

MARIUSZ URBAŃSKI<sup>1)</sup>  
JACEK SUDYKA<sup>2)</sup>  
KATARZYNA GRONDYS<sup>3)</sup>

## EXPERT EVALUATION OF ROAD INFRASTRUCTURE MANAGEMENT OCENA EKSPERCKA ZARZĄDZANIA INFRASTRUKTURĄ DROGOWĄ

**STRESZCZENIE.** Gęsta i nowoczesna sieć drogowa warunkuje właściwe funkcjonowanie wymiany handlowej w krajach rozwiniętych gospodarczo. Celem pracy jest ocena wpływu poszczególnych składników infrastruktury drogowej na jej wydajność w aspekcie płynności ruchu przewozowego. Na potrzeby osiągnięcia kompletnego oraz kompleksowego opisu zagadnienia, w artykule zastosowano metodę mieszaną analizy danych ilościowych pozyskanych w oparciu o dostępne bazy statystyczne obejmujące informacje o infrastrukturze liniowej i punktowej funkcjonującej na terenie Unii Europejskiej. W świetle rozważanego problemu przeprowadzono wieloetapową analizę statystyczną. Do oceny heterogeniczności danych i do oszacowania parametrów modeli wyjaśniania poszczególnych składników wydajności infrastruktury drogowej zastosowano analizę czynnikową oraz wielowymiarowej regresji liniowej. Z kolei w oparciu o przeprowadzoną analizę klasyfikacji metodą *k*-średnich zidentyfikowano grupy krajów unijnych różniące się wydajnością sieci drogowej. Wyniki wskazały, że wyodrębnione czynniki sieci drogowej przyczyniają się do poprawy wydajności infrastruktury drogowej w jej poszczególnych badanych obszarach.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza czynnikowa, infrastruktura drogowa, regresja wielozmienna, rozwój gospodarczy, wydajność infrastruktury.

**ABSTRACT.** A dense and modern road network determines the proper functioning of trade-in economically developed countries. The aim of this article is to assess the influence of individual road infrastructure components on their performance in terms of traffic flow. To obtain a complete and comprehensive description of the problem, a mixed method of quantitative data analysis was used based on available statistical databases including information on linear and nodal infrastructure operating in the European Union. In light of the problem under consideration, a multi-stage statistical analysis was conducted. Factor analysis and multiple linear regression were used to assess the heterogeneity of the data and estimate the parameters of the models to explain the various components of road infrastructure performance. In turn, based on the *k*-means classification analysis, groups of EU countries differing in road network performance were identified. The results indicated that the extracted road network factors contribute to improving the performance of road infrastructure in its various study areas.

**KEYWORDS:** economic development, factor analysis, infrastructure efficiency, multiple regression, road infrastructure.

DOI: 10.7409/rabdim.021.028

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; [murbanski@ibdim.edu.pl](mailto:murbanski@ibdim.edu.pl) (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; [jsudyka@ibdim.edu.pl](mailto:jsudyka@ibdim.edu.pl)

<sup>3)</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa; [katarzyna.grondys@pcz.p.l](mailto:katarzyna.grondys@pcz.p.l)

## 1. WPROWADZENIE

Transport jest jednym z najważniejszych czynników, które determinują rozwój gospodarczy kraju. W związku z tym można przyjąć, że infrastruktura transportowa odgrywa bezpośrednią rolę w stymulowaniu procesów rozwoju [1, 2]. Nowoczesna infrastruktura transportowa stanowi kluczowy element realizacji szybkiego transportu ładunków i osób zarówno wewnątrz kraju jak i poza nim, umożliwiając krajowy i międzynarodowy ruch tranzytowy [3]. Z tego powodu powinna być utrzymywana i rozwijana zgodnie z najwyższymi standardami. Aby zrealizować powyższy cel większość krajów europejskich ma możliwość korzystania ze środków finansowania w ramach obecności w Unii Europejskiej, co niesie ze sobą wymierne korzyści w ekspansji jej sieci drogowej. Jednocześnie dotychczasowe badania pokazują, że stan europejskiej infrastruktury transportowej, w tym drogowej nie zapewniają najlepszej możliwej efektywności ruchu tranzytowego, a inwestycje w rozbudowę nadal są intensywnie realizowane, szczególnie w krajach które nie ukończyły jeszcze efektywnej siatki nowoczesnych połączeń drogowych [4-8]. Mimo, że zrealizowane do tej pory działania na rzecz rozwoju unijnej infrastruktury drogowej znacznie poprawiły jakość i stan dróg, to dostępne wskaźniki jej oceny nadal wskazują na różnice w jej stanie między poszczególnymi obszarami Europy. Na przykład Holandia, Austria i Portugalia posiadają najbardziej złożoną sieć komunikacyjną, tymczasem Łotwa, Bułgaria, Rumunia czy Malta pozostają na końcu europejskiego rankingu [9, 10]. Rozbudowana infrastruktura drogowa i idące za tym efektywne usługi przewozu zapewniają pełne wykorzystanie gospodarczej siły na skalę globalną, wspierając jednocześnie rynek macierzysty. Zatem możliwie najlepsze świadczenie usług przemieszczania dóbr i osób warunkowane powinno być optymalną strukturą i zarządzaniem siecią dróg [11]. Konieczna jest więc regularna poprawa stanu technicznego infrastruktury drogowej oraz jej rozbudowa w celu wyeliminowania ograniczeń i barier hamujących optymalne jej wykorzystanie w spójnej europejskiej przestrzeni.

W związku z tym za cel badań przyjęto identyfikację i ocenę oddziaływania dotychczasowych postępów prac związanych z inwestycjami i rozbudową dróg na wydajność komunikacyjną unijnych krajów europejskich. Artykuł został podzielony na część teoretyczną i empiryczną. W badaniu zsyntetyzowano ramy badawcze dotyczące działań związanych z rozwojem europejskiej infrastruktury drogowej. Część teoretyczna opisuje oparte o literaturę przedmiotu rozważania w zakresie roli infrastruktury drogowej w rozwoju gospodarczym kraju i jego systemu transportowego. Część badawcza objęła statystyczną analizę danych pierwotnych dotyczących liniowej i punktowej infrastruktury drogowej krajów będących członkami Unii Europejskiej do roku 2020.

## 1. INTRODUCTION

Transportation is one of the most important factors determining the economic development of a country. Therefore, it can be assumed that transport infrastructure plays a direct role in stimulating development processes [1, 2]. Modern transport infrastructure is a key element in ensuring fast transport of goods and people both domestically and abroad, enabling domestic and international transit traffic [3]. For that reason, it should be maintained and developed at the highest standards. To this end, most European countries are able to benefit from funding as part of their presence in the European Union, which brings tangible benefits in the expansion of its road network. At the same time, previous research shows that the condition of the European transport infrastructure, including roads, does not provide the best possible efficiency of transit traffic, and investment projects in its expansion are still being intensively implemented, especially in countries that have not yet completed an effective network of modern road connections [4-8]. Although measures to develop the EU's road infrastructure have significantly improved the quality and condition of roads, the available indicators for road infrastructure evaluation still show to disparities in road conditions between different parts of Europe. For example, the Netherlands, Austria and Portugal have the most complex transport network, while Latvia, Bulgaria, Romania and Malta remain at the end of the European ranking [9, 10]. The extensive road infrastructure and the efficient transport services that follow ensure that economic power is fully exploited on a global scale while supporting the domestic market. Therefore, the best possible provision of services for moving goods and people should be contingent by the optimal structure and management of the road network [11]. It is necessary to regularly improve the technical condition of the road infrastructure and to expand it in order to eliminate limitations and barriers preventing its optimal use in a coherent European space.

Therefore, the aim of the research was to identify and assess the impact of the current progress of road investment projects and extension works on the transport efficiency of the European Union countries. The article is divided into theoretical and empirical parts. The study synthesized a research framework for European road infrastructure development activities. The theoretical part describes literature-based considerations on the role of road infrastructure in the economic development of the country and its transport system. The research part comprises a statistical analysis of primary data concerning linear and nodal road infrastructure of the European Union member states until 2020.

## 2. EFEKTYWNOŚĆ INFRASTRUKTURY TRANSPORTOWEJ DROGOWEJ

Infrastruktura transportowa stanowi podstawowy element infrastruktury technicznej regionów i warunkuje jego rozwój ekonomiczny, który z kolei wynika między innymi z regularnego wzrostu transportu [12]. Obejmuje ona zarówno drogi lokalne, autostrady i drogi ekspresowe w kraju jak i drogowe połączenia transeuropejskie. W wymiarze technicznym szkielet krajowego systemu transportowego tworzy sieć infrastruktury transportu drogowego. Ma ona charakter zasobu realnej sfery sektora transportu, determinującego sprawne i wydajne funkcjonowanie tegoż systemu na poziomie wewnętrznym czyli w wymiarze regionu jak i zewnętrznym czyli w wymiarze międzynarodowym.

Infrastruktura drogowa jest elementem infrastruktury transportowej i obejmuje części sieci transportowej użytkowanej przez środki transportu w czasie ruchu i postoju [13]. Z uwagi na strukturę, dzieli się ona na infrastrukturę liniową czyli sieć dróg oraz punktową, która obejmuje stacjonarne punkty obsługi środków transportu i osób [14, 15]. Analizując infrastrukturę drogową od strony technicznej, można wyróżnia się pięć klas dróg publicznych tj.: autostrady, drogi do obsługi ruchu wewnątrzregionalnego, trasy szybkiego ruchu, pasy jednojezdniowe o dwóch kierunkach ruchu oraz drogi lokalne. Nie bez znaczenia pozostaje także aspekt inwestycji w powstawanie dróg. Środki na finansowanie infrastruktury drogowej uzyskiwane są nie tylko z podatków i budżetu kraju, ale w przypadku krajów unijnych znaczącą rolę odgrywają także fundusze Unii Europejskiej. Łączne środki budżetowe przydzielone w okresie 2007-2020 na rozwój infrastruktury transportu wyniosły łącznie ponad 190 mld EUR, przy czym połowa z nich przeznaczona była na rozbudowę sieci drogowej [16]. Jednocześnie zgodnie z dokumentami polityki unijnej w celu utworzenia zintegrowanej multimodalnej sieci transportowej na terenie całej UE ustanowiono podstawy dla rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej (ang. *Trans-European Networks*, TEN-T) [17]. W ciągu najbliższych trzydziestu lat planuje się ukończyć budowę poszczególnych poziomów sieci TEN-T, tj.: sieci bazowej (do 2030 roku) i kompleksowej (do 2050 roku). Obecnie sieć TEN-T obejmuje ponad 50 tys. km dróg sieci kolejowej, prawie 40 tys. km sieci drogowej, 13 tys. km dróg śródlądowych, 130 portów lotniczych, ponad 200 portów morskich i śródlądowych oraz 330 terminali przeładunkowych [18]. UE aktywnie zajmuje się także wdrażaniem paliw alternatywnych i pojazdów elektrycznych oraz zapewnieniem ciągłości transgranicznej dla wszystkich środków transportu, co wymaga uzupełniania infrastruktury drogowej o punkty ładowania takich pojazdów [19].

## 2. EFFICIENCY OF ROAD TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Transport infrastructure is the core element of the technical infrastructure of regions and determines its economic development, which in turn results, among other things, from the systematic development of transport [12]. It includes local roads, highways and expressways in the country as well as the trans-European road connections. In technical terms, the road transport infrastructure network is the backbone of the national transport system. It is of the nature of a real resource of the transport sector, determining the efficient and effective functioning of this system on the internal level, i.e., in the regional dimension, and on the external level, i.e., in the international dimension.

Road infrastructure is an element of transport infrastructure and comprises parts of the transport network through transport during movement and stay [13]. Due to its structure, it is divided into linear infrastructure, i.e. road network, and nodal infrastructure, which consist stationary service points for means of transport and people [14, 15]. When analysing the road infrastructure from the technical point of view, five classes of public roads can be distinguished, i.e.: motorways, roads serving intra-regional traffic, expressways, single carriageways with two traffic directions, and local roads. The aspect of investment in the road construction is also significant. Funding of road infrastructure is obtained not only from taxes and the national budget, but in the case of EU countries, EU funds also play a significant role. The total budgetary allocations for the development of transport infrastructure in the period 2007-2020 amounted to more than EUR 190 billion in total, half of which was allocated to the extension of the road network [16]. At the same time, in accordance with the EU policy documents, the foundations for the development of the Trans-European Transport Network (TEN-T) have been established to create an integrated multimodal transport network across the EU [17]. The different levels of the TEN-T network, i.e. the core network (by 2030) and the comprehensive network (by 2050) are planned to be completed within the next thirty years. Currently, the TEN-T network includes more than 50 thousand km of the rail network, almost 40 thousand km of the road network, 13 thousand km of inland roads, 130 airports, more than 200 sea and inland ports and 330 transshipment terminals [18]. The EU is also actively involved in the implementation of alternative fuels and electric vehicles and ensuring cross-border continuity for all modes of transport, which requires complementing road infrastructure with charging

Wśród europejskich krajów, które dominują w liczbie miejsc ładowania pojazdów elektrycznych znajdują się Holandia, Luksemburg i Niemcy, z kolei Litwa, Grecja czy Polska posiadają takich miejsc najmniej [20].

Prawidłowa alokacja dróg niesie ze sobą liczne korzyści, wśród których można wyróżnić między innymi zapobieganie powstawaniu zatorów w ruchu czy podniesienie atrakcyjności inwestycyjnej i turystycznej terenu. Działania na rzecz zaprojektowania i wybudowania infrastruktury transportu finalnie zwiększają efektywność realizowanych nią różnego rodzaju przewozów. Dlatego też infrastruktura transportowa jest częścią poziomu wydajności logistycznej każdego kraju i realną składową złożonego wskaźnika *LPI* (Indeks Wydajności Logistycznej) [21]. Wartości globalnego indeksu wydajności logistycznej sporządzanego przez Bank Światowy pozwalają zauważyć, że wśród pierwszych 50 spośród 160 porównanych krajów – 23 z nich to państwa pochodzące z obszaru Unii Europejskiej.

Ostatnie dane dotyczące najbardziej aktualnego raporty wskaźnika *LPI* pokazują [22], że indeks ten jest większy niż średnia wartość wskaźnika (na poziomie 3,55 dla krajów europejskich) dla piętnastu krajów europejskich, przy czym najwyższy jego poziom dotyczy Niemiec (4,19), Holandii (4,07), Szwecji (4,07), Belgii (4,05) i Wielkiej Brytanii (4,01). Jednocześnie najniższa wartość indeksu występuje w przypadku Łotwy, Bułgarii i Malty. Analizując opracowany na Światowym Forum Ekonomicznym [23] wskaźnik zadowolenia z jakości infrastruktury transportowej ze względu na uwarunkowania ekonomiczne, obserwuje się że poziom zadowolenia z infrastruktury transportowej jest najwyższy w Holandii (98,2), Niemczech (84,3), Hiszpanii (83,6), Francji (82,6) i Wielkiej Brytanii (81,0). Wskaźnik ten w połączeniu z indeksem *LPI* pozwala wyodrębnić Holandię, Niemcy i Wielką Brytanię jako kraje o najlepszej wydajności całej infrastruktury transportowej. Jednocześnie ocena takiej infrastruktury jest najniższa w przypadku Malty (55,9), Estonii (55,7), Cypru (55,1), Rumunii (54,4) oraz Bułgarii (51,7). Z kolei Cypr, Rumunia i Bułgaria mierzone tymi wskaźnikami identyfikowane są jako kraje o najniższej efektywności posiadanej infrastruktury transportowej.

### 3. INFRASTRUKTURA DROGOWA A ROZWÓJ GOSPODARCZY KRAJU

Funkcjonowanie gospodarki oraz sposób życia społecznego determinują konkretne potrzeby transportowe dotyczące zapewnienia szybkiego i bezpiecznego przemieszczania dóbr i osób. Poziom rozwoju infrastruktury komunikacyjnej obok uwarunkowań społecznych, ekonomicznych i ekologicznych, stanowi jeden z najważniejszych czynników przewagi

points for such vehicles [19]. The European countries that dominate in the number of electric vehicle charging points are the Netherlands, Luxembourg, and Germany, whereas Lithuania, Greece, and Poland have the lowest number of such points [20].

Proper road placement brings many benefits, including preventing of traffic congestion and improving the investment and tourist attractiveness of the area. Activities to design and build transport infrastructure ultimately increase the efficiency of the various modes of transport. Therefore, transport infrastructure is part of each country's logistics performance level and a real component of the complex *LPI* (Logistics Performance Index) [21]. The World Bank's global Logistics Performance Index shows that 23 of the first 50 countries subject to comparison, out of 160, are from the EU.

