

## METODYKA ANALIZ TRAS ROWEROWYCH W ZRÓŻNICOWANEJ STRUKTURZE SIECIOWEJ

### METHODS OF ANALYSIS OF BIKE ROUTES IN A DIVERSIFIED NETWORK STRUCTURE

**Alicja Packa<sup>1</sup>, Elżbieta Lewandowicz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Warszawskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne

<sup>2</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Słowa kluczowe:** komunikacja rowerowa, wielowariantowe analizy sieciowe, nawigacja  
Keywords: bike communication, multi-variant network analysis, navigation

## Wprowadzenie

W krajach Europy Zachodniej miejska komunikacja rowerowa jest bardzo popularnym środkiem transportu. Również w Polsce w ostatnich latach znajduje coraz więcej zwolenników. W miastach polskich ścieżki rowerowe zaczynają się już wpisywać w krajobraz miejski. Przykładem rozwiązań mogą być ścieżki rowerowe Krakowa (Młynówka Królewska), czy trasa nadmorska w Trójmieście (Gdańsk-Sopot-Gdynia-Puck). Wykorzystywane są głównie przez mieszkańców w celach rekreacyjnych. Nowo zbudowane, czy modernizowane ścieżki rowerowe, nie spełniają wszystkich oczekiwań rowerzystów, którzy chcieliby korzystać z tego środka transportu na co dzień. Istniejące odcinki ścieżek rowerowych nie tworzą spójnej sieci. Przykładem niech będzie wizualizacja istniejących ścieżek rowerowych w mieście Olsztynie (rys. 3), które budowane były głównie przy modernizacji dróg. W ostatnich latach tworzone i modernizowane były różne koncepcje budowy sieci tras rowerowych (UM, 2001; 2003; www1, 2009), ale nie przystąpiono do ich realizacji.

Na dzień dzisiejszy, niespójna sieć ścieżek rowerowych wymusza na ich użytkownikach dokonywania wyborów tras dojazdów, z uwzględnieniem także odcinków dróg miejskich i chodników. Niedoświadczony rowerzysta, korzystając z roweru jako środka transportu, w oparciu o znajomość miasta, wybiera trasę najczęściej najkrótszą lub najbardziej mu znaną, która nie zawsze jest trasą bezpieczną. Dokonując złego wyboru trasy, rowerzysta może powodować duże zagrożenie życia swojego i innych uczestników ruchu (Hyla, 1996; Krystek i in., 2006). Statystyki zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów są alarmujące. W Olsztynie (www2, 2009) odnotowuje się średnio 46 zdarzeń rocznie, wskaźnik zdarzeń na 10 000 mieszkańców wynosi 2,7.

Celem prezentowanej w artykule pracy było opracowanie metodyki budowy matematycznego modelu sieci tras rowerowych. Założono, że zbudowany model powinien być wykorzystywany w celu dokonywania wyboru trasy rowerowej z uwzględnieniem jej cech związanych z: bezpieczeństwem, atrakcyjnością, spójnością, najkrótszą odległością, czasem przejazdu itp. W oparciu o przyjęte założenia, zbudowano testowy model sieci tras rowerowych między dwoma osiedlami Olsztyna. Pozwolił on na wykonanie analiz i przedstawienie wyników.

## Metodyka pracy

W oparciu o literaturę związaną z międzynarodowymi standardami projektowania i oceną ścieżek rowerowych (Hyla, 1996; PKE, 1999; www3, 2010), ustalono zasady opisu jednorodnych odcinków sieci tras rowerowych. Uwzględniają one cechy mierzalne związane z odległością, czasem przejazdu oraz opisowe: kategorie drogi, bezpieczeństwo, atrakcyjność, wygodę. Atrybuty opisowe, zgodnie z przyjętą klasyfikacją, należało zamienić na miary wagowe. Pozwoliło to na zbudowanie modelu teoretycznego sieci i zapisanie go w formie matematycznej – grafu opisanego miarami wagowymi. Wykorzystując standardowe narzędzia GIS do analiz sieciowych, przyjęty model wykorzystano do wielowariantowych analiz w poszukiwaniu tras rowerowych, spełniających różne kryteria: najkrótszej, najbezpieczniejszej, najszybszej, najwygodniejszej, najatrakcyjniejszej, najprostszej (trasa po drogach głównych). Poszukując optymalnego rozwiązania, uwzględniającego wszystkie kryteria, należało znormalizować miary opisu odcinków i przeprowadzić analizę wielowymiarową.

