięciu lat, tj. 2009-2013 udostępnionych przez Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie (Tabl. 1).

For the proportion of accident typologies have been assumed the values provided by the Voivodeship Road Administration related to five years between 2009 and 2013 for Małopolska Region (Table 1). On the basis of existing literature, the relative increase in accident risk  $\Delta AF$  due to each issue is reported in Table 2.

Table 1. Proportion of accident typologies affected by issue  $j$

Tablica 1. Udział procentowy rodzajów wypadków powodowanych przez występowanie cechy drogi  $j$

Type of accident / Rodzaj wypadku	$P_j$ [%]
Head on / Zderzenie czołowe	18.87
Side on / Zderzenie boczne	23.75
Rear end / Zderzenie tylne	8.86
Run off the road / Wypadnięcie z drogi	23.62
Others / Inne	24.90
All / Razem	100.00

The  $GD AF$  is assessed by the following formula:

$$GD AF = 1 + WS_{GD} \cdot \Delta AF_{GD} \cdot P_{GD}, \quad (5)$$

where:

- $WS_{GD}$  – is the weighted score of safety issue  $GD$ ,  
 $\Delta AF_{GD}$  – is the estimated relative increase in accident risk due to issue  $GD$ ,  
 $P_{GD}$  – is the proportion of accidents affected by issue  $GD$ .

For a section of  $n$  geometric elements,  $WS_{GD}$  is computed through a weighted mean of  $GDS_i$ :

$$WS_{GD} = \frac{\sum_{i=1}^n GDS_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}, \quad (6)$$

where:

- $i$  – is the number of geometric elements that form section under consideration,  
 $L_i$  – is the length of geometric element  $i$ ,  
 $GDS_i$  – is the geometric design score of element  $i$ .

Each (ranging from 0 to 1) was estimated (Table 3) by analyzing the increase of the accident rate with respect to:

- for the curved elements: poor, fair, and good design consistency rate defined basing on the well-known Lamm's criteria,
- for tangents: a check in terms of minimum or maximum length, which failed the national design standards.



Szacunkową względną zmianę zagrożenia wypadkami  $\Delta AF$  z powodu występowania cechy  $j$  przyjęto na podstawie istniejącej literatury i przedstawiono w Tabl. 2.

$GD AF$  jest obliczany na podstawie następującego wzoru:

$$GD AF = 1 + WS_{GD} \cdot \Delta AF_{GD} \cdot P_{GD}, \quad (5)$$

gdzie:

$WS_{GD}$  – jest ważoną oceną wynikającą z parametrów geometrycznych drogi  $GD$ ,

$\Delta AF_{GD}$  – jest szacunkową względną zmianą zagrożenia wypadkami związanymi z parametrami geometrycznymi drogi  $GD$ ,

$P_{GD}$  – jest to udział procentowy wypadków związanych z parametrami geometrycznymi drogi  $GD$ .

Dla odcinka drogi składającego się z  $n$  elementów geometrycznych,  $WS_{GD}$  jest obliczany jako średnioważona wartość  $GDS_i$ :

$$WS_{GD} = \frac{\sum_{i=1}^n GDS_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}, \quad (6)$$

gdzie:

$i$  – jest liczbą elementów geometrycznych składających się na analizowany odcinek,

$L_i$  – jest długością elementu geometrycznego  $i$ ,

$GDS_i$  – jest oceną parametrów geometrycznych elementu  $i$ .

Table 2. Safety effects of issues

Tablica 2. Szacunkowa względna zmiana zagrożenia wypadkami

Safety issues Cecha drogi	Related accident Rodzaj wypadku	$P_j$	$\Delta AF$
Accesses Dostępność	All Wszystkie	1.000	1.350
Cross section Przekrój poprzeczny	Run off the road Wypadnięcie z drogi	0.662	$f(AADT)$
	Head on Zderzenie czołowe		
	Side on Zderzenie boczne		
Delineations Prowadzenie	All Wszystkie	1.000	0.300
Markings Oznakowanie poziome	All Wszystkie	1.000	0.200
Pavement Stan nawierzchni	All Wszystkie	1.000	0.100
Alignment Przebieg trasy i niwelety	All Wszystkie	1.000	0.500
Signs Oznakowanie pionowe	All Wszystkie	1.000	0.200

Table 3. Geometric Design Score  $GDS_i$

Tablica 3. Ocena parametrów geometrycznych elementu  $GDS_i$

Curved elements / Krzywe		Tangents / Prosta		Related accidents / Rodzaj wypadku	
Good / Wysoka	0.2	Overall standards check / Spełnione standardy	0.0	Run off the road, partially (50%) / Wypadnięcie z drogi, częściowo (50%)	
Fair / Wystarczająca	0.5	Minimum length / Minimalna długość	0.1	Head on / Zderzenie czołowe	
Poor / Niska	1.0	Maximum length / Maksymalna długość	0.1	Side on / Zderzenie boczne	

Każda wartość  $GDS_i$  zawiera się w przedziale od 0 do 1 i jest oszacowana (Tabl. 3) poprzez zmianę wskaźnika wypadkowego w odniesieniu do:

- w przypadku łuków: niska, wystarczająca, i wysoka jednorodność projektowa zdefiniowana na podstawie znanych kryteriów Lamma,
- w przypadku odcinków prostych: sprawdzenie w zakresie minimalnej i maksymalnej długości odcinka, które wynikają z krajowych standardów projektowych.