The latest data on the most recent *LPI* reports show [22] that the index is higher than the average index value (at 3.55 for European countries) for fifteen European countries, with the highest levels for Germany (4.19), the Netherlands (4.07), Sweden (4.07), Belgium (4.05) and the United Kingdom (4.01). At the same time, the lowest index value is found in Latvia, Bulgaria and Malta. When analysing the World Economic Forum's [23] index of satisfaction with the quality of transport infrastructure according to the economic conditions, it is observed that the level of satisfaction with transport infrastructure is highest in the Netherlands (98.2), Germany (84.3), Spain (83.6), France (82.6) and the United Kingdom (81.0). This index, combined with the *LPI*, distinguishes the Netherlands, Germany and the UK as having the best performance of all transport infrastructure. At the same time, the assessment of the infrastructure is lowest for Malta (55.9), Estonia (55.7), Cyprus (55.1), Romania (54.4) and Bulgaria (51.7). On the other hand, Cyprus, Romania and Bulgaria are identified as the countries with the lowest efficiency of their transport infrastructure as measured by these indicators.

### 3. ROAD INFRASTRUCTURE AND NATIONAL ECONOMIC DEVELOPMENT

The functioning of the economy and the way of social life determine specific transport needs to ensure fast and safe flow of goods and people. The level of development of transport infrastructure, apart from social, economic and environmental conditions, is one of the most important factors of a country's competitive advantage in the international market. The development of tourism, migration for employment purposes or improvement of living standards



konkurencyjnej danego kraju na rynku międzynarodowym. Rozwój turystyki, migracje w celach zatrudnienia czy poprawa komfortu życia lokalnych mieszkańców, i co za tym idzie rosnące natężenie ruchu drogowego, wymuszają podejmowanie ciągłych działań na rzecz rozwoju regionalnej infrastruktury transportowej i idącej za tym poprawy sieci połączeń.

Zapewnienie wysokowydajnego transportu drogowego sprzyja międzynarodowej wymianie na wielu płaszczyznach. Poprawie ulega możliwość przemieszczania się siły roboczej, a tym samym zmniejsza się regionalne bezrobocie. Autostrady i drogi ekspresowe jako łącznik między państwami przyczyniają się do napływu nowych inwestycji z zagranicy, umożliwiając rozwój przemysłu i usług. Sieć dróg warunkuje strukturę potoków pasażerskich i towarowych w określonej przestrzeni ekonomicznej na poziomie makrosystemu logistycznego jakim jest obszar kraju i na poziomie mikro czyli mniejszej jednostki terytorialnej. Co więcej transport obejmuje znaczną część kosztów ponoszonych przez firmy i gospodarstwa domowe, a więc zapewnienie lepszej jakości usług transportowych może wpłynąć na minimalizację tych kosztów, a dzięki niższym kosztom transportu można wygenerować oszczędności. Dlatego jednym z wyzwań w sektorze transportu jest tworzenie nowoczesnej i bezpiecznej infrastruktury transportowej o wysokim potencjale redukcji kosztów logistycznych [24].

Ponadto redukcja lub całkowite usunięcie ograniczeń komunikacyjnych wpływa na zmniejszenie zjawiska kongestii, komunikacyjnych „wąskich gardeł” i ostatecznie skraca czas przejazdu. Pozytywne efekty oddziaływania rozbudowanej sieci dróg można obserwować też w wymiarze społecznym poprzez poprawę poziomu mobilności społeczeństwa i zapewnienie tym samym lepszego dostępu do edukacji, opieki zdrowotnej czy nowych miejsc pracy. Położenie geograficzne regionu oraz jego wyposażenie w składniki infrastruktury transportu dróg są ważnym czynnikiem determinującym podejmowanie inwestycji na określonym terenie [25]. Przedsiębiorstwa chętniej zakładają i prowadzą swoją działalność tam, gdzie infrastruktura transportowa jest dobrze rozwinięta i możliwy jest wzrost wymiany zasobów i usług zarówno z kontrahentami wewnątrz kraju jak i poza nim. Jak mówi R. Jedwab i in. [26], współczesny układ przestrzenny działalności gospodarczej zależy od tych wcześniejszych inwestycji infrastrukturalnych. Dzięki temu przedsiębiorstwa eksportujące swoje produkty podnoszą swoją pozycję konkurencyjną na skalę międzynarodową, pozyskując nowe rynki potencjalnych odbiorców i redukując ilość zapasów [27, 28]. Oddziaływanie infrastruktury drogowej obserwuje się także w lepszej terminowości dostaw, łatwości pozyskania materiałów i surowców czy obniżaniu jednostkowych kosztów produkcji. Lepsza

of the local inhabitants, and thus the growing road traffic volume, force taking continuous actions for the development of regional transport infrastructure and the resulting improvement of the connection network.

Providing highly efficient road transport promotes international exchanges on many levels. The mobility of the workforce is improved, thus reducing regional unemployment. Highways and expressways as a link between countries contribute to the inflow of new investments from abroad, enabling the development of industry and services. The road network determines the structure of passenger and goods flows in a specific economic space at the macro-level of the logistic system, which is the area of the country, and at the micro-level, i.e. a smaller territorial unit. Moreover, transport covers a significant part of the costs incurred by companies and households, so providing better transport services can minimise these costs, and due to lower transport costs generate savings. Therefore, one of the challenges in the transport sector is to create a modern and safe transport infrastructure with a high potential for reducing logistics costs [24].

In addition, the reduction or complete removal of traffic restrictions reduces congestion, traffic bottlenecks and ultimately shortens travel time. The positive effects of the expanded road network can also be observed in the social dimension by improving the mobility of the population and thus providing better access to education, health care and new jobs. The geographical location of a region and its road transport infrastructure components are important determinants of undertaking investment projects in a specific area [25]. Companies are more likely to establish and operate where the transport infrastructure is well developed and there is an increase in the exchange of resources and services with both internal and external partners. According to R. Jedwab et al [26], the contemporary spatial arrangement of economic activity depends on previous earlier infrastructural investment projects. In this way, companies exporting their products improve their competitive position internationally by attracting new markets of potential customers and reducing inventories [27, 28]. The impact of road infrastructure is also observed in better timeliness of deliveries, ease of obtaining materials and raw materials or lowering unit production costs. Better performance of road infrastructure translates into a decrease in the cost of transport services and greater availability of these services for businesses [29-31].

wydajność infrastruktury drogowej przekłada się na spadek kosztów usług transportowych i większą dostępność tych usług dla przedsiębiorstw [29-31].

Pośrednie korzyści z rozbudowy sieci drogowej obserwuje się w wymiarze długoterminowym w skali makro. Jest to związane z rozwojem konkurencyjności danego regionu w oparciu o połączenia komunikacyjne, które na skutek zwiększonych inwestycji przyczyniają się do wzrostu budżetu publicznego oraz redukcji bezrobocia na danym terenie. Budowa dróg i autostrad wpływa także pozytywnie na obszar turystyki. Z kolei brak infrastruktury drogowej lub słabe systemy sieci drogowej są barierami dla rolnictwa, przemysłu i handlu oraz mogą utrudniać proces urbanizacji i rozwój społeczno-gospodarczy [32, 33].

Tworzenie sprawnych połączeń transportowych determinuje realizację rozwoju regionalnego i w związku z tym leży także w interesie europejskich krajów. Fundamentem wspólnego funkcjonowania infrastruktury europejskiej są cele i założenia Unii Europejskiej, której działania zmierzają do zapewnienia interoperacyjności krajowych sieci transportowych, wzrostu intermodalności w transporcie, ograniczenia wysokich kosztów przewozu oraz możliwości dostępu do centralnych punktów Europy regionom położonym na jej obrzeżach [34]. Zgodnie z opinią C.P. Ng i inni [35] polityka rozwoju infrastruktury drogowej powinna być wdrażana zgodnie z polityką społeczno-gospodarczą, aby osiągnąć zrównoważony wzrost gospodarczy. Na potwierdzenie tej tezy wykazano także, że pozytywny wpływ rozwoju infrastruktury drogowej na wzrost gospodarczy spada, jeśli tempo rozbudowy dróg jest niewspółmierne do tempa rozwoju innych czynników społeczno-gospodarczych, tj.: kapitał ludzki, surowce, służba zdrowia czy edukacja [36, 37].

## 4. METODOLOGIA BADAWCZA

### 4.1. PROCES BADAWCZY

Celem opracowania było zbadanie wpływu poszczególnych składników infrastruktury drogowej na jej wydajność w aspekcie płynności ruchu przewozowego. W badaniu wykorzystano zestaw narzędzi, które umożliwiły osiągnięcie kompletnych i kompleksowych wyników dotyczących badanego problemu. Rys. 1 prezentuje pełny obraz procesu badawczego, na który składała się przygotowanie danych do dalszych analiz. Celem redukcji wymiaru licznych zmiennych zastosowano analizę czynnikową. Z kolei w celu określenia wpływu składowych infrastruktury drogowej na jej wydajność przeprowadzono wielowymiarową regresję liniową z egzogennymi współzmiennymi. Ostatni etap w oparciu o metodę *k*-średnich miał na celu wyodrębnianie grup krajów podobnych do siebie względem poziomu ogólnej wydajności infrastruktury drogowej.

Indirect benefits from the expansion of the road network are observed on the long-term macro level. This is related to the development of the competitiveness of a given region based on transport connections which, as a result of increased investments, contribute to the growth of the public budget and reduce unemployment in a given area. The construction of roads and highways also has a positive impact on the area of tourism. On the other hand, the lack of road infrastructure or poor road network systems constitute barriers to agriculture, industry and trade and can impede the urbanization process and socio-economic development [32, 33].

The creation of efficient transport connections determines regional development; therefore, it is also in the interest of European countries. The common functioning of European infrastructure is based on the aims and assumptions of the European Union to ensure the interoperability of national transport networks, the increase in intermodality in transport, the reduction of high transport costs and the possibility of access to the central points of Europe for regions located on its periphery [34]. According to C.P. Ng et al. [35] road infrastructure development policies should be implemented in line with socio-economic policies to achieve sustainable economic growth. To confirm this thesis, it has been also shown that the positive impact of road infrastructure development on economic growth decreases if the rate of road expansion is disproportionate with the rate of development of other socio-economic factors such as human capital, raw materials, health care or education [36, 37].

## 4. RESEARCH METHODOLOGY

### 4.1. THE RESEARCH PROCESS

The aim of this study is to assess the influence of individual road infrastructure components on their performance in terms of traffic flow. The study used a set of tools that enabled the achievement of complete and comprehensive results on the investigated issue. Fig. 1 presents a complete picture of the research process, which consisted of data preparation for further analysis. Factor analysis was used to reduce the dimension of numerous variables. In turn, multiple linear regression with exogenous co-variables was conducted to determine the effect of road infrastructure components on performance. The final stage, based on the *k*-means method, was to extract groups of countries similar to each other in terms of the level of overall road infrastructure performance.

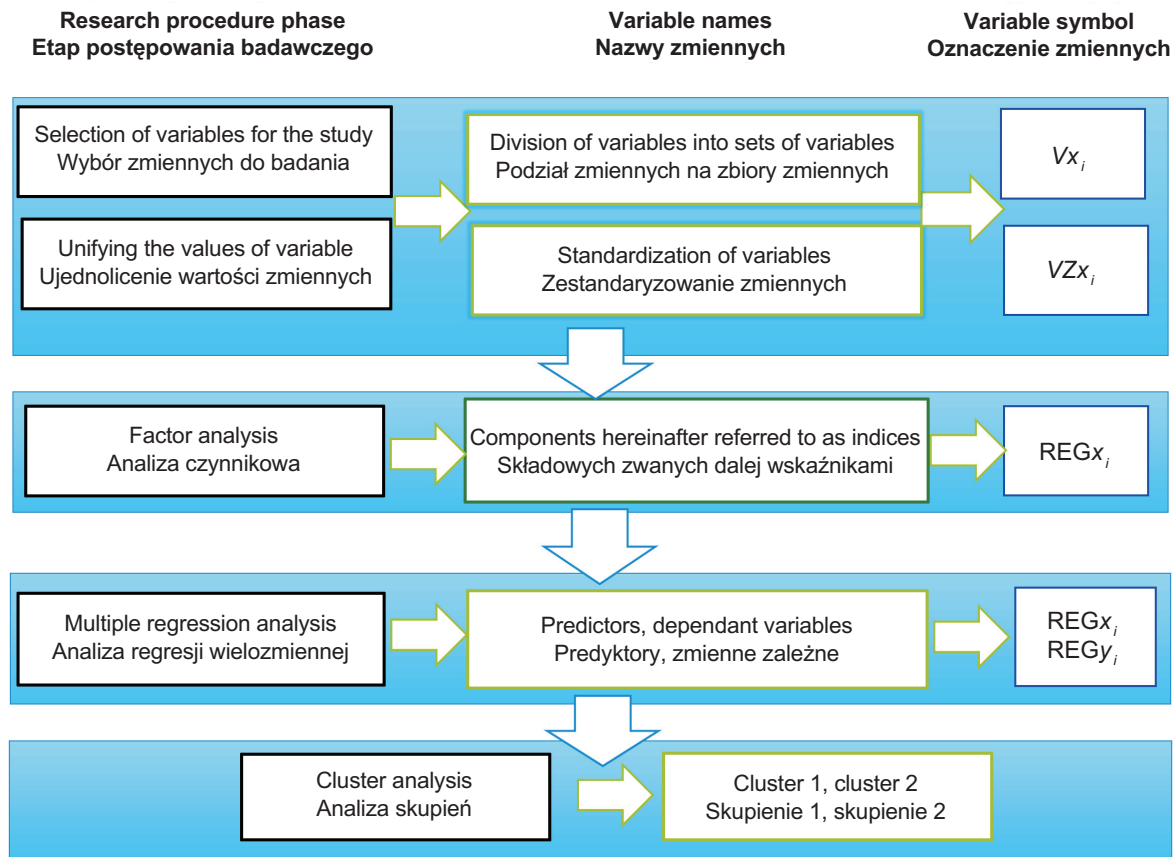


Fig. 1. Research process diagram  
Rys. 1. Schemat procesu badawczego

W pracy rozważono kilka hipotez badawczych. Hipoteza główna zakłada, że uwarunkowania techniczne, organizacyjne i finansowe wpływają na wydajność sieci drogowej. W ramach hipotezy głównej wyodrębniono hipotezy szczegółowe:

1. Uwarunkowania techniczne, organizacyjne i finansowe wpływają na wielkość przewożonego tonażu.
2. Uwarunkowania techniczne, organizacyjne i finansowe wpływają na ruch drogowy na terenie kraju.
3. Uwarunkowania techniczne, organizacyjne i finansowe wpływają na przepustowość sieci.
4. Uwarunkowania techniczne, organizacyjne i finansowe wpływają na zatory na drogach.

#### 4.2. BAZA DANYCH I ZMIENNYCH

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę zbadania wpływu różnych czynników technicznych, organizacyjnych i finansowych infrastruktury drogowej na poziom jej wydajności sieci drogowej. W tym celu zidentyfikowano i przeanalizowano możliwie największą liczbę cech charakteryzujących

The article considers several research hypotheses. The main hypothesis is that technical, organizational and financial conditions affect the performance of the road network. Within the main hypothesis, specific hypotheses were distinguished:

1. Technical, organisational and financial conditions affect the volume of tonnage transported.
2. Technical, organizational and financial conditions affect the traffic on the territory of the country.
3. Technical, organisational and financial conditions affect network capacity.
4. Technical, organisational and financial conditions affect the traffic jams.

#### 4.2. DATABASE AND VARIABLES

This study attempts to investigate the impact of various technical, organizational and financial factors of road infrastructure on the road network performance level. For this purpose, as many features of the road infrastructure

infrastrukturę drogową w Unii Europejskiej. Baza danych powstała na podstawie licznych raportów unijnych, baz statystycznych oraz innych raportów dotyczących infrastruktury drogowej na terenie Europy. Dane pochodziły z głównej bazy statystycznej Eurostat oraz z różnych raportów opracowanych w ramach działalności Unii Europejskiej, tj.: Overview of transport infrastructure expenditures and costs [38], Study on Safe and Secure Parking Places for Trucks [39], TEN-T Core Network Corridors Atlantic Corridor [40], Drogowa sieć bazowa UE [41], Trans-European Road Network, TEN-T (Roads): Performance Report [42], Saving Lives Assessing and Improving TEN-T Road Network Safety [43], które pozwoliły zgromadzić informacje dotyczące łącznie 28 krajów będących członkami UE. W analizie uwzględniono ostatni dostępny okres wyszukanych danych, tak aby baza danych była jak najbardziej aktualna i przyniosła najbardziej wiarygodne wyniki przeprowadzonych analiz statystycznych. W wybranych przypadkach dane zostały uśrednione lub ograniczone do najbardziej aktualnego okresu (stan na rok 2021). Z uwagi na różnorodność źródeł danych, w przypadku niektórych badanych krajów odnotowano braki danych, co nie przeszkodziło jednak w przeprowadzeniu analizy badawczej. W tym celu dokonano oceny błędu braku odpowiedzi poprzez zastosowanie testu Kołmogorowa-Smirnowa (K-S) [44]. Otrzymane wyniki pozwoliły stwierdzić, że nie ma istotnych różnic między zmiennymi z brakami danych i bez nich, dlatego przyjęto, że błąd braku odpowiedzi nie stanowi problemu w dalszej kontynuacji badania.

