

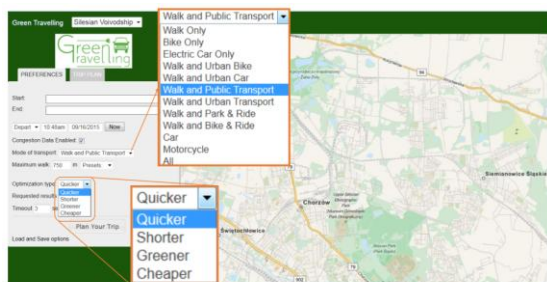
## WYZNACZANIE TRASY W PLANERACH PODRÓŻY Z ZASTOSOWANIEM FUNKCJI HEURYSTYCZNYCH

### Streszczenie

W artykule zaproponowano uzupełnienie algorytmu  $A^*$  o inne heurystyki aniżeli powszechnie stosowane w tym celu odległości Manhattan czy Euklidesowe. W przedstawionej metodzie, jako źródło danych dla wartości funkcji heurystycznych zastosowano macierz wskaźników charakteryzujących sieć drogową. Taki wskaźnik nadawany jest każdemu rejonowi przestrzennemu (reżimowi) powstałemu na skutek jej celowej delimitacji. Ścisłej, dla każdego rejonu można zdefiniować zbiór wskaźników: multimodalnych, bezpieczeństwa, ekologicznych i innych. Każdy ze wskaźników podkreśla inny sposób korzystania z sieci transportowej w danym rejonie przez jej użytkownika. Zbudowana w ten sposób heurystyka ma dwie podstawowe funkcjonalności. Dla rejonów przestrzennych o dużych wymiarach (powierzchni) przyspiesza czas wykonywania obliczeń algorytmu  $A^*$ . Dla rejonów o małych wymiarach obszarowych profiluje trasę zgodnie z wolą użytkownika w sposób inny niż heurystyki oparte na prostych miarach przestrzennych. Słowa kluczowe: algorytm  $A^*$ , algorytm A STAR, funkcja heurystyczna, planer podróży, zrównoważony rozwój transportu, Open Street Map.

### WSTĘP

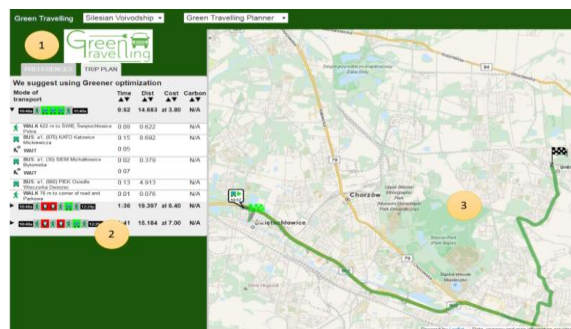
W trakcie planowania podróży (ang. pretrip) świadomy użytkownik sieci transportowej, poza zdeterminowanym wyborem trasy (również: ścieżki, określonej punktem rozpoczęcia i zakończenia podróży), staje przed wieloma innymi dylematami. Podstawowym z nich jest wybór środka transportu dla planowanego przemieszczenia, zwłaszcza, jeśli użytkownik planera nie dysponuje samochodem osobowym oraz gdy planowana podróż jest incydentalna. Kolejnym dylematem jest wybór sposobu wyznaczenia (optymalizacji kryterialnej) trasy podróży w danej sieci transportowej. Sposób ten zależy od zachowań (realizowanych preferencji) i preferencji komunikacyjnych (nie zawsze możliwych do zrealizowania) osoby podróżującej. Zasadniczo w większości planerów podróży można wybierać pomiędzy przemieszczeniem (trasą): najszybszym, najkrótszym, w nielicznych: najtańszym. Możliwości w zakresie wyboru opcji optymalizacji dla celów wyznaczania trasy prezentuje rysunek 1.



Rys. 1. Planer podróży GT- opcje wyboru optymalizacji trasy.

Na rysunku 1 w górnej liście wyboru zaznaczono możliwe do wyboru środki transportu lub ich kombinacje (wybrano transport zbiorowy z dojeściem i odejściem pieszym). Znaczna część opcji możliwych do wyboru łączona jest z przemieszczeniem pieszym. W dolnej liście wyboru przedstawionej na rysunku 1 widoczne są dopuszczalne opcje (kryteria) optymalizacji trasy. Na rysunku zaznaczono opcję „Quicker” spośród czterech dostępnych opcji (w tej wersji planera [2]). Oznacza to, że użytkownik pomiędzy wskazanymi na mapie punktami startu i zakończenia podróży chce odna-

leźć najszybsze (czasowo) połączenie. Z uwagi na dynamiczne zmiany parametrów sieci transportowych dostępne są również opcje uzależniające wybór trasy od czasu rozpoczęcia podróży, warunków ruchu w sieci itp.



Rys. 2. Planer podróży GT- wyznaczona trasa z wyborem opcji optymalizacji: „najszybsza”.