W części praktycznej, przy realizacji niniejszej pracy (Lewandowicz, 2009), jeżdżąc rowerem, rejestrowano za pomocą urządzenia nawigacyjnego różne możliwe trasy między dwoma zadanymi punktami w mieście (z osiedla mieszkaniowego Pieczewa do miasteczka uniwersyteckiego Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie). Celem tych zabiegów była budowa modelu geometrycznego jako zbioru odcinków opisanych długością i czasem przejazdu. Zgodnie z przyjętym modelem teoretycznym rozbudowano opis atrybutowy. Tak zbudowany model praktyczny zapisano w aplikacji GIS AutoCAD Map (Autodesk, 2009).

Przeprowadzono analizy w poszukiwaniu najlepszej trasy przy uwzględnieniu różnych oczekiwań. Otrzymano wizualizacje tras o różnych przebiegach, które uwzględniały parametry takie jak: bezpieczeństwo, atrakcyjność, czas przejazdu i odległość. Użytkownicy komunikacji rowerowej dzięki nim mogą dokonać świadomego wyboru.

## Podstawy teoretyczne analiz sieciowych (tras rowerowych)

W literaturze przedmiotu (Kulikowski, 1986; Wilson, 2000) analizy sieciowe opierają się na teorii grafów skierowanych, opisanych wzorem:

$$G = [W, L, G = [W, L, \varphi], ],$$

gdzie:  $G$  oznacza graf,  $W$  – zbiór węzłów,  $L$  – zbiór łuków (krawędzi skierowanych), a  $\varphi$  jest odwzorowaniem przyległości przypisującym węzły do łuków. Graf odpowiada geometrycznemu modelowi sieci (rys. 1).

W rozbudowanych analizach sieciowych wykorzystuje się uogólniony zapis grafu w postaci:

$$K = [G, D, C],$$

gdzie:  $G = [W, L, \varphi]$  jest grafem skierowanym,  $D$  i  $C$  są dodatkowymi funkcjami opisującymi elementy grafu za pomocą cech.  $D$  jest funkcją:

$$D: W \rightarrow Y_w,$$

która przypisuje węzłom grafu wartości różnych funkcji, których argumentami są cechy elementów punktowych (węzłowych) modelu sieci:

$$\begin{aligned} y_{w1} &= f_1(x), \\ y_{w2} &= f_2(x), \\ &\dots\dots\dots, \\ y_{wn} &= f_n(x). \end{aligned}$$

W efekcie tworzone są wektory cech węzłów  $Y_w = [y_{w1}, y_{w2}, \dots, y_{wn}]$ . Podobnie funkcja  $C$ :

$$C: K \rightarrow Y_k,$$

przypisuje krawędziom wartości, które tworzą wektor cech krawędzi  $Y_k = [y_{k1}, y_{k2}, y_{k3}, \dots, y_{km}]$ .

Wybór konkretnych wartości funkcji węzłów i krawędzi wiąże się z wyborem podgrafu  $D \subset G$  spełniającego zadane wartości funkcji  $f_n$  i  $f_m$ .