Do wstępnego badania wskazano 35 zmiennych, które charakteryzują europejską infrastrukturę drogową w czterech wymiarach. Pierwsze trzy wymiary, tj.: techniczny, organizacyjny i finansowy identyfikuje się jako obszary, które mogą mieć wpływ na wydajność unijnej europejskiej sieci drogowej. Z kolei w obszarze wydajności zidentyfikowano kilka zmiennych, które można identyfikować jako potencjalne wyniki funkcjonowania tej sieci. Opis zmiennych i ich oznaczenie w badaniu przedstawiono w Tabl. 1-4.

### 4.3. STANDARYZACJA DANYCH

Z uwagi na to, że zawarte w bazie dane pochodzą z różnych źródeł i wyrażone są w różnych jednostkach, kolejnym krokiem procesu badawczego była ich standaryzacja. Standaryzacja używana jest do wykrywania zmiennych odstających, obliczenia siły efektu (np. współczynnika  $d$  Cohena jako wystandardyzowanej różnicy między średnimi) oraz wykonywana jako etap wstępnego przetwarzania przed wieloma modelami uczenia maszynowego (m.in.  $k$ -średnich, grupowania, algorytmem regresji Lasso) [45]. Proces ten stanowi wstępny etap przetwarzania i umożliwi porównanie zmiennych między sobą. Dla przyjmowanego  $p = 1$  na skutek standaryzacji

in the European Union as possible were identified and analysed. The database is based on numerous EU reports, statistical databases and other reports on road infrastructure in Europe. The data came from the main statistical database Eurostat and from various reports produced within the framework of the European Union activities, i.e.: Overview of transport infrastructure expenditures and costs [38], Study on Safe and Secure Parking Places for Trucks [39], TEN-T Core Network Corridors Atlantic Corridor [40], EU Road Core Network [41], Trans-European Road Network, TEN-T (Roads): Performance Report [42], Saving Lives Assessing and Improving TEN-T Road Network Safety [43], which enabled to collect information on a total of 28 EU Member States. The analysis took into account the latest available period of retrieved data, so that the database was as up-to-date as possible and yielded the most reliable results of the statistical analyses performed. In selected cases, data were averaged or limited to the most recent period (as of 2021). Due to the diversity of data sources, data shortages were noted for some of the countries studied, but this did not prevent the research analysis. For this purpose, non-response error was assessed by applying the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test [44]. The results obtained concluded that there were no significant differences between the variables with and without missing data, so it was assumed that the non-response error was not a problem for the further continuation of the study.

For the initial study, 35 variables were identified that characterize the European road infrastructure in four dimensions. The first three dimensions, i.e. technical, organisational and financial, are identified as areas that may affect the performance of the EU road network. In the area of performance, on the other hand, several variables were identified that can be identified as potential outcomes of this network. The description of the variables and their designation in the study are presented in Tables 1-4.

### 4.3. DATA STANDARDISATION

Due to the fact that the data contained in the database come from different sources and are expressed in different units, the next step of the research process was to standardize them. Standardization is used to detect outlier variables, calculate the strength of the effect (e.g. Cohen's  $d$  coefficient as the standardized difference between means), and performed as a preprocessing step before many machine learning models (e.g.  $k$ -means, clustering, Lasso regression algorithm) [45]. This process is the initial processing step and will allow variables to be compared to each other. For the assumed  $p = 1$  due to standardization, transformed  $Z$ -values were obtained [46].



otrzymano przekształcone wartości  $Z$  ( $Z$ -values) [46]. Przeprowadzona standaryzacja nie wpływa na skośność (asymetrię) i kurtozę zmiennych. Jednocześnie ograniczyła ona większość wartości zmiennych do przedziału  $[-3, 3]$  oraz ustaliła ich średnią na poziomie 0, a odchylenie standardowe na poziomie 1.

The performed standardization does not affect skewness (asymmetry) and kurtosis of variables. At the same time, it restricted most of the values of the variables to the range  $[-3, 3]$  and fixed their mean at 0 and standard deviation at 1.

Table 1. Data illustrating the technical dimension of road infrastructure  
Tablica 1. Dane obrazujące techniczny wymiar infrastruktury drogowej

| Variable full name<br>Pełna nazwa zmiennej   | Unit of measurement<br>Jednostka miary | Designation<br>Oznaczenie |
|--|--|---------------------------|
| Road quality / Jakość dróg   | Scoring / Ocena punktowa               | V2                        |
| Completion of the TEN-T core road network / Zakończenie budowy drogowej sieci bazowej TEN-T  | %                                      | V6                        |
| Length of road infrastructure network / Długość sieci infrastruktury drogowej  | Kilometers / Kilometry                 | V9                        |
| Length of other roads by road category / Długość innych dróg według kategorii dróg   | Kilometers / Kilometry                 | V13                       |
| Length of motorways and e-roads / Długość autostrad i e-dróg   | Kilometers / Kilometry                 | V14                       |
| Length of TEN-T core network / Długość sieci bazowej TEN-T   | Kilometers / Kilometry                 | V21                       |
| Length of TEN-T network outside the core network / Długości sieci TEN-T poza siecią bazową   | Kilometers / Kilometry                 | V22                       |
| Length of bridges in relation to total length of the national TEN-T network / Długość mostów w stosunku do całkowitej długości krajowej sieci TEN-T  | %                                      | V24                       |
| Length of tunnels as share of the total length of TEN-T national roads consisting of tunnels / Długość tuneli jako udział w całkowitej długości dróg krajowych TEN-T składających się z tuneli | %                                      | V25                       |
| Length of TEN-T network by number of lanes / Długość sieci TEN-T według liczby pasów ruchu   | Kilometers / Kilometry                 | V35                       |

Table 2. Data illustrating the organizational dimension of road infrastructure  
Tablica 2. Dane obrazujące organizacyjny wymiar infrastruktury drogowej

| Variable full name<br>Pełna nazwa zmiennej  | Unit of measurement<br>Jednostka miary | Designation<br>Oznaczenie |
|---|--|---------------------------|
| Electric vehicle charging points / Punkty ładowania pojazdów elektrycznych  | Number / Liczba                        | V5                        |
| Execution rate of the current core network / Wskaźnik realizacji aktualnej sieci bazowej  | %                                      | V18                       |
| ITS breakdown by level for each participating country – total length / Rozkład ITS według poziomu dla każdego uczestniczącego kraju – całkowita długość | Kilometers / Kilometry                 | V26                       |
| Rest areas for truck drivers / Miejsca odpoczynku kierowców ciężarówek  | Number / Liczba                        | V30                       |
| Total length of network with resting area data / Całkowita długość sieci z danymi obszaru odpoczynku  | Kilometers / Kilometry                 | V31                       |
| Number of stops with facilities for truck drivers / Liczba postojów z udogodnieniami dla kierowców ciężarówek   | Number / Liczba                        | V32                       |
| Electric vehicle charging stations / Stacje ładowania pojazdów elektrycznych  | Number / Liczba                        | V33                       |
| Number of petrol stations / Liczba stacji benzynowych   | Number / Liczba                        | V34                       |

#### 4.4. FACTOR ANALYSIS

Z uwagi na licznosc zmiennych wybranych do badania w kolejnym kroku dokonano zredukowania liczby zmiennych poprzez przeprowadzenie analizy czynnikowej. W tym celu w pierwszej kolejności dla wyodrębnionych zbiorów zmiennych zastosowano współczynniki testujące właściwości macierzy korelacji, tj.: wyznacznik, miara adekwatności doboru próby K-M-O oraz test sferyczności Bartletta. Zgodnie z teorią

#### 4.4. FACTOR ANALYSIS

Due to the number of variables selected for the study, the next step was to reduce the number of variables by conducting factor analysis. For this purpose, first of all, for the separated sets of variables, coefficients were used to test the properties of the correlation matrix, i.e.: denominator, K-M-O measure of sampling adequacy and Bartlett's sphericity test. According to the theory, the determinant should

Table 3. Data illustrating the financial dimension of road infrastructure  
 Tablica 3. Dane obrazujące finansowy wymiar infrastruktury drogowej

| Variable full name<br>Pełna nazwa zmiennej   | Unit of measurement<br>Jednostka miary | Designation<br>Oznaczenie |
|--|--|---------------------------|
| Total road infrastructure costs by vehicle category / Całkowite koszty infrastruktury drogowej według kategorii pojazdu  | One billion Euros<br>Miliard euro      | V7                        |
| Total road infrastructure costs – investment costs / Całkowite koszty infrastruktury drogowej – koszty inwestycji  | One billion Euros<br>Miliard euro      | V8                        |
| Total motorway infrastructure costs by vehicle category / Całkowite koszty infrastruktury autostradowej według kategorii pojazdu   | One billion Euros<br>Miliard euro      | V10                       |
| Investments: smaller projects / Inwestycje: mniejsze projekty  | One million Euros<br>Milion euro       | V11                       |
| ERDF and Cohesion Fund amounts allocated to projects in the 2014-2020 period – margin funds<br>Kwoty środków z EFRR i Funduszu Spójności przydzielone na projekty w okresie 2014-2020 – środki marginesu                               | One million Euros<br>Milion euro       | V19                       |
| ERDF and Cohesion Fund amounts allocated to projects in the 2014-2020 period – funds in the TEN-T core network / Kwoty środków z EFRR i Funduszu Spójności przydzielone na projekty w okresie 2014-2020 – środki w sieci bazowej TEN-T | One million Euros<br>Milion euro       | V20                       |

Table 4. Data illustrating the road infrastructure performance results  
 Tablica 4. Dane obrazujące wyniki wydajności infrastruktury drogowej

| Variable full name<br>Pełna nazwa zmiennej   | Unit of measurement<br>Jednostka miary             | Designation<br>Oznaczenie |
|--|--|---------------------------|
| Timeliness of shipments – horizontal / Terminowość wysyłek – horyzontalnie   | Number / Liczba                                    | V3                        |
| Hours spent in traffic jams per year / Godziny spędzone w zatorach drogowych rocznie   | Number / Liczba                                    | V4                        |
| Movement of motor vehicles on the national territory by registration of vehicles / Ruch pojazdów silnikowych na terytorium kraju przez rejestrację pojazdów  | Number / Liczba                                    | V12                       |
| Road traffic on the national territory by type of road for heavy goods vehicles / Ruch drogowy na terytorium kraju według rodzaju drogi dla samochodów ciężarowych   | One million vehicle-kilometre<br>Milion pojazdokm  | V15                       |
| Summary of annual road freight transport by type of operation / Zestawienie rocznych drogowych przewozów towarowych według rodzaju operacji  | Tonokilometers<br>Tonokilometry                    | V16                       |
| Annual road freight transport by means of transport / Roczny transport drogowy towarów według rodzaju transportu   | Thousand tonnes<br>Tysiące ton                     | V17                       |
| Planned improvement of the capacity of the TEN-T road network / Planowana poprawa przepustowości sieci drogowej TEN-T  | %  | V23                       |
| Distribution of the proportion of truck traffic on the TEN-T network by country where less than 5% = 0; 5% – 10% = 1; 10% – 20% = 2; more than 20% = 3 / Rozkład proporcji ruchu samochodów ciężarowych w sieci TEN-T według kraju gdzie poniżej 5% = 0; 5%-10% = 1; 10%-20% = 2; więcej niż 20% = 3 | Scoring<br>Ocena punktowa                          | V27                       |
| National distribution of truck traffic (AADT) %, where 3000 – 1 = 0; 3000 – 6000 = 2; 6000 – 9000 = 3; more than 9000 = 4 / Krajowy rozkład natężenia ruchu samochodów ciężarowych (AADT) %, gdzie 3000 – 1 = 0; 3000 – 6000 = 2; 6000 – 9000 = 3; więcej niż 9000 = 4                               | Scoring<br>Ocena punktowa                          | V28                       |
| Routing of road transport on the TEN-T road networks / Przebieg transportu drogowego na sieciach drogowych TEN-T   | One billion vehicle-kilometre<br>Miliard pojazdokm | V29                       |
| Estimated percentage of road travel on the TEN-T core network in each country compared to the UN infrastructure safety target / Szacowany odsetek podróży po drogach w sieci bazowej TEN-T w każdym kraju w stosunku do celu ONZ w zakresie bezpieczeństwa infrastruktury                            | %  | V36                       |

Wyznacznik powinien przyjmować niskie wartości, co oznacza że zmienne w zbiorze silnie ze sobą korelują, z kolei wyznacznik bliski 1 oznacza niski poziom korelacji danych [47]. Miara K-M-O określa z kolei stosunek korelacji zmiennych do ich korelacji częściowej [48]. Wartości testu bliskie 1 oznaczają, że można kontynuować analizę czynnikową. Test sferyczności Bartletta sprawdza czy nie ma istotnych korelacji między zmiennymi weryfikując czy macierz korelacji jest macierzą jednostkową [49]. W przypadku istotnego wyniku testu odrzuca się hipotezę zerową i uznaje, że występują korelacje między zmiennymi, czyli występują ukryte czynniki. Wyniki testowania dla czterech zidentyfikowanych zbiorów zmiennych przedstawiono w Tabl. 5.

take low values, which means that variables in the set strongly correlate with each other, while determinant close to 1 means a low level of data correlation [47]. The K-M-O measure, in turn, determines the ratio of the variable correlation to their partial correlation [48]. Test values close to 1 mean that factor analysis can continue. Bartlett's sphericity test checks for significant correlations between variables by verifying that the correlation matrix is a unitary matrix [49]. In case of a significant test result, the null hypothesis is rejected and it is concluded that there are correlations between the variables, that is, there are latent factors. The test results for the four identified sets of variables are presented in Table 5.

Table 5. Results of testing sets of variables before proceeding to analysis of variance  
Tablica 5. Wyniki testowania zbiorów zmiennych przed przystąpieniem do analizy wariancji

| Indication of the set of variables<br>Oznaczenie zbioru zmiennych | Determinant value<br>Wartość wyznacznika | Kaiser-Mayer-Olkin tests<br>Testy Kaisera-Mayera-Olkina |                           | Bartlett's sphericity test<br>Test sferyczności Bartletta |                           |
|---|--|---|---------------------------|---|---------------------------|
|   |  | KMO measure<br>Miara KMO                                | Chi-square<br>Chi-kwadrat | Df  | Significance<br>Istotność |
| 1. Technical / Techniczny   | 0.002                                    | 0.618   | 141.42                    | 45  | 0.000                     |
| 2. Organizational / Organizacyjny                                 | 0.001                                    | 0.683   | 155.45                    | 28  | 0.000                     |
| 3. Financial / Finansowy  | 0.000                                    | 0.618   | 203.41                    | 15  | 0.000                     |
| 4. Performance / Wydajnościowy                                    | 0.000                                    | 0.639   | 174.73                    | 55  | 0.000                     |

Wartość wyznacznika macierzy korelacji jest bardzo dobra dla wszystkich badanych zbiorów zmiennych, ponieważ jest bardzo bliska zeru. Miara K-M-O powyżej 0,6 dla każdego zbioru sygnalizuje zasadność przeprowadzenia analizy czynnikowej. Potwierdza to także istotność testu sferyczności Bartletta, który wykazuje silne zależności między zmiennymi w poszczególnych zbiorach.

The value of the determinant of the correlation matrix is very good for all examined sets of variables as it is very close to zero. The K-M-O measure above 0.6 for each set indicates the validity of conducting a factor analysis. This also confirms the significance of Bartlett's sphericity test, which shows strong correlations between the variables in each set.

Warunkiem przeprowadzenia analizy czynnikowej są zmienne mierzone na skali ilościowej i mierzone za pomocą tej samej jednostki, co spełniono poprzez proces ich standaryzacji we wcześniejszym etapie analizy. Następnie przystąpiono do pierwszego kroku wykonania analizy czynnikowej czyli ustalenia liczby silnie korelujących wiązek zmiennych zwanych dalej składowymi.

The condition for conducting factor analysis is variables measured on a quantitative scale and measured with the same unit, which was fulfilled by the process of their standardization at an earlier stage of analysis. Then the first step of performing factor analysis was undertaken, that is, determining the number of strongly correlating bundles of variables, hereinafter referred to as components.

Z pomocą programu SPSS ustalono liczbę składowych dla poszczególnych zbiorów zmiennych. W tym celu oszacowano wartość własną, która odzwierciedla wielkość wariancji zmiennych wyjaśnianej przez składową. Im większa wartość własna, tym więcej wariancji zostaje wyjaśnionej i tym lepiej dana składowa opisuje dane. W Tabl. 6 zawarto całkowitą wyjaśnioną wariancję dla czterech zbiorów zmiennych. Wartość Alfa Cronbacha [50] została obliczona w celu sprawdzenia wiarygodności danych w ramach każdego nowego konstruktów.

Using SPSS programme, the number of terms for each set of variables was determined. For this purpose, an eigenvalue was estimated that reflects the amount of variance in the variables explained by the component. The greater the eigenvalue, the more variance is explained and the better the component describes the data. Table 6 includes the total explained variance for four sets of variables. The Cronbach Alpha value [50] was calculated to check the reliability of the data within each new construct.

Otrzymane wskaźniki rzetelności kształtowały się na poziomie więcej niż 0,6 (między 0,603 a 0,956), co potwierdza wiarygodność danych [51].

The obtained reliability indices were more than 0.6 (between 0.603 and 0.956), confirming the trustworthiness of the data [51].