### Wskaźnik Ciężkości Wypadków $ASF$

Wskaźnik ciężkości wypadków  $ASF$  jest miarą ciężkości wypadków z uwzględnieniem zagrożeń występujących

### Accident Severity Factor $ASF$

The accident severity factor  $ASF$  is a measure of severity of crashes basing on roadside hazards, identified by Safety Inspection (SIs), and speed value as the ratio between the 85<sup>th</sup> percentile of free flow speed  $V_{85}$  and the posted/design speed  $V_{base}$ . Margin protection and condition in general is well known influencing factor in literature [9] for this reason it was included separately.

$$ASF = \left( \frac{V_{85}}{V_{base}} \right) \cdot SI AS_{roadside}, \quad (7)$$

where:

$V_{85}$  – is the average 85<sup>th</sup> percentile of speed along segment (weighted to element length),

w otoczeniu drogi, identyfikowanych w trakcie kontroli bezpieczeństwa ruchu oraz wartości prędkości jako udziału kwantyla 85% prędkości w ruchu swobodnym  $V_{85}$  do wartości ograniczenia prędkości/prędkości projektowej  $V_{base}$ . Zabezpieczenie i stan otoczenia drogi jest czynnikiem istotnie wpływającym na bezpieczeństwo ruchu [9], dlatego ten wpływ został uwzględniony oddzielnie.

$$ASF = \left( \frac{V_{85}}{V_{base}} \right) \cdot SI AS_{roadside}, \quad (7)$$

gdzie:

$V_{85}$  – jest średnią wartością kwantyla 85 prędkości na długości odcinka (wartość ważona długością elementu),

$V_{base}$  – jest prędkością oczekiwaną na drogach wojewódzkich zamiejskich jednojezdniowych dwupasowych w Polsce (założono ją jako równą ogólnemu limitowi prędkości wynoszącemu 90 km/h),

$SI AS_{roadside}$  – jest wskaźnikiem ciężkości wypadków otoczenia drogi dla analizowanego odcinka  $i$  jest równy:

$$SI AS_{roadside} = 1 + WS_{roadside} \cdot P_{roadside} \cdot \Delta AS_{roadside}, \quad (8)$$

gdzie:

$WS_{roadside}$  – jest oceną cech bezpieczeństwa ruchu otoczenia drogi na podstawie kontroli bezpieczeństwa,

$P_{roadside}$  – jest to udział procentowy wypadków związanych z otoczeniem drogi, równy udziałowi wypadków związanych z wypadnięciem z drogi,

$\Delta AS_{roadside}$  – jest szacunkową względną zmianą w wartości ciężkości wypadków związanych z ocenianą cechą  $j$  (przyjęto wartość równą 2), biorąc pod uwagę maksymalny wzrost ciężkości wypadków ze względu na zagrożenia związane z otoczeniem drogi.

Biorąc pod uwagę, że za pomocą  $SI AS_{roadside}$  oceniane są elementy infrastruktury drogowej, w tym: nasypy, obiekty inżynierskie, bariery drogowe, obecność drzew, słupów, sztywnych przeszkód oraz rowów, oblicza się średnioważony wpływ cech otoczenia drogi  $WS_{roadside}$  w następujący sposób:

$$WS_{roadside} = \frac{\sum_{k=1}^{2 \cdot n} \max_i (score_{ik} \cdot weight_i)}{2 \cdot n \cdot 5}, \quad (9)$$

$V_{base}$  – is the base operating speed for two-lane local rural highways in Poland (assumed equal to legal speed limit of 90 km/h),

$SI AS_{roadside}$  – is the roadside accident severity factor of segment equal to:

$$SI AS_{roadside} = 1 + WS_{roadside} \cdot P_{roadside} \cdot \Delta AS_{roadside}, \quad (8)$$

where:

$WS_{roadside}$  – is the score of roadside safety issue assigned during the SIs,

$P_{roadside}$  – is the proportion of accidents related to roadside issue, equal to proportion of run-off-the-road accidents,

$\Delta AS_{roadside}$  – is the estimated relative increase in accident severity due to issue  $j$  (this value was assumed equal to 2), considering maximum increase in proportion of injury accidents due to roadside hazard.