Podróż najkrótsza wyznaczana jest w grafie opisującym sieć transportową po sumie najkrótszych odcinków (łukach grafu) łączących punkt rozpoczęcia i zakończenia podróży. W literaturze przedmiotu: „optymalizacja systemów dyskretnych” jest wiele opracowań na temat wyznaczania najkrótszej ścieżki w sieci [5,6]. Odległość pomiędzy węzłami grafu opisującego daną sieć transportową może być określona na podstawie odległości fizycznych po sieci lub wyznaczona z pomocą zdefiniowanych macierzy wag (np. macierz wag standaryzowana wierszami) dla macierzy sąsiedztwa. Podróż po najkrótszej ścieżce w sieci niestety nie zawsze jest najszybsza. Wpływ na czas podróży mają parametry łuków sieci oznaczone za pomocą np. natężeń ruchu panujących na danym odcinku sieci transportowej. Jeśli w określonym planerze zaimplementowano dane informujące w sposób dynamiczny o zmianach charakterystyk ruchu na poszczególnych odcinkach sieci transportowej to użytkownik może spróbować wyznaczyć podróż najszybszą (z uwzględnieniem realnych warunków ruchu). Problematiczne jest w tym przypadku wyznaczenie precyzyjnych danych o ruchu, określanych z wystarczająco krótkim interwałem pomiarowym. Dokładność stosowanych informacji tego typu w popularnych serwisach informacyjnych dochodzi maksymalnie do 80% [7,8].

Na rysunku 2 przedstawiono na przykładzie planera Green Travelling (GT) trasę wyświetlaną na mapie obszaru aglomeracji górnośląsko-zagłębiowskiej pomiędzy startem i końcem pewnej podróży (zielona i czarna flaga na rysunku). W celu wyznaczenia trasy tej podróży w zakładce planera właściwości („preferences”) wybrano opcję optymalizacji: „najszybsza” (Quicker). Na rysunku 2, numerem 1 zaznaczono zakładkę właściwości. Numerem 2 zaznaczono zakładkę, w której opisano proponowany przez planer plan podróży (ang. trip plan). Od góry do dołu wypisane są tam parametry wariantowych podróży, poczynając od podróży najszybszej, a kończąc na najwolniejszej. Każda podróż opisana jest w odniesieniu do każdego elementarnego przemieszczenia w łańcuchu przemieszczeń. Wyniki działania planera dla wyboru określonej trasy, tak jak pokazano to na rysunku 2 mogą być sortowane wg różnorodnych kryteriów (czas, odległość, koszt, emisja).

Użytkownicy sieci transportowej preferujący rozwiązania ekonomiczne mogą w planerach podróży wybierać opcję „najtaniejsza” (cheaper). W tych przypadkach koszt podróży szacowany jest na podstawie prostego modelu ekonometrycznego zaimplementowanego w planerze podróży (na ogół sumowanie taryf w środkach transportu zbiorowego i stałych kosztów przemieszczenia po danym odcinku sieci). Należy zauważyć, że model ekonomiczny może uwzględniać koszty wewnętrzne i zewnętrzne transportu. Dla transportu zbiorowego w celu wyznaczenia trasy najtańszej można korzystać bezpośrednio z danych o taryfach przewoźników opisanych w specyfikacji GTFS (ang. General Transit Feed Specification). W tym standardzie opisano trasy transportu zbiorowego oraz taryfy obowiązujące w poszczególnych środkach transportu przewoźników [9].

Podobnie użytkownik preferujący ekologiczne formy bytowania – może w planerze podróży wybrać opcję „ekologiczna podróż” (greener). W tym przypadku podróż po sieci indeksowana jest wartościami emisji związanymi z korzystaniem z określonego środka transportu na ściśle określonych odcinkach sieci transportowej (warunkujących spalanie i konsekwentnie wielkość emisji, zależne np. od pochylenia podłużnego drogi). Ta opcja jest ściśle skorelowana ze środkiem transportu.

Katalog opcji optymalizacji wyboru trasy podróży jest szeroki, wyznaczenie trasy może zostać optymalizowane również pod kątem: bezpieczna, obejmuje odcinki sieci drogowej o wysokim poziomie bezpieczeństwa, atrakcyjna, przebiega przez odcinki widokowe, zawiera zdefiniowane punkty pośrednie tzw. POI (point of interest), uwzględnia inne oczekiwania użytkownika planera, nawet te nietypowe z punktu widzenia organizatorów transportu.