Table 6. The total explained variance for four sets of variables  
Tablica 6. Całkowita wyjaśniona wariancja dla czterech zbiorów zmiennych

| Indication of the set of variables<br>Oznaczenie zbioru zmiennych |   | The origins of the eigenvalue<br>Początkowe wartości własne |                           |                               | Sum of squares of the loadings after separation<br>Sumy kwadratów ładunków po wyodrębnieniu |                           |                               |
|---|---|---|---------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|
| Set number<br>Numer zbioru  | Components in the set<br>Składowe w zbiorze | In total<br>Ogółem  | Variance %<br>% wariancji | Cumulative %<br>% skumulowany | In total<br>Ogółem  | Variance %<br>% wariancji | Cumulative %<br>% skumulowany |
| 1   | 1   | 3.649   | 36.495                    | 36.495                        | 3.040   | 30.397                    | 30.397                        |
|   | 2   | 2.055   | 20.551                    | 57.046                        | 1.992   | 19.918                    | 50.315                        |
|   | 3   | 1.214   | 12.138                    | 69.183                        | 1.887   | 18.868                    | 79.183                        |
| 2   | 1   | 3.666   | 45.822                    | 45.822                        | 3.088   | 38.602                    | 38.602                        |
|   | 2   | 1.852   | 23.144                    | 68.966                        | 2.423   | 30.289                    | 68.891                        |
|   | 3   | 1.019   | 12.740                    | 81.706                        | 1.025   | 12.816                    | 81.706                        |
| 3   | 1   | 3.129   | 52.156                    | 52.156                        | 3.128   | 52.138                    | 52.138                        |
|   | 2   | 2.099   | 34.980                    | 87.137                        | 2.100   | 34.999                    | 87.137                        |
| 4   | 1   | 4.419   | 40.176                    | 40.176                        | 2.498   | 22.710                    | 22.710                        |
|   | 2   | 1.661   | 15.102                    | 55.278                        | 2.172   | 19.749                    | 42.458                        |
|   | 3   | 1.248   | 11.344                    | 66.621                        | 1.979   | 17.990                    | 60.449                        |
|   | 4   | 1.028   | 9.350                     | 75.971                        | 1.707   | 15.522                    | 75.971                        |

W oparciu o wartości początkowe, zidentyfikowano składowe - inaczej trzy związki silnie skorelowanych ze sobą zmiennych - w poszczególnych ich zbiorach. Kolumna % skumulowany określa jak silne są te składowe, a więc ile procent zmienności wszystkich zmiennych wyjaśnia wybrana liczba wyodrębnionych składowych. Kolejno za pomocą dwóch składowych w zbiorze 1 można wyjaśnić 79% zmienności wszystkich danych w tym zbiorze. Za pomocą trzech składowych w zbiorze 2 można wyjaśnić 81% zmienności wszystkich danych w tym zbiorze. Dwie składowe wyjaśniają 87% zmienności danych w 3 zbiorze zmiennych. W zbiorze 4 zmienność danych można określić za pomocą czterech składowych, które wyjaśniają łącznie 75% zmienności danych.

W kolejnym etapie w celu zidentyfikowania, które zmienne w ramach poszczególnych zbiorów tworzą składowe, wybrano procedurę rotacji czynników Varimax, która powoduje maksymalizację dopasowania poszczególnych danych do wyodrębnionych składowych. W oparciu o wartości ładunków czynnikowych dla każdej zmiennej otrzymano informacje (Tabl. 7), które z nich są ze sobą silnie skorelowane i tworzą składowe.

W oparciu o uzyskane wyniki, 31 zmiennych spośród 35 zidentyfikowanych w odniesieniu do charakterystyki unijnej infrastruktury drogowej, utworzyło łącznie 12 składowych

Based on the initial values, components were identified otherwise three bundles of strongly correlated variables in their respective sets. The cumulative % column indicates how strong these components are, that is, what percentage of the variation in all variables is explained by the selected number of extracted components. Consecutively, the two components in set 1 can explain 79% of the variation in all the data in that set. The three components in set 2 can be used to explain 81% of the variation in all the data in that set. Two components explain 87% of the variation in the data in variable set 3. In variable set 4, the variation in the data can be determined by four components that explain a total of 75% of the variation in the data.

In the next step, in order to identify which variables within individual set form components, the Varimax factor rotation procedure was selected, which maximizes the adjustment of individual data to the extracted components. Based on the values of factor loadings for each variable, information was obtained (Table 7), which of them are strongly correlated with each other and form components.

Based on the results, 31 variables out of 35 ones identified in relation to EU road infrastructure characteristics constitute a total of 12 components otherwise known as factors. These variables form components and correlate with each



zwanych inaczej czynnikami. Zmienne te tworzą składowe i korelują ze sobą na poziomie co najmniej 0,7, czyli mają ładunki czynnikowe tej wielkości lub wyższe. Pozostałe cztery zmienne, tj.: ZV9 (Długość sieci infrastruktury drogowej), ZV11 (Inwestycje: mniejsze projekty drogowe), ZV29 (Przebieg w transporcie drogowym w sieciach TEN-T) oraz ZV4 (Godziny spędzone w zatorach drogowych rocznie) – z uwagi na to że nie korelowały silnie z dwoma i więcej zmiennymi, usunięto z dalszej analizy.

other at a level of at least 0.7, that is, they have factor loadings of this magnitude or higher. The other four variables, i.e.: ZV9 (Length of road infrastructure network), ZV11 (Investment projects: minor road projects), ZV29 (Road transport mileage in TEN-T networks) and ZV4 (Hours spent in congestion per year) – were removed from further analysis since they did not correlate strongly with two or more variables.

Table 7. Rotated component matrix for all sets of component variables

Tablica 7. Macierz rotowanych składowych dla wszystkich zbiorów zmiennych składowych

| Area<br>Obszar                  | Component number<br>Numer składowej | Component name<br>Nazwa składowej   | Variables correlated with each other<br>Zmienne skorelowane ze sobą |
|---------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Technical<br>Techniczny         | 1                                   | Length of roads / Długość dróg  | ZV13, ZV14, ZV21, ZV22, ZV35  |
|                                 | 2                                   | Condition of roads / Stan dróg  | ZV2, ZV6  |
|                                 | 3                                   | Engineering structures / Obiekty inżynieryjne   | ZV24, ZV25  |
| Organizational<br>Organizacyjny | 4                                   | Facilities for transport implementation / Udogodnienia dla realizacji transportu  | ZV26, ZV30, ZV31  |
|                                 | 5                                   | Supply/Fuelling-up points / Punkty poboru zasilania/tankowania  | ZV32, ZV33, ZV34  |
|                                 | 6                                   | Level of road network development / Poziom rozwoju sieci dróg   | ZV5, ZV18   |
| Financial<br>Finansowy          | 7                                   | Road infrastructure costs / Koszty infrastruktury drogowej  | ZV7, ZV8, ZV10  |
|                                 | 8                                   | ERDF and Cohesion Fund amounts allocated to projects in the 2014-2020 period / Kwoty środków z EFRR i Funduszu Spójności przydzielone na projekty drogowe w okresie 2014-2020 | ZV19, ZV20  |
| Performance<br>Wydajnościowy    | 9                                   | Tonnage to be transported / Wielkość przewożonego tonażu  | ZV17, ZV16  |
|                                 | 10                                  | Road traffic within the country / Ruch drogowy na terenie kraju   | ZV12, ZV15  |
|                                 | 11                                  | Network capacity / Przepustowość sieci  | ZV23, ZV27, ZV28  |
|                                 | 12                                  | Congestion on the roads / Zatory na drogach   | ZV3, ZV36   |

Następnym krokiem obliczeń było utworzenie wskaźników na podstawie informacji o tym, które zmienne tworzą poszczególne składowe. Procedura tworzenia wskaźników uwzględnia różne znaczenie czynników i pozwala oszacować nowe wartości składowych za pomocą innych metod niż sumowanie lub średnia. Należy zdefiniować wartości nowych dwunastu zmiennych składowych, gdzie 8 z nich stanowi wskaźniki odnoszące się do działań na rzecz rozwoju infrastruktury, z kolei 4 ostatnie stanowią wyznacznik jej wydajności. Zmienne tworzące składowe wyrażone są na różnej skali gdzie wartości czynników ładunkowych wykazały duże zróżnicowanie. Niektóre zmienne mają wysoką bezwzględną wartość ładunku czynnikowego, co oznacza, że są nasycone czynnikiem w dużym stopniu, inne znacznie mniej, co znajduje odzwierciedlenie w niższych wartościach ich ładunków czynnikowych. Biorąc pod uwagę to zróżnicowane nasycenie zmiennych czynnikiem, zmienne słabo z nim powiązane mają mniejszy wpływ na poziom wskaźnika, z kolei te silnie nasycone mają zdecydowanie większe znaczenie.

The next step of calculations was to create indices based on information on which variables make up the individual component. The procedure for creating indices takes into account the different importance of factors and allows new component values to be estimated using methods other than summation or average. The values of the new twelve component variables have to be defined, where 8 of them are indices relating to infrastructure development activities, while the last 4 are infrastructure efficiency indicators. The variables that make up the components are expressed on different scales where the values of the loading factors showed great variation. Some variables have a high absolute value of factor loadings, meaning that they are factor saturated to a large extent, others much less so, which is reflected in the lower values of their factor loadings. Taking into account this differential factor saturation of variables, variables that are weakly related to it have less influence on the level of the index, while those that are strongly saturated have much more significance.

Aby określić wewnętrzną strukturę skali, do oszacowania wartości nowych składowych wybrano metodę regresyjną. Otrzymane wartości wskaźników mieszczą się w przedziale  $[-3, 5]$ , gdzie wartości ujemne wskazują, że określana zmienna ma wynik poniżej średniej, bliskie zeru oznaczają wyniki przeciętne, zaś dodatnie wskazują na wysoki poziom zmiennej. Podstawowe statystyki wyodrębnionych składowych prezentuje Tabl. 8.

To determine the internal structure of the scale, the regression method was chosen to estimate the values of the new components. The obtained values of the indices are in the range  $[-3, 5]$ , where negative values indicate that the specified variable has a below the mean, close to zero means average results, while positive values indicate a high level of the variable. Basic statistics of the extracted components are presented in Table 8.

Table 8. Basic descriptive statistics for the extracted components  
Tablica 8. Podstawowe statystyki opisowe dla wyodrębnionych składowych

| Component / Oznaczenie składowej | <i>N</i> | Minimum | Maximum / Maksimum | Mean / Średnia |
|----------------------------------|----------|---------|--------------------|----------------|
| REGR 1                           | 31       | -0.7936 | 3.4703             | 2.1320         |
| REGR 2                           | 31       | -1.5237 | 2.7641             | 0.6202         |
| REGR 3                           | 31       | -0.7720 | 2.4893             | 0.8586         |
| REGR 4                           | 31       | -0.8321 | 3.3143             | 1.2411         |
| REGR 5                           | 31       | -0.5973 | 3.5125             | 1.4576         |
| REGR 6                           | 31       | -1.8390 | 2.7837             | 0.4723         |
| REGR 7                           | 31       | -0.8353 | 2.3917             | 0.7782         |
| REGR 8                           | 31       | -0.3671 | 4.7061             | 2.1695         |
| REGR 9                           | 31       | -0.7039 | 3.3471             | 1.3216         |
| REGR 10                          | 31       | -0.5569 | 3.6879             | 1.5655         |
| REGR 11                          | 31       | -2.0833 | 1.6025             | -0.2404        |
| REGR 12                          | 31       | -2.5777 | 1.3484             | -0.6147        |

#### 4.5. MODEL REGRESJI WIELORAKIEJ

Aby określić stopień wpływu poszczególnych składowych zwanych dalej wskaźnikami na wyniki wydajności infrastruktury, w dalszej części analizy zastosowano metodę regresji wielorakiej. Zgodnie z teorią jest to model, który przewiduje wartość składowej *Y* za pomocą równań [52]:

$$Y = B + \beta x, \quad (1)$$

$$Y = B + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i, \quad (2)$$

gdzie:

*B* – wartość stała,

$\beta$  – standaryzowany współczynnik regresji,

$x_i$  – zmienna niezależna, w której *i* oznacza zbiór zmiennych niezależnych dla  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Model regresji służy dwóm celom: wyjaśnienia zależności między zmienną zależną i jej predyktorami (zmiennie ciągłe, które silnie korelują ze zmienną zależną) oraz przewidywaniu czyli zbudowaniu takiego modelu zależności, który na podstawie pewnych znanych wartości predyktorów pozwoli przewidywać nieznaną wartość zmiennej zależnej. Te dwa cele są rozłączne. Celem tych badań jest zbudowanie modelu, który

#### 4.5. MULTIPLE REGRESSION MODEL

In order to determine the degree of influence of the individual components, hereafter referred to as indices, on infrastructure performance results, the multiple regression method was used in further analysis. According to the theory, it is a model that predicts the value of the *Y* component using formulas [52]:

$$Y = B + \beta x, \quad (1)$$

$$Y = B + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i, \quad (2)$$

where:

*B* – a constant value,

$\beta$  – standardized regression coefficient,

$x_i$  – independent variable, where *i* denotes the set of independent variables for  $i = 1, 2, \dots, n$ .

The regression model serves two purposes: to explain the relationship between the dependent variable and its predictors (continuous variables that strongly correlate with the dependent variable), and to predict, i.e. to build a model of the relationship that, on the basis of certain known values of the predictors, can predict an unknown

najlepiej potrafi wyjaśniać zależność między zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną. Postać tego modelu przyjmuje formę najbardziej ogólną, która w oparciu o najmniejszą liczbę predyktorów pozwoli uzyskać największy wskaźnik  $R^2$ . Można także zbudować model, który najlepiej potrafi objaśniać wartości zmiennej zależnej, czyli przewidywać wartości zmiennej zależnej i który daje najmniejszy błąd oszacowań. Taki model zawiera najczęściej największą liczbę predyktorów.

Kolejnym krokiem badań jest więc zbudowanie najlepszego modelu predykcji wydajności infrastruktury na podstawie działań i wysiłków w nią włożonych przez wybrane kraje unijne czyli określenie w jaki sposób stan infrastruktury, zarządzanie nią oraz jej finansowanie zwiększa wydajność infrastruktury drogowej wyrażonej jako składowe, takie jak: wielkość przewożonego tonażu, ruch drogowy na terenie kraju, przepustowość sieci oraz zatory na drogach. W efekcie powstaną cztery modele dla czterech różnych zmiennych zależnych.

W modelu regresji wskaźniki dotyczące działań na rzecz tworzenia infrastruktury w wymiarze technicznym, organizacyjnym i finansowym (wskaźniki od numeru 1 do 8, co można zapisać we wzorze jako:  $\beta_i$ , gdzie  $i = 1, 2, \dots, 8$ ) stanowią predyktory w tym modelu, z kolei wskaźniki dotyczące wydajności infrastruktury (wskaźniki od numeru 9 do 12, co można zapisać we wzorze jako:  $Y_i$ , gdzie  $i = 9, 10, 11, 12$ ) stanowią zmienne zależne w tym modelu. W pierwszej kolejności zbadano zależności liniowe między zidentyfikowanymi potencjalnymi predyktorami a zmiennymi zależnymi (Tabl. 9). W analizie regresji zakłada się, że korelacje te powinny być jak najsilniejsze, ponieważ warunkuje to ich lepsze wyjaśnienia i przewidywania zjawiska przez model.

value of the dependent variable. The two goals are inseparable. The purpose of this research is to build a model that can best explain the relationship between the independent variables and the dependent variable. The form of this model takes the most general form that will produce the largest  $R^2$  index based on the smallest number of predictors. It is also possible to build a model that can best explain the values of the dependent variable i.e. predict the values of the dependent variable and give the smallest estimation error. Such a model usually contains the largest number of predictors.

The next step of the research is to build the best infrastructure efficiency prediction model on the basis of activities and efforts put into it by selected EU countries, i.e. to determine how the condition of infrastructure, its management and its financing increase the efficiency of road infrastructure expressed as components, i.e.: the volume of transported tonnage, road traffic within the country, network capacity and road congestion. This will result in four models for four different dependent variables.

In the regression model, the indicators for infrastructure creation activities in the technical, organizational and financial dimensions (indices from number 1 to 8 which can be written into the formula as:  $\beta_i$ , where  $i = 1, 2, \dots, 8$ ) are the predictors in this model, while the infrastructure performance indicators (indices from number 9 to 12, which can be written into the formula as:  $Y_i$ , where  $i = 9, 10, 11, 12$ ) are the dependent variables in this model. First, the linear relationships between the identified potential predictors and the dependent variables were examined (Table 9). The regression analysis assumes that these correlations should be as strong as possible, since this determines a better explanation and prediction of the phenomenon by the model.