Considering that  $SI AS_{roadside}$  evaluates several roadside items including embankments, bridges, dangerous barrier terminals and transitions, trees, utility poles, and rigid obstacles and ditches, a weighted mean of the roadside issue  $WS_{roadside}$  is computed as follows:

$$WS_{roadside} = \frac{\sum_{k=1}^{2 \cdot n} \max_i (score_{ik} \cdot weight_i)}{2 \cdot n \cdot 5}, \quad (9)$$

where:

$score_{ik}$  – is the score of roadside safety item  $i$  in the inspection units  $k$  (0, 1, or 2),

$weight_i$  – is the relative weight of roadside safety item  $i$  (Table 4).

Table 4. Relative weights of roadside safety item  
Tablica 4. Względne wagi dla cech otoczenia drogi

Detailed safety issue Szczegółowa cecha otoczenia drogi	Relative weight Względna waga
Embankments / Nasypy/skarpy	3
Bridges / Obiekty inżynierskie (mosty)	5
Dangerous terminals and transitions Zakończenia barier	2
Trees, utility poles and rigid obstacles Drzewa, słupy inne sztywne przeszkody	2
Ditches / Rowy	1

gdzie:

$score_{ik}$  – jest oceną  $i$ -tej cechy otoczenia drogi, w jednostkach stosowanych w trakcie kontroli bezpieczeństwa  $k$  (0, 1 lub 2),

$weight_i$  – jest względną wagą dla  $i$ -tej cechy otoczenia drogi (Tabl. 4).

## 5. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY WSKAŹNIKIEM RYZYKA $RI$ I LICZBĄ WYPADKÓW

Opisany powyżej model został zweryfikowany we Włoszech, wykazując dobrą korelację między  $RI$  a oczekiwaną liczbą wypadków. Na podstawie przeprowadzonych w Polsce badań pilotażowych oceniono możliwość zastosowania tego modelu w innych krajach. W tym celu na drogach wojewódzkich w Małopolsce przeprowadzono kontrolę bezpieczeństwa ruchu drogowego w oparciu o metodę IASP i metodę polską z wykorzystaniem nisko kosztowych urządzeń opisanych w [10]. Wybór odcinków do analiz przeprowadzono na podstawie względnego wskaźnika wypadkowego w celu identyfikacji i uwzględnienia w badaniach niebezpiecznych odcinków w sieci. Kontrole bezpieczeństwa były prowadzone na 7 odcinkach dróg wojewódzkich o łącznej długości 184,48 km, z których 98,052 km były zlokalizowane poza obszarami zabudowanymi i te zostały włączone do badań. Pozostałe odcinki zostały odrzucone, ponieważ znajdowały się na obszarach zabudowanych, przejściach drogowych przez miejscowości. Na odcinkach tych prowadzona kontrola bezpieczeństwa była zatrzymywana i rozpoczynana ponownie po przejechaniu przez miejscowość. Takie podejście spowodowało fragmentaryczną analizę wzdłuż rozpatrywanego, dłuższego odcinka drogi. Pomimo tego, po wstępnej selekcji odcinków uwzględniając względny wskaźnik wypadkowy, przeprowadzone kontrole bezpieczeństwa pozwoliły uzyskać istotną próbę, składającą się z odcinków dróg o długość około 100 km [10]. Względny wskaźnik wypadkowy był obliczany dla jednorodnych odcinków w odniesieniu do natężenia ruchu. Podstawowe dane wymagane do klasyfikacji odcinków reprezentowane są przez: długość jednorodnego odcinka drogi, dane o wypadkach (z ofiarami śmiertelnymi i rannymi) oraz średni poziom natężenia ruchu. Generalnie jednorodne odcinki dróg charakteryzują się takimi cechami jak:

- ukształtowanie terenu (płaski lub górzisty),
- klasa drogi,
- parametry geometryczne osi drogi,
- średniodobowe natężenie ruchu  $AADT$ .

## 5. CORRELATION BETWEEN $RI$ AND CRASH FREQUENCY

The aforementioned model was validated in Italy showing a good correlation between  $RI$  and the expected crash frequency. In view of the application of the same model in a different country, the transferability of the  $RI$  model in Poland was evaluated by carrying out a pilot study. On the voivodship roads in Malopolska, Safety Inspections were carried out based on the IASP method and Polish method, using the low cost equipment described earlier [10]. The choice has been based on value assumed by Accident Rate parameter in order to identify those sections including hazardous sites of the network. The inspections were conducted on 7 sections of voivodship roads for a total length of 184.48 km, 98.052 km of which were rural sections and therefore were included in the study. Other sections, located in built-up areas, were rejected from the study. In those areas, Safety Inspections have been stopped in order to start it again when the built-up area ended. Such approach leads to a fragmented analysis along the whole extension of the examined road. However, after the site selection based on the Accident Rate the Safety Inspections were carried out in about 100 km, sufficient to obtain a significant sample of data [10]. Accident Rate was calculated for a homogeneous section based on the traffic volume. The principal data required in order to draw up a classification of the section are represented by length of homogeneous road section, historical crash data (including number of fatalities and injured people) and average traffic volume. In general, the individuation of homogeneous road sections takes into account several elements such as:

- terrain (flat or mountainous terrain),
- functional class of the road,
- geometric characteristics of road axis,
- Annual Average Daily Traffic  $AADT$ .