## 1. METODYKA IMPLEMENTACJI FUNKCJI HEURYSTYCZNYCH

Czas wyznaczenia trasy w planerze podróży zależy od wielu czynników. Przede wszystkim od charakterystyki danej sieci transportowej. Dla każdej sieci w planerach podróży budowany jest jej model matematyczny w formie grafu sieciowego. Struktura tego typu w zależności od gęstości sieci transportowej i dostępnych w niej środków transportu charakteryzuje się rozmiarem od kilku MB dla miast małych (<30.000 mieszkańców) nawet do kilkuset megabajtów dla aglomeracji (1-3 milionowych). Silnie warunkuje to algorytmy przeszukiwania grafów w zakresie czasu obliczeń (wymaga stosowania serwerów o dużej mocy obliczeniowej). Dodatkowo podróże łamane wymagają intensywnego przeszukiwania grafu sieciowego. Jednocześnie czas wyznaczenia ścieżki w sieci transportowej jest krytyczny. W przypadku planowania trasy czas ten może być dłuższy, ale również wtedy nie może przekraczać akceptowanego przez użytkowników czasu na odpowiedź (przyjmuje się

ok. 100 ms). Planery podróży po drobnych modyfikacjach mogą być również wykorzystywane, jako nawigacja samochodowa – w tych przypadkach dopuszczalny czas odpowiedzi planera podróży spada drastycznie (zależnie od gęstości).

Tak jak wspomniano wyżej sieć transportową w planerze podróży reprezentuje jej model matematyczny, tzw. graf sieciowy. Graf sieciowy jest to struktura złożona z węzłów i łuków. Węzły reprezentują skrzyżowania drogowe natomiast łuki połączenia pomiędzy nimi (drogi i ulice). Z uwagi na specyfikę niemal wszystkich sieci, zazwyczaj będzie to graf skierowany (dwa węzły łączą jeden lub dwa przeciwnie skierowane łuki). Każdy węzeł grafu jest numerowany niepowtarzalnym numerem, każdy łuk przypisywane ma dwa węzły, dla których stanowi połączenie fizyczne. Łukom grafu przypisuje się cechy fizyczne: odległość fizyczną, czas przejazdu, koszt podróży, stan techniczny itp. Cecha łuku może być również dowolną inną wartością, jaka tylko ma sens z punktu widzenia optymalizacji wyznaczenia ścieżki podróży. Ta funkcjonalność planerów pozwala na ich niemal dowolne dostosowywanie do preferencji i zachowań komunikacyjnych mieszkańców.

W każdym algorytmie przeszukiwania sieci w poszukiwaniu najkrótszej ścieżki wykorzystywane są cechy łuków i numery węzłów. Do takich algorytmów należą popularne procedury: Dijkstra, A\*, Forda-Fulkersona i inne [4,5,10]. Algorytmy te działają na podstawie zadeklarowanego węzła Startu i węzła Końca podróży (zwane również początkowym i końcowym) w danym grafie opisującym sieć transportową. Dla skomplikowanych grafów sieciowych procedury wyznaczania ścieżki mogą być czasochłonne obliczeniowo.

W celu przyspieszenia pracy algorytmu optymalizacji dyskretnej często stosuje się funkcje heurystyczne (potocznie nazywane heurystykami) przyspieszające ten proces. Heurystykami nazywa się metody znajdowania rozwiązań przybliżonych. Stosowane są one w celu minimalizacji czasu działania algorytmu w tych przypadkach, kiedy czas poszukiwania rozwiązań optymalnych jest zbyt długi. W zagadnieniach poszukiwania ścieżki w dużych grafach sieciowych czas ten jest na ogół nie do zaakceptowania. W przypadku proponowanej w niniejszym artykule metody celem zastosowanej heurystyki jest nie tylko przyspieszenie algorytmu, ale również dodatkowe profilowanie trasy podróży niezależnie od podstawowego kryterium optymalizacji ścieżki w sieci transportowej (heurystyczne profilowanie trasy podróży).

Zgodnie z definicją Encyklopedii PWN „heurystyka to umiejętność wykrywania nowych faktów i związków między nimi” (czyli formułowanie hipotez). Funkcja heurystyki na ogół nie jest jednoznacznie zdefiniowana w przeciwieństwie do algorytmu. Czasem trudno uchwycić intuicyjne heurystyki i zawrzeć w sformalizowanych ramach. Poza tym należy zauważyć, że heurystyka, mimo, że efektywna często bywa zawodna – na ogół właśnie z powodu braku jej uściślenia. Heurystyki powinny być budowane w oparciu o dwie podstawowe zasady: wyczerpania i relewantności (odpowiedniego doboru materiału). Jednym z głównych celów stosowania heurystyki jest wskazanie optymalnej strategii wyszukiwania. Heurystyki opierają się na intuicji lub na ściśle zdefiniowanych kryteriach. W celu przyspieszenia algorytmu poszukiwania najkrótszej ścieżki w sieci transportowej realizuje się po osiągnięciu każdego punktu pośredniego dodatkową procedurę obliczeniową opartą na wybranej heurystyce (np. algorytm A\*, również A STAR). W tej procedurze następuje szacowanie drogi pozostającej od każdego osiąganego węzła pośredniego do węzła końcowego. Algorytm poszukiwania ścieżki wybiera kolejno te węzły sieci dla poszukiwanej ścieżki, które określone są następującym równaniem (stanowią najlepszy prognostyk dotarcia do węzła końcowego zgodnie z heurystyką):

$$F = C + H \quad (1)$$

gdzie:

$C$  - stały (koszt, odległość, czas, inna cecha łuku) przemieszczenia z węzła startu do pozycji aktualnego (pośredniego) węzła w grafie. Parametr ten określa czas lub drogę potrzebną do osiągnięcia aktualnego węzła na ścieżce.