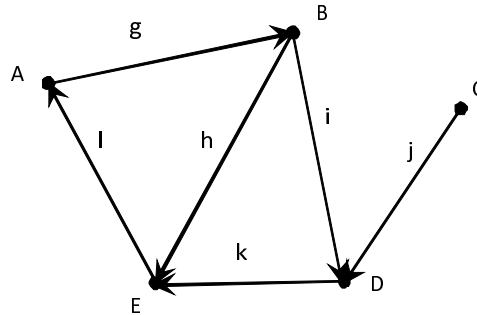
Budując model matematyczny sieci tras rowerowych, zgodnie z opisanymi podstawami teoretycznymi przyjęto, że węzły sieci  $w, w \in W$ , opisują zakończenia jednorodnych odcinków tras. Część z nich opisuje skrzyżowania dróg, także tych z sygnalizacją świetlną. Węzły opisano tylko jedną cechą  $y_w$ , która wiąże się z przestojami przy pokonywaniu węzłów. Standardowo  $y_w = 0$ , ale węzłom opisującym skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, wartości  $y_1$  będą opisane średnimi czasami  $t_i$  oczekiwania na zmianę światła, które wyznaczono empirycznie:

$$y_w = \begin{cases} 0 & \text{jeśli } w \text{ nie opisuje skrzyżowania} \\ t & \text{jeśli } w \text{ opisuje skrzyżowanie} \end{cases}.$$

Cechy łuków grafu – odcinków tras rowerowych opisano za pomocą 6 podstawowych funkcji:

$$\begin{aligned} y_{k1} &= t_{k'} && \text{gdzie } t - \text{czas przejazdu odcinka trasy [min],} \\ y_{k2} &= d_{k'} && \text{gdzie } d - \text{długość odcinka trasy [m],} \end{aligned}$$

$$y_{k3} = \begin{cases} 1 & \text{gdy odcinek jest bezpieczny} \\ 2 & \text{gdy odcinek jest średniobezpieczny} \\ 3 & \text{gdy odcinek jest niebezpieczny} \end{cases} \quad y_{k4} = \begin{cases} 1 & \text{gdy odcinek jest wygodny} \\ 2 & \text{gdy odcinek jest średniowygodny} \\ 3 & \text{gdy odcinek jest niewygodny} \end{cases}$$



Rys.1. Graf skierowany składający się z węzłów (A, B, C, D, E) i łuków (g, h, i, j, k, l)

$$y_{k5} = \begin{cases} 1 & \text{odcinek drogi głównej} \\ 2 & \text{odcinek drogi dojazdowej} \end{cases} \quad y_{k6} = \begin{cases} 1 & \text{gdy odcinek jest atrakcyjny} \\ 2 & \text{gdy odcinek jest średnioatrakcyjny} \\ 3 & \text{gdy odcinek jest nieatrakcyjny} \end{cases}$$

Dodatkowo krawędziom przypisano miary składowe, zależne od długości lub czasu przejazdu np.:

$$y_{k7} = y_{kx} * y_{kl} \quad \text{lub} \quad y_{k8} = y_{kx} * y_{k2} \quad \text{gdzie: } x = 3, 4, 5, 6.$$

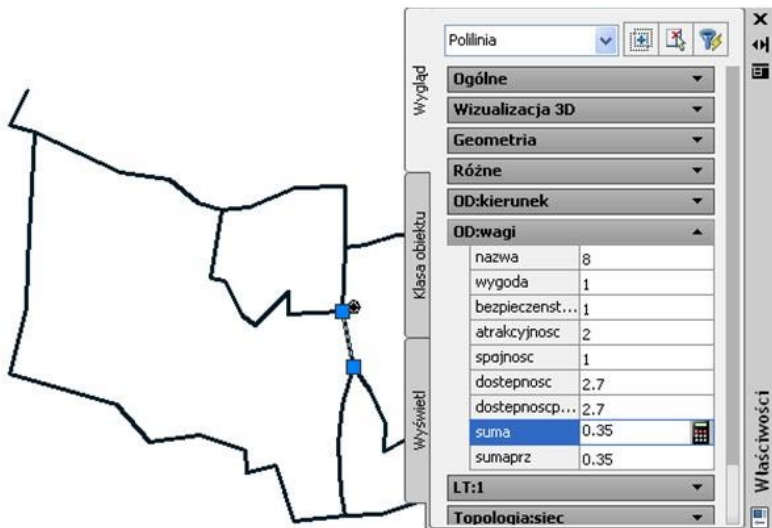
Struktury sieciowe, opisane zgodnie z przyjętą metodyką, można analizować w poszukiwaniu dróg odpowiadających różnym użytkownikom  $U_r$ . Odbywa się to przez wybór podgrafu uwzględniającego kryteria  $U_r$ . Realizację praktyczną tego zadania wykonano wykorzystując narzędzia GIS, w których są dostępne znane algorytmy sieciowe Dijkstra i Ballmana-Forda (Gould, 1988; Kulikowski, 1968). Wykonując analizy wielowymiarowe, określony wyżej model matematyczny z opisanymi miarami należało poddać normalizacji (ewentualnie standaryzacji). W tym przypadku przyjęto normalizację zgodnie z zasadą (Strahl, 1998):