For each homogenous section, Accident Rate has been calculated with the following Equation (10):

$$A.R. = \frac{\text{number of accidents} \cdot 10^6}{\text{average } AADT \cdot L \cdot 5 \cdot 365}, [\text{acc./1 mln veh. km}], \quad (10)$$

in which the number of accidents and the average value of traffic volumes were considered, provided by the Voivodship Road Administration, related to 5 years (from 2009 to 2013) for the Małopolska voivodship.

Dla każdego jednorodnego odcinka drogi obliczono względny wskaźnik wypadkowy na podstawie równania (10):

$$A.R. = \frac{\text{liczba wypadków} \cdot 10^6}{AADT \cdot L \cdot 365}, \quad [\text{wyp./1 mln Pkm}] \quad (10)$$

w którym uwzględniono średniodobowe natężenie ruchu i liczbę wypadków z okresu 5 lat (od 2009 do 2013 r.) na drogach wojewódzkich w Małopolsce, udostępnione przez Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie.

Metoda wyboru odcinków do analiz polegała na przyjęciu wartości progowej  $A.R.$  w celu wyznaczenia sumy długości odcinków niebezpiecznych przewidzianych do dalszych analiz. W przypadku przyjęcia wartości progowej  $A.R.$  równej 0,3, liczba odcinków zakwalifikowanych do analiz wyniosła 42, przy ich łącznej długości 19,605 km, a dla wartości  $A.R.$  równej i wyższej niż 0,2, liczba odcinków wybranych do analiz wyniosła 116 o łącznej długości 144,095 km, co stanowiło wystarczającą wielkość próby. Kontrole bezpieczeństwa obejmowały dłuższe odcinki dróg, przy czym zawierały one co najmniej jeden jednorodny odcinek niebezpieczny, ponieważ kontrole bezpieczeństwa powinny być prowadzone wzdłuż drogi w sposób „ciągły”. Wyselekcjonowane odcinki dróg, które zawierały dużą liczbę odcinków niebezpiecznych oraz gdzie występowało płaskie ukształtowanie terenu, przedstawiono w Tabl. 5.

W celu zbadania zależności pomiędzy obserwowaną liczbą wypadków, a wskaźnikiem ryzyka  $RI$ , konieczna była agregacja sekcji/arkuszy [11] przeprowadzona przy użyciu oprogramowania MINSSE. Wskaźnik ryzyka oceniany jest dla bardzo krótkich sekcji/arkuszy (każdy o długości 200 m). Odniesienie do krótkich segmentów pozwala na przyjęcie stałych wartości parametrów używanych do oszacowania  $RI$ . Niestety, krótkie odcinki nie pozwalają na silny związek  $RI$  z obserwowaną liczbą wypadków, które dodatkowo mogą zawierać błędy lokalizacji wypadków w policyjnych bazach danych [12]. Aby zdefiniować dłuższe odcinki jednorodne przez agregację sąsiednich sekcji o podobnych wartościach  $RI$  zastosowano procedurę iteracyjną segmentacji (MINSSE), która łączy odcinki ze statystyczną stałą średnią wartością, aby uzyskać minimalny błąd standardowy między średnią, a rzeczywistą wartością  $RI$ . Wykorzystując oprogramowanie MINSSE [13] przeprowadzono szczegółową agregację dla dwóch przypadków tj. dla wskaźnika ryzyka obliczonego na podstawie wartości maksymalnej oraz wskaźnika ryzyka obliczonego na podstawie średniej wartości z obu kierunków jazdy, dla każdej sekcji o długości 200 m. Na podstawie agregacji, dla początkowych 474 sekcji/arkuszy, otrzymano 73 jednorodne odcinki dla maksymalnej wartości wskaźnika

In the procedure, the total length of hazardous sections was identified based on the assumed threshold value of  $A.R.$  It has been observed that for higher values of  $A.R.$ , like 0.3, the number of reference roads was 42 for a total of 19.605 km of length, while for value of  $A.R.$  equal to 0.2 the number of reference sections was 116 for a total of 144.095 km, that represented a good sample size. However, inspections have been extended to all roads which include at least a hazardous section, inasmuch Safety Inspections have to be carried out “in continuous” along the road. Roads selected in the study, that present a high number of critical sections located in a flat environment, are reported in Table 5.