$H$  - jest to przewidywany 'a priori' szacunkowy (koszt, odległość lub czas) związany z przemieszczeniem z aktualnego węzła pośredniego do węzła ujścia. Jest to tzw. heurystyka, będąca przedmiotem zainteresowania tego artykułu.

Wartość zmiennej  $H$  jest szacowana w kolejnych węzłach pośrednich na ścieżce ruchu z węzła początkowego do końcowego. Jednym z podstawowych sposobów na obliczenie wartości funkcji  $H$ , jest obliczanie jej wartości na podstawie odległości typu Manhattan. Odległości pozostającej od węzła aktualnie cechowanego wartością  $F$  do węzła ujścia. Odległość Manhattan wykorzystywana jest głównie w zagadnieniach i grach opartych na stałym polu gry, które można zastosować praktycznie dla dowolnych problemów (jest to głównie problem właściwego sposobu delimitacji sieci transportowej). Istnieją inne sposoby wyznaczania funkcji  $H$ , np. na podsta-

wie odległości euklidesowej (fizycznej), w tych przypadkach, kiedy opis przestrzeni rozwiązań (gry) jest ciągły. W opisanych przypadkach wartość heurystyki oparta jest na prognozie odległości pozostającej do przebycia w drodze do punktu końcowego podróży. Taka prognoza może np. nie uwzględnić wzniesień na dalszej trasie, ograniczeń technicznych przekrojów sieci, warunków losowych itp.

Określona na podstawie takich heurystyk, wartość heurystyki  $H$  ma jednoznacznie wskazywać te ścieżki w sieci transportowej, które sprzyjają realizacji przemieszczeń multimodalnych, ekologicznych lub w inny sposób zdefiniowanych heurystykami (tym niemniej w zgodzie ze zrównoważonym rozwojem transportu, ZRT). To oznacza, że każdy wyróżniony fragment obszaru sieci transportowej (rejon komunikacyjny, rejon przestrzenny) zostaje w tym podejściu odciekowany wskaźnikiem: multimodalności, emisji spalin, bezpieczeństwa ruchu, zrównoważenia transportu lub dowolnym innym jak np. udogodnień dla niepełnosprawnych itp. Dla przykładu: im większa liczba i/lub dostępność przystanków transportu zbiorowego i ich większa różnorodność modalna w danym rejonie przestrzennym