$$y_{wn}^n = \frac{y_{wn}}{y_{w|MAX}}, \quad y_{km}^n = \frac{y_{km}}{y_{k|MAX}},$$

sprowadzając różne miary cech do wartości porównywalnych. Nadając wagi poszczególnym miarom, można pokusić się o analizy wielowymiarowe, uwzględniające zindywidualizowane wymagania różnych  $U_r$ .

## Model geometryczny i atrybutowy tras rowerowych

Pierwszym etapem realizacji praktycznej części pracy była rejestracja różnych wariantów tras rowerowych między wybranymi punktami miasta (rys. 4). Jeżdżąc rowerem z urządzeniem nawigacyjnym GNSS (NMEA, 2005; Misra, Enge, 2006), rejestrowano prze-



Rys. 2. Wyróżniony odcinek z przypisaną tabelą wag



Rys. 7. Przykłady zróżnicowania odcinków tras rowerowych

bieg trasy w przestrzeni, czas przejazdu i odległości. Te dane zweryfikowano w oparciu o dane z Geoportalu (www4, 2010) i w efekcie zbudowano model geometryczny sieci jako zbiór odcinków i węzłów (rys. 5b). Trasy rowerowe przebiegały istniejącymi drogami, a na niektórych odcinkach dróg posiadały wytyczone ścieżki dla rowerzystów.

Aplikacje GIS udostępniają moduły analityczne do przeprowadzenia analiz sieciowych. Realizując część praktyczną wykorzystano dostępną aplikację AutoCAD Map. Zbudowano w niej tabele atrybutowe i przypisano odcinkom sieci cechy oraz wagi (rys. 2). Przypisanie wartości miar wagowych odcinkom wiązało się z klasyfikacją ich do odpowiedniej grupy. To zadanie zrealizowano uwzględniając szczegółowy opis odcinków, wraz z dokumentacją fotograficzną (rys. 7), na której wyraźnie widać, że przebiegały one: ścieżkami rowerowymi, drogami utwardzonymi zbiorczymi, osiedlowymi i gruntowymi.

## Wyniki analiz sieciowych

Analizy sieciowe przeprowadzono w oparciu o wyżej przedstawioną klasyfikację odcinków. Wykonano analizy wielowariantowe (rys. 6) w poszukiwaniu tras rowerowych o przyjętych parametrach: najkrótszej (5211 m), najszybszej (17,1 min). Trasę najprostszą, najatrakcyjniejszą, najwygodniejszą i najbezpieczniejszą wyznaczono przy uwzględnieniu długo-

ści odcinków – tzw. miar składanych. Trasa najprostsza preferowała drogi główne, przyjęto, że to trasa którą najprościej opisać, najłatwiej wskazać.