Table 5. Roads selected for safety inspections  
Tablica 5. Odcinki dróg wyselekcjonowane do kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego

Road No. Nr drogi	Road class Klasa drogi	From...to... Odcinek	Road length Długość odcinka [km]
774	G	Zabierzów – Kryspinów	8.40
780	G	Kraków – Libiąż	38.77
791	G	Wanaty – Trzebinia	35.40
794	G	Wolbrom – Skala	18.10
964	G	Ispina – Biskupice Radł.	35.40
966	G	Wieliczka – Gdów	13.31
967	G	Myślenice – Łapczyca	35.10
Total / Razem			184.48

In order to investigate the correlation between the observed crashes and the Risk Index, an aggregation of unit/sheets was needed [11] and carried out using the MINSSE software. Indeed, Risk Index was evaluated in software for very short segments of unit/sheet (200 m each). The reference to short segments allows to assume constant values of the parameters used to estimate  $RI$ . Unfortunately, the short segments do not allow a perfect correlation with observed crashes that are taken from Police reports and can contain some possible localization issues [12]. To define longer homogeneous sections by aggregating contiguous segments with similar values of  $RI$ , an iterative segmentation procedure (MINSSE) was applied. The procedure combines segments with statistical constant average value to obtain the minimal Standard Error between the average and the actual value of  $RI$ s. With the software MINSSE [13] a detailed aggregation was carried out separately for the Risk Index evaluated taking into account the maximum value and the one computed considering the average value in both directions for each segment

ryzyka oraz 55 odcinków jednorodnych biorąc pod uwagę wartość średnią wskaźnika ryzyka (Rys. 1).

W celu uwzględnienia stochastycznej zmienności liczby wypadków w podanym okresie oraz uniknięcia efektu regresji do średniej, skalibrowano podstawowy model bezpieczeństwa ruchu SPF do predykcji liczby wypadków dla każdego z odcinków, wchodzących w skład dwóch zestawów danych, z zastosowaniem empirycznej korekty Bayesa uwzględniającej obserwowane i predykowane wypadki. Wykorzystano dane o wypadkach z ofiarami śmiertelnymi i rannymi z okresu 7 lat (2007-2013). Statystyki opisowe dla dwóch zestawów danych wykorzystywanych do analiz przedstawiono w Tabl. 6.

Zgodnie ze stanem wiedzy do kalibracji modeli wykorzystano dwumianowy ujemny rozkład zmiennej losowej [14]. Przyjęto modele o następującej postaci:

$$E(Y) = e^{\alpha} \cdot L \cdot AADT^{\gamma}, \quad (11)$$

gdzie:

$E(Y)$  – jest predygowaną liczbą wypadków zmiennej losowej  $Y$  (ofiary śmiertelne i ranne) w ciągu 7 lat,

$L$  – jest długością odcinka [m],

$AADT$  – jest średniodobowym natężeniem ruchu [P/24h],

$\alpha$  i  $\gamma$  – są współczynnikami regresyjnymi.

Wyniki kalibracji modeli są przedstawione w Tabl. 7.

of 200 m. Starting from a total of 474 segment/sheets, 73 homogeneous sections were obtained for  $RI$  computed considering the maximum value and 55 considering their average (Fig. 1).

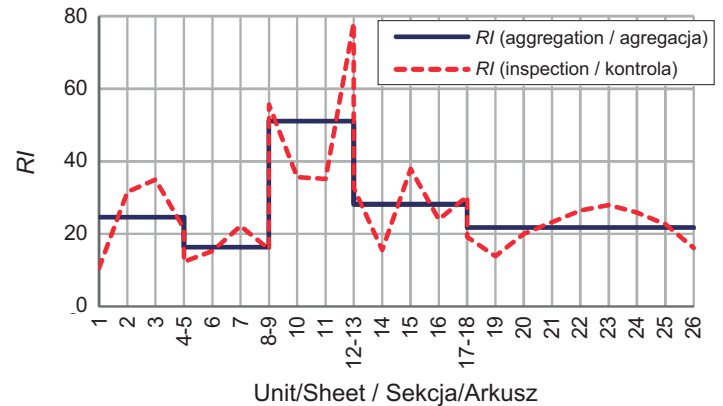


Fig. 1. Example of aggregation using software MINNSE (data from road no. 966)

Rys. 1. Przykład agregacji z zastosowaniem oprogramowania MINNSE (dane dla drogi nr 966)

To take into account the stochastic variability of crash counts in a limited number of years and to avoid regression to the mean effects, a Safety Performance Function (SPF) was calibrated to predict the crash frequency for each of the segments composing two data sets and an empirical Bayes correction was applied to the observed and predicted crash frequencies. The number of fatal and injury crashes was observed in a period of 7 years (2007 - 2013). The summary statistics of two data sets used for the elaboration are reported in Table 6.