Tab. 1. Wybrane wskaźniki stosowanych heurystyk

| Nazwa wskaźnika                | Definicja   | Zastosowanie/interpretacja  |
|--------------------------------|---|---|
| multimodalny                   | $mw_{ij}^{mn} = \frac{1}{Aw_{ij} + Tw_{ij} + Pw_{ij}} \quad (3)$ <p>gdzie: A-liczba przystanków: autobusowych, T-tramwajowych, P- kolejowych itd. w rejonie ij. <math>w_{ij}</math> -waga mody transportu w rejonie</p>   | Charakteryzuje dany rejon przestrzenny w zakresie średniej liczby przystanków różnych środków transportu. Ścieżka podróży wyznaczana jest na podstawie rejonów sprzyjających podróżom multimodalnym. Większa liczba przystanków różnych środków sprzyja realizacji przesiadek na każdym etapie podróży w kierunku do węzła końcowego podróży. Z uwagi na specyfikę algorytmu A* zastosowano odwrócenia wartości średniej parametru w rejonie  |
| zrównoważony                   | $mw_{ij}^{mn} = \frac{1}{mw_{ij}^{mn} y_1 + \frac{PPw_{ij} + PWw_{ij} + PIw_{ij} + \dots}{\sum w_{ij}} y_2} \quad (4)$ <p>gdzie: PP -liczba parkingów przy krawężnikowych, PW- liczba parkingów wydzielonych, PI-liczba innych kolektorów ruchu, <math>w_{ij}</math> - wagi poszczególnych parkingów w rejonie ij, <math>y_1</math> - waga pomiędzy liczbą przystanków, a parkingów w danym rejonie</p> | Charakteryzuje dany rejon w zakresie średniej wartości ważonej obliczonej dla liczb: przystanków transportu zbiorowego i kolektorów ruchu (parkingi wydzielone, przykrawężnikowe i inne). Ścieżka ruchu wyznaczana w ten sposób umożliwia podróżnemu na każdym etapie podróży zaparkowanie pojazdu i przesiadkę do transportu zbiorowego. Taki wskaźnik określa rejon przestrzenne sprzyjające takim zachowaniom, które prowadzą do zrównoważenia rozwoju transportu.                             |
| ekologiczny                    | $m_{ij}^{mn} = \frac{1}{(CO_2w_{ij} + NO_2w_{ij} + CH_2w_{ij} + \dots) \sum w_{ij}} \quad (5)$ <p>gdzie: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>x</sub> - wielkości emisji w danym rejonie przestrzennym, <math>S_{ij}</math> - powierzchnia zieleni miejskiej zdolna akumulować zanieczyszczenia w danym rejonie (drzewa, trawy, krzewy).</p>  | Zastosowanie takiego wskaźnika umożliwia takie kształtowanie podróży w sieci transportowej, które równomiernie rozkłada podróże, stosownie do ich szacowanych emisji, tak, aby zanieczyszczenia rozkładały się równomiernie na powierzchnię zieleni miejskiej zdolnej akumulować generowane emisje zanieczyszczeń. Innymi słowy: planer w takim algorytmie rozkłada ścieżki podróży na te rejon przestrzenne, które lepiej będą akumulowały zanieczyszczenia z sieci transportowej.               |
| bezpieczny                     | $mw_{ij}^{mn} = \frac{ZDw_{ij} + WDw_{ij}}{\sum w_{ij}} \frac{\sum w'_{ij}}{PPRw_{ij} + SPw_{ij} + PPw_{ij}} \quad (6)$ <p>gdzie: ZD- oznacza liczbę zdarzeń drogowych w danym rejonie przestrzennym i odpowiednio liczbę wypadków drogowych. PPR -liczbę punktów ratownictwa medycznego, SP- liczbę jednostek straży pożarnej, PP-liczbę posterunków policji.</p>                                      | Tak określona heurystyka powoduje wyznaczanie ścieżki w oparciu o rejon o wysokim bezpieczeństwie w zakresie ruchu drogowego jak również takich, w których istnieje wysokie prawdopodobieństwo uzyskania określonego rodzaju pomocy w postaci interwencji policji, straży pożarnej lub pogotowia ratunkowego.   |
| dynamiczny                     | $mw_{ij}^{mn} = \frac{1}{(l_{ij}^5w_{ij} + l_{ij}^4w_{ij} + l_{ij}^3w_{ij} + l_{ij}^2w_{ij} + l_{ij}^1w_{ij})/5} \quad (7),$ <p>gdzie: <math>l_{ij}</math> - określa procent ulic w rejonie przestrzennym o liczbie pasów: 5,4,3,2,1 z odpowiednimi wagami.</p>   | Wskaźnik umożliwia zastosowanie heurystyki, która w wyborze dalszej drogi preferuje rejon przestrzenne, w których dominują ulice wielopasowe. Sposób obliczenia ścieżki powinien sprzyjać realizacji dynamicznych podróży (założeniu korzystania z indywidualnego środka transportu). Wskaźnik można modyfikować z wykorzystaniem parametrów ruchu drogowego. Większa liczba pasów przy znajomości natężeń pozwala określić odcinki ulic, na których możliwe jest dynamiczne wykonywanie manewrów |
| obsługi osób niepełnosprawnych | $mw_{ij}^{mn} = \frac{1}{(lp_{ij}w_{ij} + lw_{ij}w_{ij} + lssd_{ij}w_{ij} + lpon_{ij}w_{ij} +) / 4} \quad (8),$ <p>gdzie: lpj- liczba przejść dla pieszych w poziomie jezdni, lw -liczba wind, lssd - liczba sygnalizacji świetlnych z sygnalizacją dźwiękową dla osób niepełnosprawnych, lpon - liczba przejazdów przez (pod) jezdnię dla osób niepełnosprawnych</p>                                   | W trasowaniu ścieżki tego typu główną rolę odgrywają rejon, które sprzyjają- ułatwiają przemieszczanie się osobom niepełnosprawnym. W rejonach tym zastosowano liczne udogodnienia przeznaczone dla poruszania się osób niepełnosprawnych.  |

W artykule poruszono problem wyznaczania heurystyki  $H$  we współczesnych sieciach transportowych, które charakteryzują się znaczną różnorodnością i dużą dynamiką zmian. Funkcja  $H$  w sensie ogólnym może być przyjęta zarówno na podstawie odległości Manhattan, jak i euklidesowej. Tym niemniej takie heurystyki nie oddają nic więcej poza geometrycznymi właściwościami obszaru, na którym leży sieć transportowa. Heurystyki te nie są, więc specjalnie interesujące z punktu widzenia współczesnych - skomplikowanych sieci transportowych. Autorów interesuje natomiast uwzględnienie w wartości funkcji  $H$  specyfiki (zwłaszcza multimodalnej) danej sieci transportowej. We współczesnych sieciach transportowych w zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju transportu powinno się promować maksymalne wykorzystanie środków transportu zbiorowego (zwłaszcza tych ekologicznych). Oznacza to, że proponowana heurystyka  $H$  powinna pomagać trasować sieć transportową nie po najkrótszej odległości do węzła pośredniego do ujścia, ale po takiej „odległości”, która sprzyja przemieszczeniom multimodalnym (w tym ekologicznym). Powinna sprzyjać również przemieszczeniom pomiędzy indywidualnymi środkami transportu, a transportem zbiorowym (wspierać rozwiązania P&R, w zgodzie z ideą zrównoważonego rozwoju transportu). W celu realizacji takiego podejścia do obliczania trasy dowolną sieć transportową należy ocechować wskaźnikami (heurystykami): „multimodalnymi”, ekologicznymi, zrównoważonymi i innymi, które wskazują jak bardzo multimodalny, ekologiczny, zrównoważony lub w inny sposób specyficzny jest dalszy (za węzłem pośrednim – aktualnie ocechowanym) fragment sieci transportowej.