Trasa najkrótsza okazała się także trasą, którą najszybciej można pokonać. Jednak nie jest to trasa najbezpieczniejsza. Wybór trasy najkrótszej i najszybszej wiąże się, w tym przypadku, ze spadkiem bezpieczeństwa. Należy zauważyć, że wyniki analiz wskazują, że trasa najbezpieczniejsza jest dłuższa tylko o 171 m (3%) od trasy najkrótszej, ale czas jej przejazdu jest o 5,1 min. (30%) dłuższy od trasy najszybszej. W tym analizowanym przypadku bezpieczeństwo wiąże się z korzystaniem ze ścieżek rowerowych oraz z pokonywaniem skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, na których jest długi czas oczekiwania na przejazd. W oparciu o analizy wielowymiarowe, przyjmując znormalizowane wartości cech odcinków, określono trasę najkorzystniejszą – optymalną. Wyznaczona trasa w największym stopniu pokrywa się z przebiegiem ścieżek rowerowych.

Porównanie uzyskanych wyników uświadamia, jak istotny jest wybór trasy rowerowej, jak niewielkie zmiany w przebiegu trasy zmieniają jej parametry. Świadczy to o tym, jak niewiele może decydować o bezpieczeństwie rowerzystów. Na tle dostępnych statystyk wypadków drogowych z udziałem rowerzystów, uzyskane wyniki powinny dać dużo do myślenia.

## Wnioski

Istnieje bardzo dużo możliwości wyboru tras, po których może poruszać się rower. Rowerzysta może dokonać właściwego wyboru, jeśli dobrze zna teren. Takie doświadczenie zdobywa się dopiero po kilku latach codziennej jazdy rowerem. Dokonując złego wyboru trasy, rowerzysta powoduje duże zagrożenie życia swojego i innych uczestników ruchu oraz może zniechęcić się do dalszego korzystania z roweru jako środka transportu.

Zaproponowana metodyka opisu matematycznego sieci tras rowerowych pozwoliła na bogaty opis odcinków tras. Wykonana aplikacja, w oparciu o przyjęty model, umożliwiła dokonanie wielowariantowych analiz w celu wyboru odpowiedniej trasy, zależnej od potrzeb uczestnika ruchu.

W celu zwiększenia bezpieczeństwa rowerzystów, istnieje potrzeba stworzenia ogólnodostępnych serwisów – portali, pozwalających dokonywać prawidłowego wyboru trasy rowerowej z uwzględnieniem różnorodności parametrów odcinków, szczególnie czynnika związanego z bezpieczeństwem.

## Literatura

- Autodesk, 2009: Podręcznik użytkownika. Aplikacja AutoCAD Map 3D 2009. 2008. Autodesk, Inc., San Rafael, United State of America.
- Gould R., 1988: Graph theory. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Menlo Park, California, United State of America.
- Hyla M., 1996: Miasta dla rowerów nie dla samochodów! Wydawnictwo Zielone Brygady, Kraków.
- Krystek R., Budzyński M., Jamroz K., Michalski L., Oskarbski J., Kastner J., Kustra W., Romanowska M., Oskarbska I., Witkowska M., 2006: GAMBIT Olsztyński miejski program bezpieczeństwa ruchu drogowego. Część I diagnoza stanu i systemu BRD. Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Gdańsk.
- Kulikowski J.L., 1986: Zarys teorii grafów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Lewandowicz A., 2009: Analiza tras rowerowych z Pieczewa do Kortowa. Praca magisterska, UWM w Olsztynie, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji.
- Misra P., Enge P., 2006: Global Positioning System. Signals, measurements, and performance. Ganga-Jamuna Press, Lincoln, Massachusetts.

- NMEA, 2005: NMEA Reference Manual, User Manual-V2. SIRF Technology, Inc., San Jose, United State of America.
- PKE, 1999: Postaw na rower – podręcznik projektowania przyjaznej dla rowerów infrastruktury. Polski Klub Ekologiczny, Kraków.
- Strahl D., 1998: Taksonomia struktur w badaniach regionalnych. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu, Wrocław.
- UM, 2001: Ścieżki rowerowe. Olsztyn – Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego. Opracowanie Wydziału Strategii i Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta. Olsztyn, Mapa nr 6.
- UM, 2003: Olsztyn miastem rowerów, ścieżki rowerowe w mieście. Opracowanie Wydziału Strategii i Rozwoju Miasta Urzędu Miasta. Olsztyn.
- Wilson G.J., 2000: Wprowadzenie do teorii grafów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- www1, 2009: <http://www.olsztyn.zm.org.pl/download/olsztyn/ols-prezentacja-cz1.pdf>
- www2, 2009: [http://www.olsztyn.zm.org.pl/?a=olsztyn-zdarzenia\\_2006\\_2008](http://www.olsztyn.zm.org.pl/?a=olsztyn-zdarzenia_2006_2008)
- www3, 2010: [http://www.zm.org.pl/?a=dekalog\\_projektowania](http://www.zm.org.pl/?a=dekalog_projektowania)
- www4, 2010: <http://maps.geoportal.gov.pl>
- www5, 2010: <http://maps.google.com/maps>