Table 6. Detail of the dataset used for models calibration for the aggregated dataset made up by the  $RI$  computed with the average value of parameters inside each segment (Average) and the one in which the maximum value of parameters is taken into account (Maximum)

Tablica 6. Zestaw danych wykorzystany do kalibracji modeli dla zagregowanych zbiorów danych utworzonych przez obliczenie  $RI$  dla wartości średniej z każdej sekcji (Średnia) oraz dla wartości maksymalnej jednej z sekcji (Max)

	$L$ [m]	$AADT$ [Veh/day] [P/24h]	Crashes (fatal+injury) Wypadki (zabici + ranni)	$RI$	$L$ [m]	$AADT$ [Veh/day] [P/24h]	Crashes (fatal+injury) Wypadki (zabici + ranni)	$RI$
	Average (55 segments) / Średnia (55 odcinków)				Maximum (73 segments) / Max (73 odcinki)			
Min	800	2276.20	0	49.97	800	2142.68	0	28.38
Max	11000	14723.80	9	494.93	9800	14723.80	9	936.61
Average / Średnio	1654.55	7054.43	2.07	140.46	1263.01	6851.12	1.89	188.80
Standard deviation Odchylenie Standardowe	1664.65	2302.72	2.05	81.68	1110.49	2507.26	1.55	138.01
Total crashes (fatal + injury) / Suma wypadków (ofiary śmiertelne + ranni) = 113								

Table 7. Results of model calibration  
 Tablica 7. Wyniki kalibracji modeli

	Coefficient Współczynnik	Standard deviation Odchylenie Standardowe	P-value P-wartość	Coefficient Współczynnik	Standard deviation Odchylenie Standardowe	P-value P-wartość
	Average / Średnia			Maximum / Max		
Intercept / Wyraz wolny ( $\alpha$ )	-15.2177	3.5609	< 0.0001	-9.4675	1.2285	< 0.0001
AADT ( $\gamma$ )	0.9662	0.3596	0.0021	0.3015	0.1330	0.0234
Dispersion parameter / Parametr dyspersji ( $k$ )	0.3670	–	–	0.4152	–	–

W celu uwzględnienia empirycznej korekty Bayesa [15-17] wykorzystano parametr dyspersji i obserwowaną liczbę wypadków w następujący sposób:

$$EB = w_i \cdot E(Y) + (1 - w_i) \cdot Obs, \quad (12)$$

gdzie:

$EB$  – jest oczekiwaną liczbą wypadków,

$E(Y)$  – jest predykowaną liczbą wypadków,

$$w_i = \frac{1}{1 + k_i \cdot \sum E(Y)},$$

$Obs$  – jest obserwowaną liczbą wypadków.

W celu dalszej agregacji danych, przeprowadzono analizę skupień dla dwóch zbiorów danych przy użyciu metody grupowania średniej odległości, opartej na kwadratowej odległości euklidesowej [18]. Wyniki analizy skupień przedstawiono w Tabl. 8. Po przeprowadzeniu analizy skupień zbadano siłę zależności między  $RI/L$  a oczekiwaną liczbą wypadków na jednostkę długości, obliczoną przy użyciu empirycznej korekty Bayesa. Wyniki zostały przedstawione na Rys. 2 i 3.

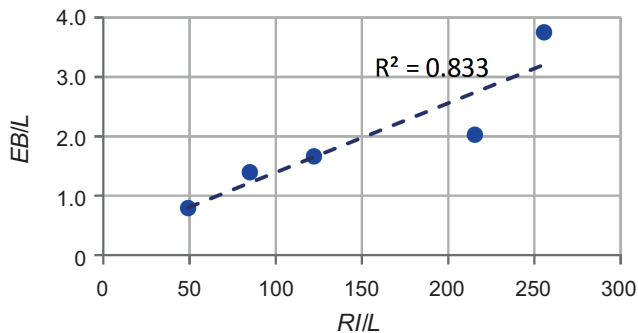


Fig. 2. Correlation between  $EB/L$  with  $RI/L$  respectively for  $RI$  computed with the average value of the parameter inside each segment

Rys. 2. Zależność pomiędzy  $EB/L$  i  $RI/L$  dla  $RI$  obliczonego dla wartości średniej z każdej sekcji

Consistent with the state of the art of model calibration a Negative Binomial error distribution was considered in the present elaboration [14]. Models have the following model form:

$$E(Y) = e^\alpha \cdot L \cdot AADT^\gamma, \quad (11)$$

where:

$E(Y)$  – is predicted in 7 years (fatal plus injury) crash frequency of random variable  $Y$ ,

$L$  – is length of road segment [m],

$AADT$  – is average annual daily traffic [veh./day],

$\alpha$  and  $\gamma$  – are regression terms.

The results of models calibration are reported in Table 7.

For the empirical Bayes correction [15-17] the dispersion parameter and the observed crashes were used as reported in the following:

$$EB = w_i \cdot E(Y) + (1 - w_i) \cdot Obs, \quad (12)$$

where:

$EB$  – is expected number of crashes,

$E(Y)$  – is the predicted number of crashes,

$$w_i = \frac{1}{1 + k_i \cdot \sum E(Y)},$$

$Obs$  – are the observed crashes.