Table 9. Correlations between identified potential predictors and dependent variables

Tablica 9. Korelacje między zidentyfikowanymi potencjalnymi predyktorami a zmiennymi zależnymi

| Dependent variables / Zmienne zależne |   | Predictors / Predyktory |       |        |       |       |       |       |        |
|---------------------------------------|---|-------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Component number / Numer składowej    |   | 1                       | 2     | 3      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8      |
| 9                                     | Pearson correlation / Korelacja Pearsona      | 0.899                   | 0.253 | -0.008 | 0.765 | 0.382 | 0.017 | 0.685 | 0.400  |
|                                       | Bilateral significance / Istotność dwustronna | 0.000                   | 0.193 | 0.966  | 0.000 | 0.045 | 0.931 | 0.000 | 0.034  |
| 10                                    | Pearson correlation / Korelacja Pearsona      | 0.466                   | 0.515 | 0.224  | 0.430 | 0.075 | 0.480 | 0.515 | -0.131 |
|                                       | Bilateral significance / Istotność dwustronna | 0.012                   | 0.005 | 0.251  | 0.023 | 0.704 | 0.010 | 0.005 | 0.507  |
| 11                                    | Pearson correlation / Korelacja Pearsona      | 0.384                   | 0.334 | -0.113 | 0.209 | 0.146 | 0.402 | 0.224 | 0.174  |
|                                       | Bilateral significance / Istotność dwustronna | 0.044                   | 0.082 | 0.567  | 0.286 | 0.458 | 0.034 | 0.251 | 0.377  |
| 12                                    | Pearson correlation / Korelacja Pearsona      | 0.387                   | 0.110 | 0.482  | 0.224 | 0.287 | 0.547 | 0.285 | 0.187  |
|                                       | Bilateral significance / Istotność dwustronna | 0.042                   | 0.576 | 0.009  | 0.251 | 0.138 | 0.003 | 0.141 | 0.341  |

Red indicates two-sided significance correlation where  $p < 0.05$  / Na czerwono zaznaczono korelację istotną dwustronną, gdzie  $p < 0,05$

Analiza korelacji pomiędzy zmiennymi zależnymi a predyktorami pokazuje, że istnieje liniowa zależność między nimi. W oparciu o tablicę korelacji obserwuje się:

- korelację zmiennej zależnej REGR 9 z predyktorem REGR 1 ( $r = 0,899$  dla  $p < 0,001$ ); REGR 4 ( $r = 0,765$  dla  $p < 0,001$ ); REGR 5 ( $r = 0,382$  dla  $p < 0,5$ ); REGR 7 ( $r = 0,685$  dla  $p < 0,001$ ) oraz REGR 8 ( $r = 0,400$  dla  $p \leq 0,05$ ),
- korelację zmiennej zależnej REGR 10 z predyktorem REGR 1 ( $r = 0,466$  dla  $p < 0,012$ ), REGR 2 ( $r = 0,515$  dla  $p < 0,01$ ); REGR 4 ( $r = 0,430$  dla  $p < 0,5$ ); REGR 6 ( $r = 0,480$  dla  $p < 0,01$ ) oraz REGR 7 ( $r = 0,515$  dla  $p < 0,01$ ),
- korelację zmiennej zależnej REGR 11 z predyktorem REGR 1 ( $r = 0,384$  dla  $p < 0,05$ ) oraz REGR 6 ( $r = 0,402$  dla  $p < 0,05$ ),
- korelację zmiennej zależnej REGR 12 z predyktorem REGR 1 ( $r = 0,387$  dla  $p < 0,05$ ); REGR 3 ( $r = 0,482$  dla  $p < 0,01$ ) oraz REGR 6 ( $r = 0,547$  dla  $p < 0,01$ ).

Metodą wprowadzania zmiennych do analizy otrzymano wyniki dla czterech modeli regresji, które opisano poniżej.

Model regresji 1 dla zmiennej zależnej: REGR 9 i predyktorów: REGR 1, REGR 4, REGR 5, REGR 7 i REGR 8.

Wstępne wyniki badania regresji dla modelu 1 wykazały istotność modelu mniejszą niż 0,05, co oznacza, że jest on istotny statystycznie czyli istotnie lepiej niż losowo pozwala przewidywać wartości zmiennej zależnej. Jednakże wartości statystyki Tolerancji i VIF (ang. *Variance Inflation Factor* – Współczynnik współliniowości), które mówią o współliniowości predyktorów (określane jako pewne zdarzenie, gdzie dwa i/lub więcej predyktorów tak silnie ze sobą korelują, że nie ma możliwości oddzielić ich od siebie, aby określić ich indywidualny wpływ na zmienną zależną, co negatywnie wpływa na oszacowanie regresji) wykazały że:

dla REGR 4  $\Rightarrow$  Tolerancja = 0,299 < 0,5 oraz VIF = 3,344 > 2,

dla REGR 7  $\Rightarrow$  Tolerancja = 0,329 < 0,5 oraz VIF = 3,036 > 2.

Oznacza to, że predyktory te zbyt silnie korelują z innymi, aby móc precyzyjnie określić swój wpływ na zmienną zależną. Racjonalne było usunięcie ich z puli predyktorów i przeprowadzenie ponownej analizy regresji dla pozostałych predyktorów (Tabl. 10).

Tym razem wartości statystyk Tolerancji i VIF zostały zachowane na właściwym poziomie, co oznacza, że możliwa jest ocena znaczenia pozostałych predyktorów na poziomie kształtowania się zmiennej zależnej. Wartość  $R^2 = 0,260$  dla nowej wersji modelu w 26% wyjaśnia wariację zmiennej zależnej w tym modelu czyli wielkości przewożonego tonażu. Test analizy wariacji na poziomie istotności  $p = 0,049$

Correlation analysis between the dependent variables and predictors shows that there is a linear relationship between them. Based on the correlation table, the following are observed:

- correlation of the dependent variable REGR 9 with predictor REGR 1 ( $r = 0.899$  for  $p < 0.001$ ); REGR 4 ( $r = 0.765$  for  $p < 0.001$ ); REGR 5 ( $r = 0.382$  for  $p < 0.5$ ); REGR 7 ( $r = 0.685$  for  $p < 0.001$ ) and REGR 8 ( $r = 0.400$  for  $p \leq 0.05$ ),
- correlation of the dependent variable REGR 10 with the predictors REGR 1 ( $r = 0.466$  for  $p < 0.012$ ), REGR 2 ( $r = 0.515$  for  $p < 0.01$ ); REGR 4 ( $r = 0.430$  for  $p < 0.5$ ); REGR 6 ( $r = 0.480$  for  $p < 0.01$ ) and REGR 7 ( $r = 0.515$  for  $p < 0.01$ ),
- correlation of the dependent variable REGR 11 with the predictors REGR 1 ( $r = 0.384$  for  $p < 0.05$ ) and REGR 6 ( $r = 0.402$  for  $p < 0.05$ ),
- correlation of the dependent variable REGR 12 with predictor REGR 1 ( $r = 0.387$  for  $p < 0.05$ ); REGR 3 ( $r = 0.482$  for  $p < 0.01$ ) and REGR 6 ( $r = 0.547$  for  $p < 0.01$ ).

The method of introducing variables into the analysis yielded results for four regression models described below.

Regression model 1 for the dependent variable: REGR 9 and predictors: REGR 1, REGR 4, REGR 5, REGR 7 and REGR 8.

The preliminary results of the regression test for model 1 showed the significance of the model less than 0.05, which means that it is statistically significant, i.e. significantly better at predicting the values of the dependent variable than random. However, the values of the Tolerance statistic and VIF (Variance Inflation Factor) which tell about multicollinearity of predictors (defined as some event where two and/or more predictors correlate so strongly with each other that it is impossible to separate them from each other to determine their effect on the dependent variable, which negatively affects the regression estimation) showed that:

for REGR 4  $\Rightarrow$  Tolerance = 0.299 < 0.5 and VIF = 3.344 > 2,

for REGR 7  $\Rightarrow$  Tolerance = 0.329 < 0.5 and VIF = 3.036 > 2.

This means that these predictors correlate too strongly with others to accurately determine their effect on the dependent variable. It was rational to remove them from the pool of predictors and run the regression analysis again for the remaining predictors (Table 10).

This time, the values of the Tolerance and VIF statistics were maintained at the appropriate level, which means that it is possible to assess the significance of the remaining



pokazuje, że model jest istotny statystycznie. Istotność testuje hipotezę, że dany predyktor znacząco różni się od zera czyli nie przypadkowo wpływa na zmienną zależną, co można zapisać jako  $\beta \neq 0$ . Aby spełnić ten warunek  $p < 0,05$ , co oznacza że dany predyktor jest statystycznie istotny. Jednocześnie istotność dla predyktora REGR 5, gdzie  $p = 0,147$  nie jest istotna statystycznie dla wielkości przewożonego tonażu. Wykluczenie z analizy tego predyktora i przeprowadzenie ponownie analizy regresji (Tabl. 11) pozwoliło zaktualizować w modelu wartości współczynnika  $\beta$ .

Table 10. Coefficients of model 1 for dependent variable REGR 9 after collinearity tests  
Tablica 10. Współczynniki modelu 1 dla zmiennej zależnej REGR 9 po badaniu współliniowości

| Specification<br>Wyszczególnienie | Non-standardised coefficients<br>Współczynniki niestandardyzowane |                                    | Standardised coefficients<br>Współczynniki standaryzowane | <i>t</i> | <i>p</i> | Collinearity statistics<br>Statystyki współliniowości |       |
|-----------------------------------|---|------------------------------------|---|----------|----------|---|-------|
|                                   | <i>B</i>  | Standard error<br>Błąd standardowy | $\beta$   |          |          | Tolerance<br>Tolerancja                               | VIF   |
| (Constant / Stała)                | 3.617   | 0.172                              | –   | 0.000    | 1.000    | –   | –     |
| REGR 1                            | 0.470   | 0.180                              | 0.470   | 2.612    | 0.015    | 0.950   | 1.052 |
| REGR 5                            | 0.110   | 0.216                              | –0.110  | 0.507    | 0.147    | 0.658   | 1.520 |
| REGR 8                            | 0.248   | 0.213                              | 0.248   | 1.166    | 0.049    | 0.683   | 1.464 |

Table 11. Coefficients of model 1 for dependent variable REGR 9 after excluding insignificant predictors  
Tablica 11. Współczynniki modelu 1 dla zmiennej zależnej REGR 9 po wykluczeniu nieistotnych predyktorów

| Specification<br>Wyszczególnienie | Non-standardised coefficients<br>Współczynniki niestandardyzowane |                                    | Standardised coefficients<br>Współczynniki standaryzowane | <i>t</i> | <i>p</i> | Collinearity statistics<br>Statystyki współliniowości |       |
|-----------------------------------|---|------------------------------------|---|----------|----------|---|-------|
|                                   | <i>B</i>  | Standard error<br>Błąd standardowy | $\beta$   |          |          | Tolerance<br>Tolerancja                               | VIF   |
| (Constant / Stała)                | 3.912   | 0.190                              | –   | 0.000    | –        | –   | –     |
| REGR 1                            | 0.488   | 0.174                              | 0.488   | 2.801    | 0.010    | 0.986   | 1.014 |
| REGR 8                            | 0.188   | 0.174                              | 0.387   | 1.079    | 0.044    | 0.986   | 1.014 |

Wartość nowego testu ANOVA wyniosła 0,026, a wartości statystyk Tolerancji i VIF mieszczą się w wymaganej normie. Wartość  $R^2 = 0,252$  dla nowej wersji modelu w 25% wyjaśnia wariancję zmiennej zależnej w tym modelu czyli wielkości przewożonego tonażu. Oba predyktory są istotne statystycznie. Jednocześnie wartość  $\beta$  między predyktorami a zmienną zależną jest dodatnia. Im większa jest długość zbudowanych dróg (REGR 1) oraz większy jest poziom dofinansowania projektów drogowych (REGR 8), tym większy jest poziom przewożonego tonażu w badanej sieci drogowej. Jednocześnie wartości  $\beta = 0,488$  i  $\beta = 0,387$  oznaczają umiarkowaną zależność między długością dróg a przewożonym tonażem i między poziomem finansowania a przewożonym tonażem. Długość dróg ma jednocześnie większe znaczenie przy

predictors at the level of shaping the dependent variable. The value of  $R^2 = 0.260$  for the new version of the model explains 26% of the variance of the dependent variable in this model, i.e. the amount of tonnage transported. The analysis of the variance test at the significance level of  $p = 0.049$  shows that the model is statistically significant. Significance tests the hypothesis that a given predictor is significantly different from zero, i.e. does not randomly affect the dependent variable, which can be written as  $\beta \neq 0$ . To meet this condition  $p < 0.05$ , which means that the given predictor is statistically significant. At the same time, the significance for the predictor REGR 5, where  $p = 0.147$  is not statistically significant for the volume of transported tonnage. Excluding this predictor from the analysis and running the regression analysis again (Table 11) allowed to update the values of  $\beta$  coefficient in the model.

The value of the new ANOVA test was 0.026 and the values of the Tolerance and VIF statistics are within the required standard. The value of  $R^2 = 0.252$  for the new version of the model explains 25% of the variance of the dependent variable in this model, i.e. the amount of tonnage transported. Both predictors are statistically significant. At the same time, the value of  $\beta$  between the predictors and the dependent variable is positive. The greater the length of roads built (REGR 1) and the greater the level of co-financing of road projects (REGR 8), the higher the level of tonnage transported in the investigated road network. At the same time, the values  $\beta = 0.488$  and  $\beta = 0.387$  indicate a moderate relationship between road length and tonnage transported as well as between the

wyjaśnianiu wielkości przewożonych transportem drogowym dóbr niż poziom unijnego finansowania. Ostateczny model regresji dla zmiennej zależnej REGR 9 można zapisać jako:

$$\text{Model 1} \Rightarrow Y_{REGR\ 9} = 3,912 + 0,488 x_{REGR\ 1} + 0,188 x_{REGR\ 8}.$$

Przeprowadzona analiza regresji wskazała, że długość dróg oraz źródło finansowania ich budowy pozwalają wyjaśnić około 25% zróżnicowania czyli wariancji wielkości przewożonego tonażu ( $R^2 = 0,252$ ), a model predykcji jest znacząco lepszy od przypadkowego ( $F(2, 25) = 4,210$ ;  $p < 0,05$ ), gdzie przeciętny błąd przy szacowaniu wielkości przewożonego ładunku wynosi  $S.E. = 0,32$ .

W dalszej części badań przedstawiono pozostałe trzy modele regresji z uproszczonymi wynikami (po wykluczeniu wskaźników silnie korelujących z pozostałymi w zbiorze), które prezentują najważniejsze wartości opisujące badane zależności.

Wartości modelu regresji 2 dla zmiennej zależnej REGR 10 i predyktorów: REGR 1, REGR 2, REGR 4, REGR 6 zaprezentowano w Tabl. 12.

Table 12. Coefficients of model 2 for dependent variable REGR 10

Tablica 12. Współczynniki modelu 2 dla zmiennej zależnej REGR 10

| Specification / Wyszczególnienie                                 | B     | Standard error / Błąd standardowy | $\beta$ | p     |
|--|-------|-----------------------------------|---------|-------|
| (Constant / Stała)   | 1.231 | 0.157                             | –       | –     |
| REGR 1   | 0.326 | 0.121                             | 0.211   | 0.042 |
| REGR 2   | 0.208 | 0.282                             | 0.208   | 0.001 |
| REGR 4   | 0.419 | 0.340                             | 0.419   | 0.012 |
| REGR 6   | 0.286 | 0.277                             | 0.286   | 0.046 |
| $R^2 = 0.435$ ; $F(5, 22) = 3.392$ ; $p < 0.05$ ; $S.E. = 0.316$ |       |                                   |         |       |

Model 2 uwzględnia ostatecznie cztery predyktory i istotnie lepiej pozwala przewidywać ruch drogowy na terenie kraju, o czym świadczy wartość  $R^2 = 0,435$  dla  $p = 0,034$ . Model ten jest dobrze dopasowany do danych  $F(5, 22) = 3,392$ ;  $p < 0,05$ . Wszystkie predyktory pozwalają w istotny sposób przewidywać poziom zmiennej zależnej, choć obserwuje się, że udogodnienia dla realizacji transportu są silniejszym predyktorem ( $\beta = 0,419$ ) niż pozostałe. Interpretując uzyskane wartości współczynników, można stwierdzić że im dłuższe drogi, lepszy ich stan, dostępne udogodnienia dla kierowców oraz ogólny poziom rozwoju dróg, tym płynniejszy jest ruch drogowy na terenie kraju. Model można zapisać w postaci:

$$\text{Model 2} \Rightarrow Y_{REGR\ 10} = 1,231 + 0,326 x_{REGR\ 1} + 0,208 x_{REGR\ 2} + 0,419 x_{REGR\ 4} + 0,286 x_{REGR\ 6}.$$

level of financing and tonnage transported. At the same time, road length is more important than the level of EU funding in explaining the volume of goods transported by road. The final regression model for the dependent variable REGR 9 can be written as:

$$\text{Model 1} \Rightarrow Y_{REGR\ 9} = 3.912 + 0.488 x_{REGR\ 1} + 0.188 x_{REGR\ 8}.$$

The regression analysis indicated that the length of the roads and the source of financing of their construction explain about 25% of the variation, i.e. variance, in the amount of tonnage transported ( $R^2 = 0.252$ ), and the prediction model is significantly better than the random model ( $F(2, 25) = 4.210$ ;  $p < 0.05$ ), where the average error in estimating the amount of freight transported is  $S.E. = 0.32$ .