### **Abstract**

*In many Polish cities bike routes became an inherent part of municipal infrastructure (Kraków, Gdańsk, Warsaw) and they are more and more used by the inhabitants in their everyday communication. In spite of growing outlays on their construction, the bike routes do not represent yet a coherent network structure. People using bikes as means of transportations not always can translocate only on bike routes. They have to use municipal roads and join car traffic or ride on sidewalks designed only for pedestrians. When riding on a bike they take decisions concerning the choice of the route: safe, short, nice and attractive. The choice of the route depends on the priorities and the character of the participant. Not always his choice is right, statistics register a large number of road accidents with the participation of bikers.*

*The work presented in the paper goes out to meet bike users halfway. Its aim is to present methods to build GIS applications permitting to choose bike routes meeting different requirements. We indicate the possibility to visualize bike routes with the use of navigation devices GNSS and geoportals. On the example of registered bike routes, we present the construction process of a geometric model of bike routes with GIS tools based of presented graph theory. Homogeneous elements of routes were distinguished: sections, hubs and they were described by parameters taking into account the length, average travel time and features connected with safety, coherence, attractiveness. These features were converted into numerical values according to the classification adopted. In effect, mathematical record of the network structure of bike routes was obtained in the form of a graph with feature functions.*

*In the practical part, the elaborated method of describing bike routes was verified by means of multi-variant and multi-dimension analysis in search of access routes between two selected places in the city. The results presented on the test example indicate that the safest route requires 30% more time than the shortest route. Thus, we realize that bike communication in not homogenous network structure is the means of transportation requiring very reasonable utilization. Making the choice of the route we should take into account its parameters and particularly safety.*

mgr inż. Alicja Packa  
alicjapacka@gmail.com

dr hab. inż. Elżbieta Lewandowicz, prof. UWM  
leela@uwm.edu.pl  
www.ela.mapa.net.pl