In a way to create a further aggregation of data a cluster analysis was performed on two data sets using a group average methodology of aggregation based on the squared Euclidean distance [18]. The results of cluster analysis are reported in Table 8. Once performed the cluster analysis, a correlation between  $RI/L$  and the expected number of crashes divided by  $L$  (Fig. 2) and (Fig. 3), computed using the  $EB$  correction, was investigated. As it is clear, both for the  $RI$  computed using the average value of the parameter inside each segment and the one considering their maximum observed value, there is a high correlation between

Table 8. Results of cluster analysis on two data sets post elaborated using software MINSSE  
 Tablica 8. Wyniki analizy skupień dla dwóch zestawów danych opracowanych przy użyciu oprogramowania MINSSE

<i>L</i> [m]	<i>RI/L</i>	<i>EB/L</i>	<i>Obs/L</i>
Average / Średnia			
40600	49.11	1.09	0.79
23000	84.98	1.38	1.39
19600	122.22	1.62	1.66
7000	215.56	2.00	2.03
800	255.67	3.36	3.75
Maximum / Max			
32400	64.82	0.59	0.42
16400	114.60	1.17	1.23
13400	157.43	1.04	1.01
20600	212.68	1.33	1.36
4200	308.31	2.70	3.35
3600	397.40	2.52	2.71
1600	518.69	2.94	3.75

Zgodnie z założeniem, zarówno dla *RI* obliczonego przy użyciu średniej wartości parametru dla każdej sekcji, jak i dla jego maksymalnej wartości, istnieje wysoka zgodność pomiędzy *RI/L*, a oczekiwaną liczbą wypadków na km. Współczynnik determinacji  $R^2$  jest zawsze większy niż 0,8 i osiąga najwyższą wartość około 0,9 dla *RI* z uwzględnieniem jego maksymalnej wartości w każdej z sekcji podlegającej kontroli bezpieczeństwa i oczekiwanej liczby wypadków na km.

## 6. WNIOSKI

Przedstawiona metoda oceny bezpieczeństwa ruchu, przy wykorzystaniu wskaźnika ryzyka w Polsce, potwierdza skuteczne wdrożenie we Włoszech kontroli bezpieczeństwa ruchu drogowego jako narzędzia w zarządzaniu bezpieczeństwem infrastruktury drogowej wprowadzonego dyrektywą UE.

Walidacja wskaźnika ryzyka *RI* dla Polski została przeprowadzona na próbie ponad 184 km dróg zamiejskich jednojezdniowych dwupasowych w Małopolsce poprzez porównanie jego wyników z oczekiwaną liczbą wypadków. Współczynnik determinacji pomiędzy *RI*, a oczekiwaną liczbą wypadków jest wysoki ( $R^2 = 0,83 \div 0,88$ ) zarówno przy użyciu średniej, jak i maksymalnej wartości *RI* w obu kierunkach kontroli bezpieczeństwa. Zastosowanie maksymalnej wartości *RI* dla krótkich sekcji daje silniejszy związek

*RI/L* and crashes per km. The  $R^2$  is always higher than 0.8 and reaches its maximum value for the *RI* computed considering the maximum value of parameter inside each inspection segment and the expected number of crashes per km with a value close to 0.9.

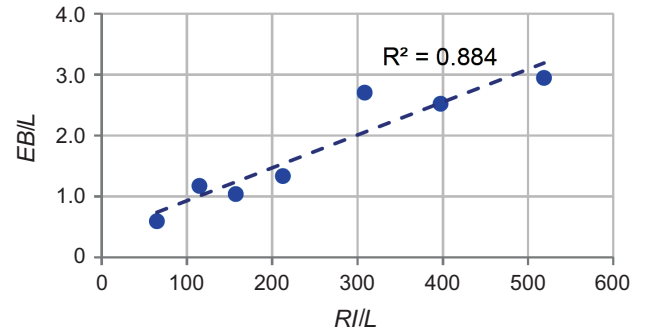


Fig. 3. Correlation between *EB/L* with *RI/L* respectively for *RI* computed with the maximum value of the parameter inside each segment  
 Rys. 3. Zależność pomiędzy *EB/L* i *RI/L* dla *RI* obliczonego na podstawie wartości maksymalnej jednej z sekcji

## 6. CONCLUSIONS

The safety evaluation procedure presented to estimate a Risk Index for road safety, replicates in Poland a successful application in Italy of the effort to use Safety Inspection as part of the road network Safety Management program inspired by the EU directive.

Validation of *RI* for Poland was carried out on a sample of 184 km of two lane rural roads in the Krakow region by comparing the results with the *EB* expected crash frequencies. The correlation between *RI* and crash frequency is highly significant ( $R^2 = 0.83 \div 0.88$ ) using both the average and maximum *RI* value in the two inspection directions. Anyway, the use of the maximum value achieves a better correlation with a higher range of *RI* values defined for shorter homogeneous sections. For the road administration facing the limitation in budget, this result is positive for ranking the high risk sections where the countermeasures need to be applied. The *RI* can be assessed whether accident data are available or not. If accident data are available and are of good quality, *RI* can be effectively used in conjunction with accident frequency as ranking criteria. If accident data are not available or are unreliable, *RI* can be used as a proxy for accident data and becomes the only ranking criterion.