The remaining three regression models with simplified results (after exclusion of indices that strongly correlate with the others in the set), which present the most important values describing the investigated dependencies, are presented in the next part of the research.

Regression model 2 values for the dependent variable REGR 10 and predictors: REGR 1, REGR 2, REGR 4, REGR 6 are presented in Table 12.

Model 2 ultimately takes into account the four predictors and is significantly better at predicting traffic in the country, as evidenced by the value of  $R^2 = 0.435$  for  $p = 0.034$ . This model is well adjusted to the data  $F(5, 22) = 3.392$ ;  $p < 0.05$ . All predictors significantly predict the level of the dependent variable, although it is observed that facilities for transport implementation are a stronger predictor ( $\beta = 0.419$ ) than the others. Interpreting the obtained values of coefficients, it can be concluded that the longer the roads, the better their condition, the facilities for drivers available and the better the general level of road development, the smoother the road traffic in the country. The model can be expressed in the form:

$$\text{Model 2} \Rightarrow Y_{REGR\ 10} = 1.231 + 0.326 x_{REGR\ 1} + 0.208 x_{REGR\ 2} + 0.419 x_{REGR\ 4} + 0.286 x_{REGR\ 6}.$$

Wartości modelu regresji 3 dla zmiennej zależnej: REGR 11 i predyktorów: REGR 1 i REGR 6 zawarto w Tabl. 13.

Regression model 3 values for the dependent variable: REGR 11 and predictors: REGR 1 and REGR 6 are included in Table 13.

Table 13. Coefficients of model 3 for dependent variable REGR 11  
Tablica 13. Współczynniki modelu 3 dla zmiennej zależnej REGR 11

| Specification / Wyszczególnienie                                 | <i>B</i> | Standard error / Błąd standardowy | $\beta$ | <i>p</i> |
|--|----------|-----------------------------------|---------|----------|
| (Constant / Stała)   | 2.123    | 0.179                             | -       | -        |
| REGR 1   | 0.375    | 0.299                             | 0.342   | 0.012    |
| REGR 6   | 0.163    | 0.278                             | 0.142   | 0.044    |
| $R^2 = 0.173$ ; $F(2, 25) = 2.612$ ; $p < 0.05$ ; $S.E. = 0.112$ |          |                                   |         |          |

Model 3 uwzględniający dwa predyktory istotnie lepiej pozwala przewidywać przepustowość sieci, o czym świadczy wartość  $R^2 = 0,173$  dla  $p = 0,042$ . Model ten jest dobrze dopasowany do danych  $F(2, 25) = 2,612$ ;  $p < 0,05$ . Oba predyktory pozwalają w istotny sposób przewidywać poziom zmiennej zależnej, choć długość dróg jest silniejszym predyktorem ( $\beta = 0,342$ ) niż środki unijne wydatkowane na rozwój infrastruktury ( $\beta = 0,142$ ). Interpretując uzyskane wartości współczynników można stwierdzić, że im dłuższe drogi oraz większe poniesione inwestycje na rozwój infrastruktury, tym większa jest przepustowość sieci. Model można zapisać w postaci:

$$\text{Model 3} \Rightarrow Y_{REG\ 9} = 2,123 + 0,375 x_{REG\ 1} + 0,163 x_{REG\ 6}.$$

Wartości modelu regresji 4 dla zmiennej zależnej: REGR 12 i predyktorów: REGR 3 i REGR 6 przedstawiono w Tabl. 14.

Model 3, taking into account the two predictors, is significantly better at predicting through capacity, as evidenced by the value of  $R^2 = 0.173$  for  $p = 0.042$ . This model is well adjusted to the data  $F(2, 25) = 2.612$ ;  $p < 0.05$ . Both predictors can significantly predict the level of the dependent variable, although the length of roads is a stronger predictor ( $\beta = 0.342$ ) than EU funds spent on infrastructure development ( $\beta = 0.142$ ). Interpreting the values of the obtained coefficients, it can be concluded that the longer the roads and the greater the investment in infrastructure development, the greater the capacity of the network. The model can be expressed in the form:

$$\text{Model 3} \Rightarrow Y_{REG\ 9} = 2.123 + 0.375 x_{REG\ 1} + 0.163 x_{REG\ 6}.$$

Regression model 4 values for the dependent variable: REGR 12 and predictors: REGR 3 and REGR 6 are included in Table 14.

Table 14. Coefficients of model 4 for dependent variable REGR 12  
Tablica 14. Współczynniki modelu 4 dla zmiennej zależnej REGR 12

| Specification / Wyszczególnienie                                 | <i>B</i> | Standard error / Błąd standardowy | $\beta$ | <i>p</i> |
|--|----------|-----------------------------------|---------|----------|
| (Constant / Stała)   | 1.211    | 0.503                             | -       | 0.044    |
| REGR 3   | -0.295   | 0.182                             | -0.295  | 0.024    |
| REGR 6   | 0.522    | 0.277                             | 0.522   | 0.381    |
| $R^2 = 0.374$ ; $F(3, 24) = 4.786$ ; $p < 0.05$ ; $S.E. = 0.212$ |          |                                   |         |          |

Model 4 uwzględniający dwa predyktory, istotnie lepiej pozwala przewidywać zatory na drogach, o czym świadczy wartość  $R^2 = 0,374$  dla  $p = 0,022$ . Model ten jest dobrze dopasowany do danych  $F(3, 24) = 4,786$ ;  $p < 0,05$ . Oba predyktory pozwalają w istotny sposób przewidywać poziom zmiennej zależnej, choć obserwuje się, że poziom rozwoju sieci dróg jest silniejszym predyktorem ( $\beta = 0,522$ ) niż obiekty inżynierskie ( $\beta = 0,182$ ). Interpretując uzyskane wartości współczynników można stwierdzić, że im większy jest poziom rozwoju dróg oraz mniejsza liczba obiektów inżynierskich, takich

Model 4, which takes into account the two predictors, is significantly better at predicting traffic jams, as evidenced by the value of  $R^2 = 0.374$  for  $p = 0.022$ . This model is well adjusted to the data  $F(3, 24) = 4.786$ ;  $p < 0.05$ . Both predictors significantly predict the level of the dependent variable, although it is observed that the road network development level is a stronger predictor ( $\beta = 0.522$ ) than the engineering structures ( $\beta = 0.182$ ). By interpreting the obtained values of coefficients it can be stated that the greater the level of road development and the smaller the

jak mosty i tunele, tym mniejsze są zatory na drogach. Model można zapisać w postaci:

$$\text{Model 4} \Rightarrow Y_{\text{REGR } 9} = 1,211 + 0,295 x_{\text{REGR } 3} + 0,522 x_{\text{REGR } 6}.$$

## 5. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki regresji dla poszczególnych zmiennych zależnych oraz sporządzone modele wyjaśniania tych zmiennych pozwoliły wywnioskować, że na wyniki wydajności infrastruktury wpływają czynniki:

- w obszarze technicznym: długość dróg, stan dróg, obiekty inżynieryjne,
- w obszarze organizacyjnym: udogodnienia dla realizacji transportu, poziom rozwoju sieci dróg,
- w obszarze finansowym: kwoty środków z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (EFRR) i Funduszu Spójności przydzielone na projekty drogowe w okresie 2014-2020.

Otrzymane dane wyjściowe pozwoliły zweryfikować wszystkie postawione szczegółowe badawcze tylko częściowo (Tabl. 15).

Table 15. Level of verification of specific hypotheses  
Tablica 15. Poziom weryfikacji hipotez szczegółowych

| Specific hypothesis number<br>Nr hipotezy szczegółowej | Technical area<br>Obszar techniczny  | Organisational area<br>Obszar organizacyjny | Financial area<br>Obszar finansowy |
|--|--|---|------------------------------------|
|  | Relationship of the number of components that entered the model to the number of all components<br>Relacja liczby składowych, które weszły do modelu do liczby wszystkich składowych |   |                                    |
| Hypothesis 1 / Hipoteza 1                              | 1/3  | 0/3   | 1/2                                |
| Hypothesis 2 / Hipoteza 2                              | 2/3  | 2/3   | 0/2                                |
| Hypothesis 3 / Hipoteza 3                              | 1/3  | 1/3   | 0/2                                |
| Hypothesis 4 / Hipoteza 4                              | 1/3  | 1/3   | 0/2                                |

Przyjęto, że aby ocenić wpływ danego obszaru na wydajność infrastruktury, w modelu musi się znaleźć minimum jedna składowa z tego obszaru. Takie założenie pozwoliło pozytywnie zweryfikować wszystkie częściowe hipotezy, zgodnie z którymi:

- na wielkość przewożonego tonażu wpływają uwarunkowania techniczne i finansowe związane z rozwojem infrastruktury,
- na ruch drogowy na terenie kraju, przepustowość sieci oraz zatory na drodze wpływają uwarunkowania techniczne i organizacyjne rozwoju dróg.

Przeprowadzona analiza regresji wielorakiej dla zbadanych składowych zależnych pozwoliła zaobserwować, że wydajność infrastruktury, a dokładniej jej poszczególne wymiary w różny sposób zależą od technicznych, organizacyjnych i finansowych czynników.

number of engineering structures, i.e. bridges and tunnels, the smaller is the road congestion (traffic jams). The model can be expressed in the form:

$$\text{Model 4} \Rightarrow Y_{\text{REGR } 9} = 1.211 + 0.295 x_{\text{REGR } 3} + 0.522 x_{\text{REGR } 6}.$$

## 5. ANALYSIS OF RESULTS

The regression results for each dependent variable and the explanatory models prepared for these variables allowed us to conclude that infrastructure performance is influenced by the factors:

- in the technical area: road length, road condition, engineering structures,
- in the organizational area: facilities for transport implementation, level of road network development,
- in the financial area: European Regional Development Fund (ERDF) and the Cohesion Fund amounts allocated to projects in the 2014-2020 period.

The obtained output data allowed only a partial verification of all the specific objectives of the research (Table 15).

It was assumed that in order to assess the impact of an area on infrastructure performance, there must be a minimum of one component from that area in the model. This assumption allowed all partial hypotheses to be positively verified, according to which:

- the tonnage transported is influenced by technical and financial conditions related to infrastructure development,
- national road traffic, network capacity and congestion are influenced by technical and organisational conditions of road development.

The multiple regression analysis of the examined dependent components made it possible to observe that the efficiency of infrastructure, and more precisely its individual dimensions, depends in various ways on technical, organisational and financial factors.



Wiedząc jakie elementy infrastruktury wpływają na jej wydajność, uzupełnieniem będzie określenie poziomu tej wydajności w odniesieniu do badanych krajów Unii Europejskiej. Celem identyfikacji różnic w wydajności sieci drogowej zależnie od konkretnego kraju, w ostatnim kroku badań przeprowadzono analizę klasyfikacyjną metodą *k*-średnich [53]. Metoda ta pozwoli podzielić cały zbiór krajów unijnych zgodnie z ogólną zasadą maksymalizacji wariancji pomiędzy poszczególnymi grupami, przy jednoczesnej minimalizacji wariancji wewnątrz badanych grup. W pierwszej kolejności przetestowano istotność wariancji między poszczególnymi zmiennymi zależnymi (Tabl. 16).

Table 16. Analysis of variance for separate groups of countries by infrastructure performance  
Tablica 16. Analiza wariancji dla wyodrębnionych grup krajów ze względu na wydajność infrastruktury

| Infrastructure performance indicators<br>Wskaźniki wydajności infrastruktury | Cluster / Skupienie          |    | Error / Błąd                 |    | <i>F</i> | <i>p</i> |
|--|------------------------------|----|------------------------------|----|----------|----------|
|  | Mean square / Średni kwadrat | df | Mean square / Średni kwadrat | df |          |          |
| REGR 9   | 14.293                       | 1  | 0.489                        | 26 | 29.246   | 0.000    |
| REGR 10  | 14.897                       | 1  | 0.465                        | 26 | 32.003   | 0.000    |
| REGR 11  | 6.733                        | 1  | 0.779                        | 26 | 8.638    | 0.007    |
| REGR 12  | 5.625                        | 1  | 0.822                        | 26 | 6.843    | 0.015    |

Istotność wariancji wynosi w każdym przypadku mniej niż 0,05, co oznacza że występują istotne różnice między średnimi w poszczególnych grupach, można więc kontynuować analizę. W jej wyniku otrzymano dwie grupy, które różnią się istotnie między sobą poziomem poszczególnych wskaźników wydajności, dla których utworzono modele regresji. Tabl. 17 z ostatecznymi centrami skupień pokazuje podział tych wskaźników na dwie grupy.

Table 17. Final cluster centres for dependent components  
Tablica 17. Ostateczne centra skupień dla składowych zależnych

| Infrastructure performance indicators<br>Wskaźniki wydajności infrastruktury | Cluster / Skupienie |         |
|--|---------------------|---------|
|  | 1                   | 2       |
| REGR 9   | -0.37312            | 1.36811 |
| REGR 10  | -0.38092            | 1.39671 |
| REGR 11  | -0.25609            | 0.93901 |
| REGR 12  | -0.23408            | 0.85828 |

W pierwszej grupie wartości wskaźników wydajności – przewożonego tonażu, ruchu drogowego na terenie kraju, przepustowości sieci oraz zatorów na drodze – są niższe niż w grupie drugiej. Można więc wstępnie określić kraje z pierwszej grupy jako te o niskiej wydajności infrastruktury, natomiast te z drugiej grupy jako o wyższej wydajności infrastruktury, co wynika ze zróżnicowanego wpływu składowych, które weszły do skonstruowanych wcześniej czterech modeli regresji. Graficzna prezentacja unijnych krajów ze względu na niższy lub wyższy poziom wydajności infrastruktury przedstawia Rys. 2.

The knowledge about which elements of the infrastructure affect its efficiency will be complementary to determine the level of this performance in relation to the examined countries of the European Union. In order to identify differences in the performance of the road network depending on the specific country, as the last step of research, a classification analysis was performed using the *k*-means method [53]. This method will enable to divide the entire set of EU countries according to the general principle of maximizing the variance between groups while minimizing the variance within the studied groups. First, the significance of variance between the different dependent variables was tested (Table 16).

The significance of variance is less than 0.05 in each case, which means that there are significant differences between the means in each group, so the analysis can be continued. It resulted in two groups that differ significantly in the level of individual performance indicators, for which regression models were created. Table 17 with the final cluster centres shows the division of these indicators into two groups.

In the first group the values of performance indicators, i.e. tonnage transported, national traffic, network capacity and road congestion are lower than in the second group. Thus, it is possible to tentatively identify countries in the first group as those with low infrastructure performance and the ones in the second group as those with higher infrastructure performance as a result of the differential impact of the components that entered the four regression models constructed earlier. A graphical presentation of EU countries according to a lower or higher level of infrastructure performance is shown in Fig. 2.

The group with the lower overall performance indicator included 22 European countries, i.e.: Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Greece, Finland, Croatia, Hungary, Ireland, Italy, Lithuania, Luxembourg, Latvia, Malta, Portugal, Romania, Sweden, Slovenia and Slovakia. The group with better overall road network performance, includes the following countries: Germany, Spain, France, the Netherlands, Poland and the United Kingdom. The comparison of the means between selected groups of countries is presented in Tabl. 18.