sieci tym większy wskaźnik multimodalności danego fragmentu sieci transportowej. Wskaźniki takie można określić również na podstawie liczby parkingów P&R w danym rejonie, wypożyczalni samochodów elektrycznych, rowerów miejskich i innych. Obliczone wskaźniki dla obliczania wartości funkcji heurystycznej zapisywane są w macierzy o wymiarze  $m$  na  $n$ :

$$MW = [mw_{ij}]_{m \times n} \quad (2)$$

gdzie:

$m$  - liczba wierszy macierzy wynikająca z podziału sieci na rejony przestrzenne o zdefiniowanym wymiarze podłużnym i poprzecznym,  $n$  - adekwatna liczba kolumn.

W celu określenia wartości wskaźników dla heurystyki  $H$  należy zastosować metodę umożliwiającą przedmiotowe analizy niemal w dowolnej sieci transportowej. Pamiętać należy, że heurystyki mają za zadanie głównie przyspieszyć działanie programu. Dlatego powinny być jak najprościej definiowane i tworzyć jak najmniej liczne struktury danych. Z drugiej strony wymiar  $m$  i  $n$  powinien być tak dobrany, aby umożliwić silne wariantowanie tras przebiegu w sieci transportowej. Z punktu widzenia wariantowania tras delimitacja sieci powinna doprowadzić do sytuacji, w której w każdym rejonie przestrzennym znajduje się maksymalnie jeden węzeł lub skrzyżowanie (jest to bardzo trudne do realizacji w praktyce).

Sposób pozyskiwania danych na potrzeby definiowania wartości wskaźników dla heurystyki  $H$  opisano w kolejnym rozdziale. Zakres stosowalności metody określony wyżej, jako „niemal w dowolnej sieci” jest prawdziwy, z zastrzeżeniem, że nie każda sieć transportowa jest opisana w formacie OSM (Open Street Map) lub innym stanowiącym źródło danych dla heurystyk. Ponadto nie wszystkie mapy OSM charakteryzują się pełną funkcjonalnością (mają wszystkie warstwy danych) niezbędna dla obliczania heurystyk. W artykule zaproponowano zbiór procedur określania wartości podstawowych heurystyk wymienionych w tabelicy 1.

## 2. ŹRÓDŁA DANYCH

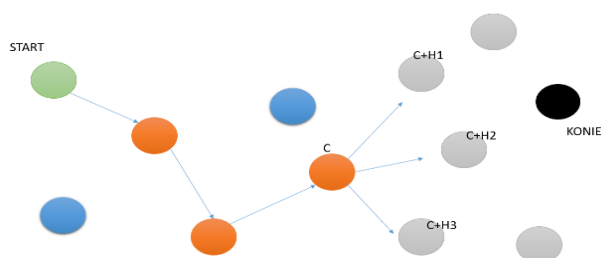
W celu określenia wartości heurystyk na podstawie wzorów zamieszczonych w tabelicy 1 należy przygotować dane opisujące interesujący aspekt sieci transportowej. Takim źródłem danych jest na przykład OSM (ang. Open Street Map). W źródłach danych tych map znajduje się wiele interesujących z punktu widzenia analityków sieci transportowych informacji. W pierwszym kroku należy pobrać interesujący fragment obszaru sieci transportowej w formacie OSM. Jest to możliwe np. na stronie OVERPASS [11]. Odczytane dane o elementach mapy OSM należy zapisać w jednym z formatów plików wyjściowych dostępnych dla tych map np. \*.kml. Odczytana w ten sposób mapa zawiera dane sieci transportowej na obszarze ograniczonym współrzędnymi:

$$S = \{(W_{\min}, L_{\min})(W_{\max}, L_{\max})\} \quad (9)$$

gdzie:

$(W_{\min}, L_{\min})$  - określa odpowiednio minimalną szerokość i długość geograficzną wyciętego obszaru sieci,  $(W_{\max}, L_{\max})$  - odpowiednio maksymalną szerokość i długość geograficzną wyciętego obszaru.