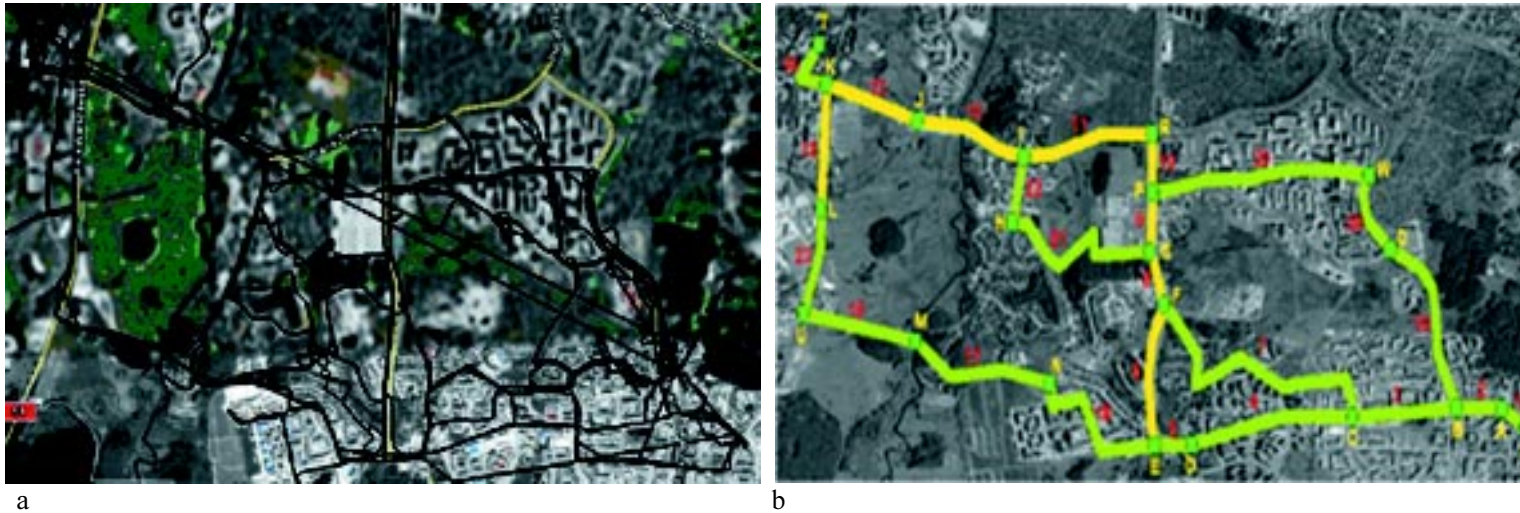


Rys. 3. Istniejące i planowane ścieżki rowerowe w Olsztynie (źródło: UM, 2001; 2003; www2, 2009)

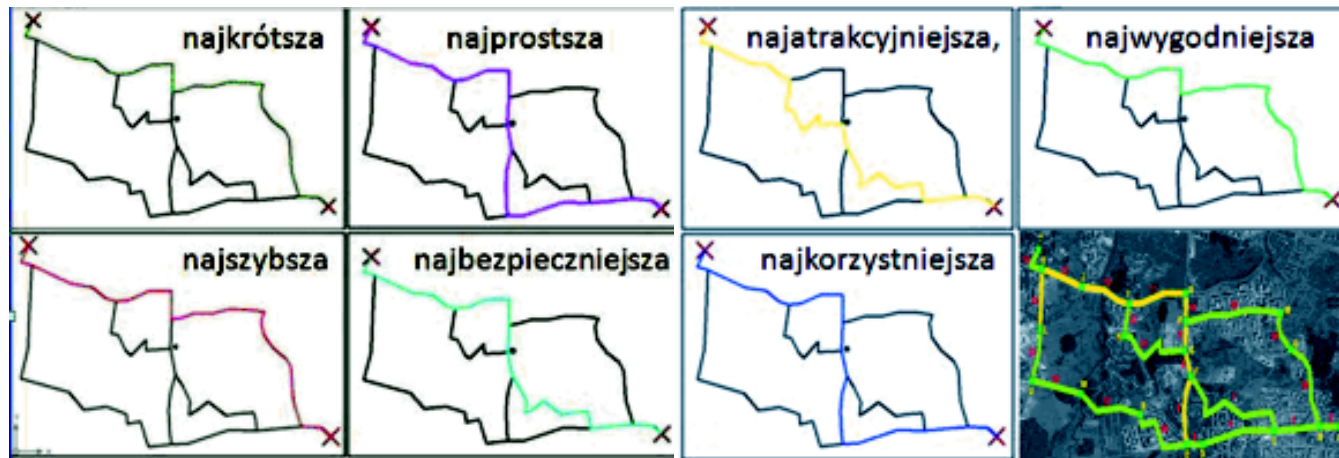


Rys. 4. Lokalizacja miejsca badań (źródło: www4, 2010; www5, 2010)





Rys. 5: a – wizualizacja zarejestrowanych tras rowerowych w programie Google Earth, b – model geometryczny zbudowany w ArcMap przy wykorzystaniu podkładu ortofotomapy z Geopotral.gov.pl (w układzie 2000), kolorem żółtym wyróżniono istniejące ścieżki rowerowe



Rys. 6. Wyniki analiz wielokriteriowych przy poszukiwaniu trasy o zadanych parametrach