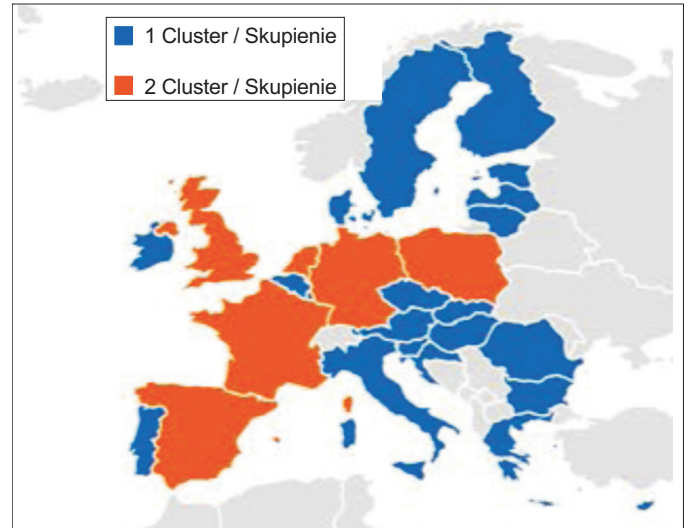
Table 18. Characteristics of infrastructure of the surveyed groups of countries  
 Tablica 18. Charakterystyka infrastruktury badanych grup krajów

| Descriptive variable<br>Zmienna opisowa                                 | Description of the variable<br>Opis zmiennej   | Mean / Średnia     |                    |
|---|--|--------------------|--------------------|
|   |  | Group 1<br>Grupa 1 | Group 2<br>Grupa 2 |
| Infrastructure development factors / Czynniki rozwoju infrastruktury    |  |                    |                    |
| V13   | Length of other roads by road category / Długość innych dróg według kategorii dróg   | 73938              | 523031             |
| V14   | Length of motorways and e-roads / Długość autostrad i e-dróg   | 1146               | 7484               |
| V21   | Length of TEN-T core network / Długość sieci bazowej TEN-T   | 1104               | 4772               |
| V22   | Length of TEN-T network outside the core network / Długości sieci TEN-T poza bazą  | 1311               | 4872               |
| V35   | Length of TEN-T (road) network by number of lanes / Długość sieci TEN-T (drogi) według liczby pasów ruchu  | 108                | 2045               |
| V2  | Road quality / Jakość dróg   | 4.60               | 5.43               |
| V6  | Completion of the TEN-T core road network / Zakończenie budowy drogowej sieci bazowej TEN-T  | 71.86              | 87.00              |
| V24   | Length of bridges in relation to total length of the national TEN-T network / Długość mostów w stosunku do całkowitej długości krajowej sieci  | 1.61               | 1.48               |
| V25   | Length of tunnels as share of the total length of TEN-T national roads consisting of tunnels / Długość tuneli jako udział w całkowitej długości dróg krajowych TEN-T   | 1.98               | 1.52               |
| V26   | ITS Distribution / Dystrybucja ITS   | 1196               | 6132               |
| V30   | Rest areas for truck drivers / Miejsca odpoczynku kierowców ciężarówek   | 77.68              | 197.67             |
| V31   | Total length of network with resting area data / Całkowita długość sieci z danymi obszaru odpoczynku   | 1002               | 5763               |
| V32   | Number of stops with facilities for truck drivers / Liczba postojów z udogodnieniami dla kierowców ciężarówek  | 46.77              | 97.50              |
| V33   | Electric vehicle charging stations / Stacje ładowania pojazdów elektrycznych   | 32.41              | 59.17              |
| V5  | Electric vehicle charging points / Punkty ładowania pojazdów elektrycznych   | 46.21              | 77.50              |
| V34   | Number of petrol stations / Liczba stacji benzynowych  | 64.86              | 263.17             |
| V18   | Execution rate of the core road network / Wskaźnik realizacji drogowej sieci bazowej   | 74.23              | 87.50              |
| V19   | ERDF and Cohesion Fund resources – roads in total / Środki z EFRR i Funduszu Spójności – drogi ogółem  | 642                | 2517               |
| V20   | ERDF and Cohesion Fund resources – roads in the TEN-T core network / Środki z EFRR i Funduszu Spójności – drogi w sieci bazowej TEN-T  | 208                | 727                |
| Infrastructure performance indicators / Czynniki rozwoju infrastruktury |  |                    |                    |
| V16   | Annual road freight transport by types of operations / Annual road freight transport by types of operations  | 30206              | 189781             |
| V17   | Annual road freight transport by types of goods / Roczny transport drogowy towarów według rodzaju towarów  | 215779             | 1347069            |
| V12   | Motor vehicle traffic at the national territory / Ruch pojazdów silnikowych na terytorium kraju  | 26695              | 301943             |
| V15   | Truck traffic at the national territory / Ruch drogowy na terytorium kraju samochodami ciężarowymi   | 3157               | 34377              |
| V23   | Planned improvement of the capacity of the TEN-T road network / Planowana poprawa przepustowości sieci drogowej TEN-T  | 25.05              | 35.50              |
| V27   | Distribution of truck traffic on TEN-T / Rozkład ruchu samochodów ciężarowych na TEN-T   | 1.64               | 2.33               |
| V28   | National Distribution of Truck Traffic (AADT) / Krajowy rozkład ruchu samochodów ciężarowych (AADT)  | 1.86               | 3.17               |
| V3  | Timeliness of shipments / Terminowość wysyłek  | 3.66               | 4.19               |
| V36   | Estimated percentage of road travel on the TEN-T core network compared to the UN infrastructure safety target / Szacowany odsetek podróży po drogach w sieci bazowej TEN-T w stosunku do celu ONZ w zakresie skuteczności działania w zakresie bezpieczeństwa infrastruktury | 67.23              | 80.67              |

W grupie o niższym ogólnym wskaźniku wydajności znalazły się 22 europejskie kraje takie jak: Austria, Belgia, Bułgaria, Cypr, Czechy, Dania, Estonia, Grecja, Finlandia, Chorwacja, Węgry, Irlandia, Włochy, Litwa, Luksemburg, Łotwa, Malta, Portugalia, Rumunia, Szwecja, Słowenia i Słowacja. W grupie o lepszej ogólnej wydajności sieci drogowej znalazły się z kolei takie kraje jak: Niemcy, Hiszpania, Francja, Holandia, Polska oraz Wielka Brytania. Porównanie średnich między wyodrębnionymi grupami krajów prezentuje Tabl. 18.

Fig. 2. Map of European countries assigned to each cluster

Rys. 2. Mapa krajów europejskich przyporządkowanych do poszczególnych skupień



Szczegółowa analiza wartości zmiennych pierwotnych, które w ramach składowych weszły do modeli regresji, potwierdza że zdecydowana większość zmiennych ma wartość wyższą (ozn. kolorem zielonym w Tabl. 18) w przypadku krajów należących do grupy drugiej. Państwa te charakteryzują się siecią dróg, która jest dłuższa i lepiej zarządzana, co przekłada się także na lepsze wyniki wydajności ich krajowej infrastruktury. Jednocześnie długość kilometrów obiektów inżynierskich, takich jak: mosty i tunele – jest większa w krajach z grupy pierwszej.

## 6. DISKUSJA NAD WYNIKAMI BADAŃ

W ciągu kilku ostatnich lat powstało wiele dróg o różnej charakterystyce, a ich zagęszczenie i jakość uległy znacznej poprawie w stosunku do ostatniej dekady. Wzrosła jakość połączeń międzyregionalnych, co zwiększyło synergiczne oddziaływanie oraz znacząco wpłynęło na tempo rozwoju poszczególnych regionów. Niestety w większości badanych państw poziom wydajności infrastruktury z uwagi na nierównomierne jej tworzenie i modernizacje nadal wymaga dalszego wkładu. Wyniki otrzymane w tym badaniu pokazały, że na wydajność infrastruktury drogowej wpływ mają jej uwarunkowania techniczne, organizacyjne i finansowe. Przeprowadzone analizy pozwoliły zidentyfikować konkretne czynniki, które oddziałują na wydajność unijnej infrastruktury drogowej identyfikowane w tym badaniu jako przepustowość sieci, przewóz tonażu transportem drogowym oraz minimalizowanie zatorów. Udowodniono, że wzrost długości dróg regionalnych i transeuropejskich, ogólna poprawa jakości sieci dróg oraz właściwe zaplanowanie i zarządzanie rozwojem sieci dróg powoduje że wydajność europejskiej infrastruktury rośnie. Istnienie nowoczesnej i dostępnej sieci dróg jest podstawową postępu gospodarczego i społecznego każdego rozwijającego się kraju. Jednak zgodnie z badaniami opisanymi przez Y.T. Mohmand [54] zapewnienie wydajnej infrastruktury transportowej jest nie jest wystarczające, aby wprowadzić

A detailed analysis of the values of the primary variables that entered the regression models within the components confirms that the vast majority of variables have a higher value (marked with green color in Table 18) for the second group of countries. These countries are characterized by a road network that is longer and better managed, which also translates into better performance results for their national infrastructure. At the same time, the length of kilometers of civil engineering structures, i.e. bridges and tunnels, is greater in the countries of the first group.

## 6. DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

Many roads of varying characteristics have been built over the past few years, and their density and quality have improved significantly over the last decade. The quality of interregional connections has improved, increasing synergies and significantly influencing the pace of development of individual regions. Unfortunately, in most of the countries under the study, the level of infrastructure performance due to uneven infrastructure creation and modernization still requires further investment. The results obtained in this study showed that the performance of road infrastructure is affected by its technical, organizational and financial conditions. The analyses carried out have identified specific factors that affect the performance of EU road infrastructure, identified in this study as network capacity, road tonnage and congestion reduction. Increasing the length of regional and trans-European roads, generally improving the quality of the road network, and properly planning and managing the development of the road network have been shown to increase the performance of European infrastructure. The existence of a modern and accessible road network is



zmiany w słabo rozwiniętych regionach. Co więcej dzięki systematycznej ocenie wydajności infrastruktury, planowanie transportu i polityki mobilności ukierunkowane jest na zwiększenie swobody przepływu dóbr i osób we współczesnym społeczeństwie [55]. Ponadto chociaż wyniki tego badania są ujednolicone na skale Unii Europejskiej, to wyniki wydajności infrastruktury w poszczególnych krajach Europy różnią się od siebie. Kraje unijne można podzielić na dwie grupy, z których większość krajów posiada mniej sprawną infrastrukturę, a ta prowadzi do większych zatorów, dłuższego czasu jazdy czy ograniczonego przewozu tonażu.

Spostrzeżenia uzyskane z przeprowadzonego badania można wykorzystać jako punkt wyjścia do zwiększenia pozytywnego efektu działań podejmowanych na rzecz rozwoju sieci dróg przez instytucje prywatne i publiczne. Liczne do tej pory badania pozwoliły zaobserwować, że sprawna infrastruktura drogowa zwiększa konkurencyjność krajowego rynku i wpływa na jego rozwój gospodarczy [56, 57]. Potwierdzają to także badania T. Deng [58], zgodnie z którymi inwestycje infrastrukturalne w transport mają istotny wkład w produktywność i wzrost gospodarczy kraju. Realizowane inwestycje w zakresie rozwoju infrastruktury skutkują nie tylko poprawą efektywności sieci komunikacyjnej, ale także sytuacji społeczno-gospodarczej krajów europejskich, głównie tych będących członkami Wspólnoty, ale i państw przyległych oraz sprzyja wzrostowi eksportu [59]. Szybki rozwój infrastruktury komunikacyjnej północno-wschodniej Europy, ze względu na tranzytowe położenie między Europą Zachodnią a Wschodnią, odgrywa ważną rolę w obsłudze transportu międzynarodowego. C.S. Saba i inni [60] sugerują konwergencję infrastruktury transportowej na poziomie globalnym, aby zminimalizować różnice między krajami identyfikowanymi ze względu na grupy dochodowe. Jednocześnie wysoki poziom ruchu drogowego w całej Europie utrzymuje się w dłuższym okresie, co skutkuje dużym natężeniem transportu na drogach międzynarodowych [61]. Celem rozwoju infrastruktury jest stworzenie kompleksowego systemu rozwoju połączeń komunikacyjnych i tranzytowych na skalę międzynarodową i regionalną. Ważnym zadaniem tego systemu jest zwiększanie wydajności europejskiej sieci drogowej poprzez projekty realizowane na rzecz rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej – TEN-T. Wzrost sieci ma finalnie służyć zwiększeniu efektywności funkcjonowania wspólnego unijnego rynku. Wydajna sieć dróg polega jednocześnie na zrównoważonym rozwoju sieci komunikacyjnej, spaja i łączy międzynarodowe sieci i zatrudnia wszystkie gałęzi transportu, zachowując przy tym właściwy poziom bezpieczeństwa przewozów. Dlatego modernizacji infrastruktury powinny towarzyszyć działania na rzecz poprawy obszaru społecznego i technologicznego [62, 63].

fundamental to the economic and social progress of any developing country. However, according to the research by Y.T. Mohmand [54] providing efficient transport infrastructure is not sufficient to bring about changes in underdeveloped regions. Moreover, through systematic assessment of the infrastructure performance, transport planning and mobility policies are directed towards increasing the free movement of goods and people in modern society [55]. In addition, although the results of this study are standardised across the European Union, the performance results of infrastructure vary across Europe. EU countries can be divided into two groups, most of which have a less efficient infrastructure leading to greater congestion, longer travel times or limited tonnage transported.

The observation obtained from the study can be used as a starting point to increase the positive effect of road network development efforts by private and public institutions. Numerous studies to date have shown that efficient road infrastructure increases the competitiveness of the domestic market and affects its economic development [56, 57]. This is also confirmed by the research of T. Deng [58], according to which infrastructure investment in transport has a significant contribution to productivity and economic growth of the country. The investment projects carried out in the field of infrastructure development result not only in an improvement of the effectiveness of the transport network, but also in the socio-economic situation of European countries, mainly those which are members of the community, but also of the adjacent countries, and foster the growth of exports [59]. Due to the transit location between Western and Eastern Europe, the rapid development of the North-Eastern European transport infrastructure plays an important role in handling international transport. C.S. Saba et al. [60], suggest the convergence of transport infrastructure at the global level to minimize the differences between countries identified by income groups. At the same time, the high level of road traffic across Europe persists over a long time, resulting in high transport volumes on international roads [61]. The aim of infrastructure development is to create a comprehensive system for the development of transport and transit links on an international and regional scale. An important task of this system is to increase the efficiency of the European road network through projects implemented for the development of the trans-European transport network – TEN-T. The growth of the network is to ultimately intended to increase the efficiency of the EU single market. An efficient road network is at the same time a balanced development



Według P.V. Tuong i in. [64] poprawa infrastruktury drogowej skutecznie pomoże poprawić wydajność działalności firm zależnie od sektora gospodarki, w którym działają. Jednocześnie wykazano, że ilość i jakość infrastruktury mają silny negatywny wpływ na nierówności w dochodzie narodowym, które maleją nie tylko z przyrostem zasobów infrastruktury, ale także z poprawą jakości usług infrastrukturalnych [65]. Poprawa jakości infrastruktury komunikacyjnej jest ważna dla poszczególnych państw badanego regionu, które w swoich programach rozwojowych deklarowały zwiększenie nakładów na rozwój tej infrastruktury. Stąd też znaczący udział w rozwoju europejskiej sieci drogowej mają środki pochodzące z budżetu Unii Europejskiej, które bezpośrednio na tą wpłynęły.

## 7. WNIOSKI I KIERUNKU DALSZYCH BADAŃ

Jednym z warunków rozwoju gospodarczego jest zapewnienie bezpiecznej, elastycznej i wydajnej infrastruktury transportowej, co objawia się sprawnym przepływem dóbr i osób między odległymi regionami. Tworzone w tym celu rozległe sieci transportowe usprawniają wymianę handlową i wpływają na międzynarodowy rynek pracy. Co więcej rozwijanie infrastruktury transportowej przyczynia się do osiągania lepszej integracji rynków krajowych i ułatwia zaistnienie rynku europejskiego na rynku światowym. Kierunki rozwoju sieci drogowej warunkowane są stanem dotychczasowej infrastruktury i aktualnymi potrzebami przemieszczania dóbr i osób na skalę krajową i międzynarodową.

Mając na uwadze cel pracy, jakim była identyfikacja i ocena oddziaływania dotychczasowych postępów prac związanych z inwestycjami i rozbudową dróg na wydajność komunikacyjną unijnych krajów europejskich, w opracowaniu omówiono wpływ składowych infrastruktury drogowej na jej wydajność. Wyniki wskazały, że długość i stan dróg, obiekty inżynieryjne, udogodnienia dla realizacji transportu, złożoność sieci oraz unijne fundusze przyczyniają się do poprawy ogólnej wydajności infrastruktury drogowej identyfikowanej jako zbiór czynników takich jak: wielkość przewożonego tonażu, ruch drogowy na terenie kraju, przepustowość sieci oraz zatory na drogach. Nie ulega wątpliwości, że kraje o większej przepustowości i łączności sieci drogowej notują wyższy wzrost gospodarczy. Otrzymane wyniki wyznaczają kierunek działań, które należy zintensyfikować, aby tą wydajność dalej usprawniać.

W obliczu dynamicznego wzrostu zarówno przewozów towarowych jak i pasażerskich i związanych z tym rosnących potrzeb korzystania z transportu drogowego, ale także uwzględniając wciąż niedostatecznie rozwiniętą sieć drogową, kraje

of the transport network, it binds and connects international networks and employs all modes of transport while maintaining an appropriate level of transport safety. Therefore, the modernization of infrastructure should be accompanied by measures to improve the social and technological area [62, 63].

According to P.V. Tuong et al. [64], improving road infrastructure will effectively help improve the performance of companies depending on the economic sector in which they operate. At the same time, it has been shown that the quantity and quality of infrastructure have a strong negative effect on national income inequality, which decreases not only with an increase in infrastructure resources but also with an improvement in the quality of infrastructure services [65]. The improvement of the quality of the transport infrastructure is important for the individual countries of the studied region, which in their development programmes declared increased expenditures on the development of this infrastructure. Hence, a significant contribution to the development of the European road network has been made by funds from the European Union budget, which have directly influenced it.

## 7. CONCLUSIONS AND DIRECTIONS FOR FURTHER RESEARCH

One of the conditions for economic development is to ensure a safe, flexible and efficient transport infrastructure, which manifests itself in the efficient movement of goods and people between distant regions. The extensive transport networks created for this purpose facilitate trade and influence the international labour market. Moreover, the development of transport infrastructure contributes to achieving better integration of national markets and facilitates the presence of the European market on the world market. The directions of development of the road network depend on the condition of the existing infrastructure and the current needs of the flow of goods and people on a national and international scale.