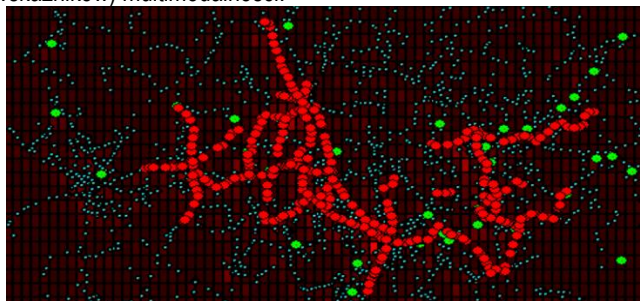
W kolejnym kroku należy przygotować narzędzie (program komputerowy) zliczający liczbę przystanków PuT (Public Transport) w każdym z analizowanych i-rejonów przestrzennych ( $i=m \times n$ ). Uprzednio przeprowadza się delimitację obszaru sieci transportowej na  $n$ -wierszy i  $m$ -kolumn. Można zliczać również inne obiekty infrastruktury transportu sprzyjające podróżom multimodalnym (wydzielone pasy ruchu dla PuT, punkty przesiadkowe itp.). Zliczanie parametrów dla wybranych rejonów przestrzennych realizuje zaawansowany parser plików (specjalizowany algorytm przetwarzający tekst) xml analizując zawartość i określając przyporządkowanie obiektów OSM do poszczególnych rejonów analizy. Wymiary podstawowego rejonu określa się stosownie dla przewidywanego rozkładu gęstości poszukiwanych charakterystyk w obszarze analizy. Wartości parametrów skali  $m$  i  $n$  należy dobrać również heurystycznie w zależności od gęstości lub innych właściwości sieci transportowej. Na bazie zaobserwowanych wartości wskaźnika liczby przystanków danego typu w obliczeniowym rejonie tworzony jest wskaźnik multimodalności danego rejonu, uwzględniający w wagach parametrów wytyczne polityki transportowej.



Rys. 3. Przykład ilustrujący zastosowanie heurystyki w sieci

W efekcie przeprowadzenia procedury obliczenia wskaźników multimodalności dla analizowanej sieci otrzymywana jest macierz danych wyjściowych dla heurystyki. W trakcie działania algorytmu rozpoczynającego ścieżkę w sieci transportowej reprezentowanej przez graf każdorazowo dla węzłów pośrednich heurystyka  $H$  obliczana jest na podstawie wartości macierzy [WM]. W takiej macierzy przeszukiwanie ścieżki do ujścia może odbywać się na podstawie odległości Manhattan lub euklidesowej. Podział wyciętego obszaru

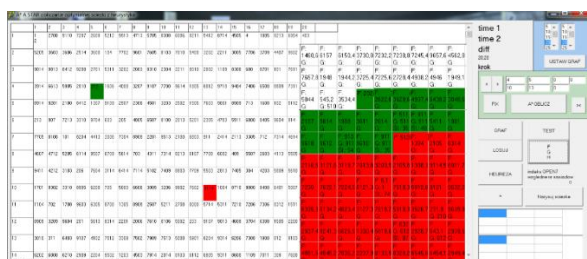
z map OSM następuje na podstawie jednorodnej siatki delimitacji z wykorzystaniem parametru skali  $m$  i  $n$ . Parametr  $m$  określa na ile wierszy zostanie podzielony badany obszar, a  $n$  na ile kolumn. Na przykład obszar aglomeracji górnośląsko-zagłębiowskiej, który w przybliżeniu jest szeroki na 60 km i wysoki na 40 km, można podzielić na 400 wierszy i 600 kolumn, co daje w efekcie  $i=540000$  rejonów analizy dla każdego wyznaczony jest wskaźnik (lub zbiór wskaźników) multimodalności.



Rys. 4. Heurystyka - przykład wizualizacji dla aglomeracji górnośląsko-zagłębiowskiej. Źródło: OSM/opracowanie własne

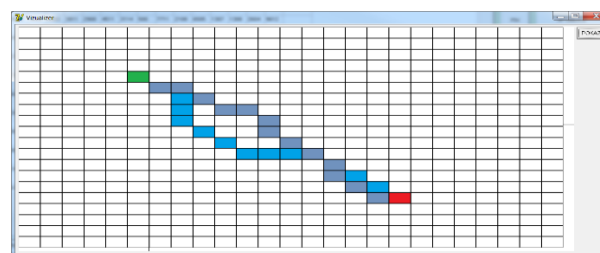
### 3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W celu realizacji testów heurystyk na przykładzie algorytmu  $A^*$  zrealizowano aplikację autorską. Rysunek 5 przedstawia okno główne tej aplikacji. W aplikacji wykorzystano podstawowy algorytm  $A^*$ . Porównywano dwa przypadki. Pierwszy, gdzie w algorytmie  $A^*$  funkcje heurystyczną przyjęto na podstawie odległości Manhattan, drugi, w którym w miejsce funkcji  $H$  zastosowano kolejno wskaźniki zamieszczone w tablicy 1. W programie wczytuje się stałe parametry grafu (liczba węzłów) oraz wczytuje się dla określonej liczby węzłów wartości łuków pomiędzy nimi. Podobnie wczytuje się wartości heurystyk uzyskane w sposób przedstawiony na rysunku 4. Po wybraniu węzła początku i końca podróży uruchamiany jest algorytm  $A^*$ . Algorytm działa w ten sposób, że w każdym kolejnym punkcie pośrednim szacowana jest funkcja przejścia z tego węzła do węzła końcowego na podstawie wartości stabilizowanych heurystyk



Rys. 5. Algorytm  $A^*$  dla testowania heurystyk, aplikacja autorska.