The *RI* has two main applications. High-risk segments, where safety measures that can reduce accident frequency and/or severity can be identified and ranked by the *RI*

w większym zakresie wartości *RI*. Dla zarządzających drogami, wobec ograniczeń budżetowych, wynik ten jest pozytywny w przypadku klasyfikacji odcinków wysokiego ryzyka, gdzie należy zastosować środki poprawy bezpieczeństwa ruchu. *RI* można oceniać zarówno w przypadku, gdy dane wypadkowe są dostępne i niedostępne. Jeśli dane o wypadkach są dostępne i są wiarygodne, *RI* może być skutecznie wykorzystywane w połączeniu z analizą liczby wypadków, jako kryterium klasyfikacji odcinków. Jeśli dane o wypadkach nie są dostępne lub są niewiarygodne, *RI* może być wykorzystywany jako pośrednia miara bezpieczeństwa ruchu i w takim przypadku staje się jedynym kryterium klasyfikacji odcinków na podstawie kontroli bezpieczeństwa.

Wskaźnik ryzyka *RI* ma dwa główne zastosowania. Dla identyfikacji odcinków o wysokim ryzyku, na podstawie wartości *RI*, gdzie za pomocą środków poprawy bezpieczeństwa ruchu można zredukować liczbę lub ciężkość wypadków. Ponadto może służyć do identyfikacji problemów bezpieczeństwa ruchu, wpływających na jego niski poziom, na podstawie wskaźników częstości i ciężkości wypadków, w celu zdefiniowania szczegółowych programów poprawy bezpieczeństwa.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Directive 2008/96/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on road infrastructure safety management  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0096:EN:NOT> Accessed 15, July, 2013
- [2] Budzyński M., Gaca S., Jamroz K., Kustra W., Michalski L.: Tools for road infrastructure safety management - Polish experiences. *Transportation Research Procedia*, **3**, 2014, 730-739
- [3] Cafiso S., La Cava G., Montella A., Pappalardo, G.: A Procedure to Improve Safety Inspections Effectiveness and Reliability on Rural Two - Lane Highways. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering: Technika*, **1**, No. 3, 2006, 143-150
- [4] Cafiso S., La Cava G., Montella A.: Safety Index for Evaluation of Two Rural Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2019**, 2007, 136-145
- [5] Cafiso S., La Cava G., Montella A.: Safety Inspections as a Supporting Tool for Safety Management of Low-Volume Roads. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, **2203**, 2011, 116-125
- [6] Montella A.: Roundabout In-Service Safety Reviews: Safety Assessment Procedure. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, **2019**, 2007, 40-50
- [7] Montella A., Mauriello F.: Procedure for Ranking Unsignalized Rural Intersections for Safety Improvement. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, **2318**, 2012, 75-82
- [8] Cafiso S., Di Graziano A., Giudice O., Pappalardo G.: Tools for Road Inspection and Safety Management. 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation Infrastructure, Pisa, Italy, 2014
- [9] Cafiso S., D'Agostino C., Persaud B.: Investigating the influence on safety of retrofitting Italian motorways with barriers meeting a new EU standard. *Traffic Injury Prevention*, **18**, 3, 2017, 324-329
- [10] Cafiso S., Kieć M., Milazzo M., Pappalardo G., Trovato F.: Application of safety inspections for evaluation of two-lane regional roads in Poland. *Archives of Civil Engineering*, **60**, 4, 2014, 453-473
- [11] Cafiso S., Di Graziano A., Pappalardo G.: Safety inspection and management tool for low-volume road network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2472**, 2015, 134-141
- [12] D'Agostino C.: Investigating transferability and goodness of fit of two different approaches of segmentation and model form for estimating safety performance of Motorways. *Procedia Engineering*, **84**, 2014, 613-623
- [13] Cafiso S., Di Graziano A.: Definition of Homogeneous Sections in Road Pavement Measurements. *Procedia – Social and Behavioral Sciences, SIIV – 5<sup>th</sup> International Congress – Sustainability of Road Infrastructures*, **53**, 2012, 1069-1078
- [14] Highway Safety Manual (HSM), First Edition. FHWA American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 2010
- [15] Hauer E.: *Observational Before-After Studies in Road Safety*. Pergamon Press, Elsevier Science Ltd., Oxford, England, 1997
- [16] Cafiso S., D'Agostino C.: Reliability-based assessment of Benefits in roadway safety management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2513**, 1-10
- [17] Cafiso S., D'Agostino C.: Assessing the stochastic variability of the Benefit-Cost ratio in roadway safety management. *Accident Analysis and Prevention*, **93**, 2016, 189-197
- [18] Kaufman L., Rousseeuw P.: *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, New Jersey, USA, 1990