Bearing in mind the aim of this research, which was the identification and assessment of the impact of the progress of road investment projects and expansion works to date on the transport performance of EU European countries, the article discusses the impact of road infrastructure components on the infrastructure performance. The results indicated that the length and condition of roads, engineering structures, transport implementation facilities, network complexity and EU funding all contribute to improving the overall performance of road infrastructure identified as a set of factors, i.e. tonnage transported, national traffic, network

europiejskie stoją przed dalszym wyzwaniem rozbudowy infrastruktury transportowej. Dotyczy ono ukończenia budowy spójnej sieci dróg i autostrad, która przyczyni się do wzrostu spójności rynków poszczególnych krajów i wykorzystania potencjału gospodarczego państw unijnych i całego kontynentu. Większe wysiłki należy także skoncentrować na wdrożeniu innowacyjnych technologii i elementów infrastruktury, które umożliwią świadczenie zrównoważonych usług transportowych opartych na zapotrzebowaniu na przewozy, jak i pomoże zwiększyć mobilność indywidualną. Posiadają one jednak pewne ograniczenia, które mogą stanowić podstawę dalszych badań. W opracowaniu ze względu na dostępność danych zbadano jedynie kraje unijne, ponadto w przyszłości wątek badawczy można rozwinąć w odniesieniu do systemu transportowego pozostałych krajów europejskich. Wyniki przeprowadzonych badań opisują w sposób całościowy istniejącą infrastrukturę transportową, a zatem mogą być bardzo przydatne dla rządu, decydentów administracyjnych oraz dla przedsiębiorstw świadczących usługi z zakresu przewozu towarów.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Prus P., Sikora M.: The Impact of Transport Infrastructure on the Sustainable Development of the Region – Case Study. *Agriculture*, **11**, 4, 2021, article no. 279, 1-15, DOI: 10.3390/agriculture11040279
- [2] Łukasiewicz A., Świtła M.: Oddziaływanie inwestycji drogowych na aktywność gospodarczą w świetle opinii przedsiębiorstw prowadzących działalność w otoczeniu trasy. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 4, 2019, 239-254, DOI: 10.7409/rabdim.019.016
- [3] Kramarz M., Dohn K., Przybylska E., Knop L.: Scenarios for the Development of Multimodal Transport in the TRITIA Cross-Border Area. *Sustainability*, **12**, 17, 2020, article no. 7021, 1-41, DOI: 10.3390/su12177021
- [4] Luica P.: For a complete TEN-T, an increased EU budget is needed. *Policies & Strategies, Railway PRO*, May 2018, 1-8
- [5] Dunmore D., Preti A., Routaboul C.: The “Belt and Road Initiative”: impacts on TEN-T and on the European transport system. *Journal of Shipping and Trade*, **4**, 10, 2019, 1-17, DOI: 10.1186/s41072-019-0048-3
- [6] Wisnicki B., Jedrychowski K., Jedrychowski H.: Conditions for the preparation of the complex transport infrastructure investment illustrated by the Lower Vistula River revitalization. *Proceedings of the International Scientific Conference for PhD. Students and Young Scientists MERKÚR 2015*, Virt, Slovakia, 2015, 339-348
- [7] Nowakowska-Grunt J., Strzelczyk M.: The current situation and the directions of changes in road freight transport in the European Union. *Transportation Research Procedia*, **39**, 2019, 350-359, DOI: 10.1016/j.trpro.2019.06.037
- [8] Guastaroba G., Speranza M.G., Vigo D.: Intermediate facilities in freight transportation planning: a survey. *Transportation Science*, **50**, 3, 2016, 763-789, DOI: 10.1287/trsc.2015.0631
- [9] Polyzos S., Tsiotas D.: The contribution of transport infrastructures to the economic and regional development: a review of the conceptual framework. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, **15**, 1, 2020, 5-23
- [10] Hong J., Chu Z., Wang Q.: Transport infrastructure and regional economic growth: evidence from China. *Transportation*, **38**, 2011, 737-752, DOI: 10.1007/s11116-011-9349-6
- [11] Vilela T., Harb A.M., Bruner A., Laisa V., da Silva Arruda V.L., Ribeiro V., Alencar A.A.C., Grandez A.J.E., Rojas A., Laina A., Botero R.: A better Amazon road network for people and the environment. *PNAS*, **117**, 13, 2020, 7095-7102, DOI: 10.1073/pnas.1910853117
- [12] Szymonik A.: *Ekonomia transportu dla potrzeb logistyka(i), Teoria i praktyka*. Difin, Warszawa 2012
- [13] Harańczyk A.: *Infrastruktura drogowa w rozwoju obszarów miejskich*, [w:] T. Kudłacz, A. Hołuj (red.) *Infrastruktura w rozwoju regionalnym i lokalnym*. Wybrane problemy. CeDeWu, Warszawa 2015, 33-44
- [14] Skorobogatova O., Kuzmina-Merlino I.: Transport Infrastructure Development Performance. 16<sup>th</sup> Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'2016, Riga, Latvia, *Procedia Engineering*, **178**, 2017, 319 - 329

capacity and road congestion. There is no doubt that countries with greater road network capacity and connectivity record higher economic growth. The obtained results indicate the direction of activities that should be intensified in order to further improve this performance.

Given the dynamic growth of both freight and passenger transport and the related growing need to use road transport, but also taking into account the still insufficiently developed road network, European countries are facing a further challenge in expanding their transport infrastructure. It concerns the completion of a coherent network of roads and motorways, which will contribute to the cohesion of national markets and the exploitation of the economic potential of EU countries and the entire continent. More efforts should also be focused on implementing innovative technologies and infrastructures that will enable the provision of sustainable transport services based on transport demand and help increase individual mobility. However, they have some limitations that may constitute the basis for further research. In the study, due to the availability of data, only the EU countries were examined, moreover, in the future, the research thread may be developed for the transport system of other European countries. The results of the research carried out comprehensively describe the existing transport infrastructure, and therefore can be very useful for the government, administration policy-makers and companies providing services in the field of transporting goods.

- [15] *Park S.*: Quality of transport infrastructure and logistics as source of comparative advantage. *Transport Policy*, **99**, 2020, 54-62, DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.07.016
- [16] *Grassi E., Hristov S., Balko L., Leskovar M., Puricella P.*: Udoskonalanie sektora transportu w UE – aktualne wyzwania. Przegląd horyzontalny. Europejski Trybunał Obrachunkowy, Unia Europejska, 2018, [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/LR\\_TRANSPORT/LR\\_TRANSPORT\\_PL.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/LR_TRANSPORT/LR_TRANSPORT_PL.pdf) (dostęp: 12.11.2021)
- [17] Regulation (EU) No 1315/2013 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU Text with EEA relevance OJ L 348, 128p (available: 20.12.2013)
- [18] *Świeboda J., Lysionok A., Majowicz A.*: Transport intermodalny na Nowym Jedwabnym Szlaku. Polski Instytut Transportu Drogowego, Wrocław 2020
- [19] *Gkoumas K., van Balen M., Ortega Hortelano A., Tsakalidis A., Grosso M., Haq G., Pekár F.*: Research and innovation in transport infrastructure in Europe, An assessment based on the Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS). European Commission, European Union, 2019, DOI: 10.2760/205571
- [20] Electric cars: 10 EU countries do not have a single charging point per 100km of road. ACEA Driving Mobility for Europe, <https://www.acea.auto/press-release/electric-cars-10-eu-countries-do-not-have-a-single-charging-point-per-100km-of-road/> (available: 21.11.2021)
- [21] *Meyer D.F.*: An assessment of the impact of logistics and related infrastructure on the economy: a comparative analysis of the visegrad countries. *Polish Journal of Management Studies*, **22**, 1, 2020, 295-309
- [22] *Arvis J.F., Ojala L., Wiederer Ch., Shepherd B., Raj A., Dairabayeva K., Kiiski T.*: Connecting to Compete 2018 : Trade Logistics in the Global Economy. World Bank, Washington 2018
- [23] *Schwab K.*: The Global Competitiveness Report 2018. Insight Report. World Economic Forum, Geneva 2018
- [24] *Kurmanov N., Aliev U., Suleimenova S.*: Analysis of the Efficiency of Innovation Management in the Countries of the Eurasian Economic Union. *Polish Journal of Management Studies*, **19**, 1, 2019, 204-214
- [25] *Lukasiewicz A., Świtala M.*: Differences between the traffic model and the actual road traffic and its structure. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 1, 2021, 79-91, DOI: 10.7409/rabdim.020.005
- [26] *Jedwab R., Kerby E., Moradi A.*: History, path dependence and development: evidence from colonial Railways, settlers and cities in Kenya. *Economic Journal*, **127**, 2017, 1467-1494, DOI: 10.1111/eoj.12347
- [27] *Atkin D., Donaldson D., Rasul I., Teachout M., Verhoogen E., Woodruff C.*: Firms, trade, and productivity. International Growth Centre, London 2019
- [28] *Ruiz-Coupeau S., Rodas-Monge J., Florez-Lopez R., Ramon-Jeronimo J.M.*: Impact of Regional Public Agencies on Firms' Internationalization Processes: Evidence from Case Studies. *Sustainability*, **11**, 10, 2019, issue no. 2813, 1-16, DOI: 10.3390/su11102813
- [29] *Wheat P., Stead A.D., Huang Y., Smith A.*: Lowering Transport Costs and Prices by Competition: Regulatory and Institutional Reforms in Low Income Countries. *Sustainability*, **11**, 21, 2019, article no. 5940, 1-19, DOI: 10.3390/su11215940
- [30] *Litman T.*: Evaluating Public Transit Benefits and Costs. Best Practices Guidebook. Victoria Transport Policy Institute, 2021
- [31] *Perkins S., Wagner N., Leung J.*: The Social Impacts of Road Pricing Summary and Conclusions. The International Transport Forum, Paris 2018
- [32] *Perez G.*: Rural roads: key routes for production, connectivity and territorial development. *Facilitation of transport and trade in Latin America and The Caribbean*, **377**, 1, 2020, 1-17
- [33] *Pérez G., Sánchez R.*: Logistics for production, distribution and trade. Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), FAL Bulletin, **369**, Santiago 2019, 1-14
- [34] *Matwiejczuk W., Gorustowicz M.*: The development strategy for transport infrastructure in the North – Eastern Europe. *Economics and Management*, **3**, 1, 2011, 24-35
- [35] *Ng C.P., Law T.H., Jakarni F.M., Kulanthayan S.*: Road infrastructure development and economic growth. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **512**, 2019, 1-10
- [36] *Ke X., Lin J.Y., Fu C., Wang Y.*: Transport Infrastructure Development and Economic Growth in China: Recent Evidence from Dynamic Panel System-GMM Analysis. *Sustainability*, **12**, 14, 2020, article no. 5618, 1-22, DOI: 10.3390/su12145618
- [37] *Cigu E., Agheorghiesei D.T., Gavriluță (Vatamanu) A.F., Toader E.*: Transport Infrastructure Development, Public Performance and Long-Run Economic Growth: A Case Study for the Eu-28 Countries. *Sustainability*, **11**, 1, 2019, article no. 67, 1-22, DOI: 10.3390/su11010067
- [38] Overview of transport infrastructure expenditures and costs, European Commission, 2019, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7ab899d1-a45e-11e9-9d01-01aa75ed71a1> (available: 09.10.2021)
- [39] *de Leeuw van Weenen R., Newton S., Menist M., Maas F., Penasse D., Nielsen M., Halatsis A., Männistö T., Stamos I., Ruschin P.P.*: Study on Safe and Secure Parking Places for Trucks. Final Report, European Commission, 2019, <https://sstpa.eu-study.eu/results/> (available: 09.10.2021)
- [40] TEN-T Core Network Corridors Atlantic Corridor, [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment_en) (available: 09.10.2021)
- [41] Drogowa sieć bazowa UE – czas podróży się skrócił, ale sieć nie jest jeszcze w pełni funkcjonalna. Sprawozdanie specjalne. Europejski Trybunał Obrachunkowy, 2020, [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20\\_09/SR\\_Road\\_network\\_PL.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_09/SR_Road_network_PL.pdf) (dostęp: 10.10.2021)
- [42] Trans-European Road Network, TEN-T (Roads): Performance Report. European Commission, 2019, <https://www.cedr.eu/docs/view/6063289f6eb55-en> (available: 10.10.2021)



- [43] Saving Lives Assessing and Improving TEN-T Road Network Safety. European Commission, TRIMIS <https://trimis.ec.europa.eu/project/saving-lives-assessing-and-improving-ten-t-road-network-safety> (available: 11.10.2021)
- [44] Melo I., Tomasik B., Torrieri G., Gintner M.: The Kolmogorov-Smirnov test and its use for the identification of fireball fragmentation. *Physical Review C*, **80**, 2009, article no. 024904, 1-10, DOI: 10.1103/PhysRevC.80.024904
- [45] Cui Z., Gong G.: The effect of machine learning regression algorithms and sample size on individualized behavioral prediction with functional connectivity features. *Neuroimage*, **178**, 2018, 622-637, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.06.001
- [46] Jarocka M.: Wybór formuły normalizacyjnej w analizie porównawczej obiektów wielocechowych. *Economics and Management*, **7**, 1, 2015, 113-126
- [47] Wyżnikiewicz B.: Statistics and Ethics. *Annales. Etyka w życiu gospodarczym*, **18**, 2, 2015, 105-113
- [48] Rozmus D.: The effect of reduction of variables to groups stability. *Research Papers of Wrocław University of Economics*, **508**, 2018, 180-189
- [49] Hadi N.U., Abdullah N., Ilham S.: An Easy Approach to Exploratory Factor Analysis: Marketing Perspective. *Journal of Educational and Social Research MCSER Publishing*, **6**, 1, 2016, 215-223, DOI: 10.5901/jesr.2016.v6n1p215
- [50] Lin Ch., Alam S.S., Ho Y., Al-Shaikh M.E., Sultan P.: Adoption of Green Supply Chain Management among SMEs in Malaysia. *Sustainability*, **12**, 16, 2020, article no. 6454, 1-15, DOI: 10.3390/su12166454
- [51] Cortina J.M.: What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *Journal of Applied Psychology*, **78**, 1, 1993, 98-104, DOI: 10.1037/0021-9010.78.1.98
- [52] Dzemydiene D., Rudzkiene V.: Multiple Regression Analysis in Crime Pattern Warehouse for Decision Support. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Database and Expert Systems Applications, DEXA 2002, Aix-en-Provence, France, 2002, 249-258
- [53] Thrun M.C.: Projection-Based Clustering through Self-Organization and Swarm Intelligence Combining Cluster Analysis with the Visualization of High-Dimensional Data. Springer, 2018
- [54] Mohmand Y.T., Wang A., Saeed A.: The impact of transportation infrastructure on economic growth: empirical evidence from Pakistan. *Transportation Letters*, **9**, 2, 2017, 63-69, DOI: 10.1080/19427867.2016.1165463
- [55] Vecchio G., Martens K.: Accessibility and the Capabilities Approach: a review of the literature and proposal for conceptual advancements. *Transport Reviews*, **41**, 6, 2021, 833-854, DOI: 10.1080/01441647.2021.1931551
- [56] Okechukwu E.E., Madonsela N.S., Adetunla A.: The Effect of Transportation Infrastructure on Economic Development. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Harare, Zimbabwe, 2020
- [57] Meersman H., Nazemzadeh M.: The contribution of transport infrastructure to economic activity: The case of Belgium. *Case Studies on Transport Policy*, **5**, 2, 2017, 316-324
- [58] Deng T.: Impacts of Transport Infrastructure on Productivity and Economic Growth: Recent Advances and Research Challenges. *Transport Reviews*, **33**, 6, 2013, 686-699, DOI: 10.1080/01441647.2013.851745
- [59] Gotembski G., Majewska J.: The impact of transport infrastructure on international inbound tourism – a gravity model of Poland. *International Journal of Contemporary Management*, **17**, 4, 2018, 133-152. DOI: 10.4467/24498939IJCM.18.040.10026
- [60] Saba C., Ngepah N., Odhiambo N.M.: Analysis of convergence in transport infrastructure: a global evidence. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, **21**, 2, 2021, 137-160, DOI: 10.18757/ejtir.2021.21.2.5368
- [61] Puricella P., Gullova Z., Hristov S., Balko L., Pascual-Gil F., Klis-Lemieszonek A., Urbanic B., Leskovar M.: The EU core road network: shorter travel times but network not yet fully functional. Special Report, European Court of Auditors (ECA), Luxembourg 2020, [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20\\_09/SR\\_Road\\_network\\_EN.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_09/SR_Road_network_EN.pdf) (available: 15.11.2021)
- [62] Winter K., Cats O., Martens K.: Relocating shared automated vehicles under parking constraints: assessing the impact of different strategies for on-street parking. *Transportation*, **48**, 2021, 1931-1965, DOI: 10.1007/s11116-020-10116-w
- [63] Chithra J., Nagarajan P., Sajith A.S.: Investigations in twin-cell box girder bridges subjected to combined effects of bending and torsion. *Innovative Infrastructure Solutions*, **7**, 2021, article no. 120 (2022), 1-15, DOI: 10.1007/s41062-021-00719-2
- [64] Tuong P.V., Binh D.T., Hoa N.D.: Impact of transport infrastructure on firm performance: case study of Cuu long delta area, Vietnam. *Problems and Perspectives in Management*, **17**, 2, 2019, 51-62
- [65] Calderón C.A., Servén L.: The effects of infrastructure development on growth and income distribution. The Central Bank of Chile, Working Paper series no. 270, Chile 2004