Na rysunku 6 przedstawiono dwa przykłady wyznaczenia trasy pomiędzy punktem rozpoczęcia podróży (pole w kolorze zielonym), a punktem zakończenia (pole w kolorze czerwonym). Linia koloru jasnoniebieskiego na rysunku 6 przedstawia ścieżkę wyznaczoną z wykorzystaniem wartości funkcji heurystyki odległości Euklidesowych. Na rysunku 6 linią koloru ciemnoniebieskiego wyznaczono obliczoną trasę podróży w przypadku, gdzie w wartości funkcji heurystyki zastosowano wskaźniki multimodalne dla danej sieci transportowej (równanie 3).



Rys. 6. Algorytm  $A^*$ , wizualizacja danych, aplikacja autorska.

Należy zaznaczyć, że w proponowanym podejściu występują zasadniczo dwa przypadki. Wskaźniki zaproponowane w tablicy 1 można zastosować w celu przyspieszenia obliczeń algorytmu  $A^*$  (procedura przyspieszenia obliczeń PPO). Drugim przypadkiem zastosowania tych wskaźników jest wsparcie konkretnych charakterystyk przemieszczeń użytkowników sieci transportowej (procedura wsparcia przemieszczeń PWP). W procedurze PPO należy sieć transportową podzielić na odpowiednio duże rejonny przestrzenne (makrorejonny). Takie duże rejonny o cechowane wartościami wskaźników multimodalnych pozwalają w znaczący sposób na przyspieszenie pracy algorytmu  $A^*$ . Ścieżka trasowana jest pomiędzy makrorejonami posiadającymi na swoim obszarze dużą liczbę punktów (możliwość dostępu do transportu zbiorowego). W procedurze PWP natomiast chodzi o maksymalne dopasowanie trasy do profilu zachowania komunikacyjnego użytkownika planera. W tym przypadku podział sieci powinien być zrobiony w oparciu o jak najmniejsze rejonny przestrzenne. Ten przypadek w stosunku do zastosowania heurystyk w oparciu o odległość Manhattan wyznacza ścieżki dłuższe, ale sprzyjające podróżowaniu: ekologicznemu, bezpiecznemu i zrównoważonemu.

### PODSUMOWANIE

W proponowanym podejściu można zasadniczo wykorzystać wskaźniki opisujące sieć transportową do przyspieszenia obliczeń algorytmu  $A^*$ . W odróżnieniu jednak od powszechnie stosowanych funkcji heurystycznych w oparciu o odległości Manhattan w tym przypadku „przyspieszenie działania algorytmu” następuje po rejonach sprzyjających zadanemu kryterium (może nie być optymalne). Takim kryterium może być multimodalność rejonów przestrzennych. W tym ujęciu porzucane są makrorejonny niesprzyjające realizacji określonych zachowań komunikacyjnych. W drugim przypadku może następować wydłużenie ścieżki krytycznej w sieci i spowolnienie obliczeń algorytmu  $A^*$ . Tym niemniej wyznaczona ścieżka będzie opisana na rejonach przestrzennych posiadających najlepsze wskaźniki dla wybranej grupy optymalizacyjnej (multimodalne, zrównoważonego rozwoju, bezpieczeństwa itd.)

Część badań i wyników przedstawionych w artykule została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach międzynarodowego projektu w ramach ERA-NET Transport III Future Travelling Programme: “A platform to analyze and foster the use of Green Travelling options (GREEN\_TRAVELLING)”.



## BIBLIOGRAFIA

1. Orzeł J., *Rola metod heurystycznych...*, „Bank i Kredyt”, R. 36, nr 5, 2005.
2. Sierpiński G., Staniek M., Celiński I., *Planowanie podróży proekologicznych z wykorzystaniem narzędzia Green Travelling Planner* (w druku).
3. Firlej-Buzon A., *Heurystyka - geneza oraz współczesne zastosowania*, ZIN nr 1, s. 23-37, 2003.
4. Bolc L.; Cytowski J., *Metody przeszukiwania heurystycznego*, t.1, Warszawa: PWN, 2002.
5. Sysło M.M., Narsingh D., Kowalik S.J., *Algorytmy optymalizacji dyskretnej*. PWN, Warszawa, 1999.
6. Sysło M.M., Narsingh D., Kowalik S.J., *Discrete Optimization Algorithms*. Dover Pub., 2006.
7. <https://www.google.pl/maps?source=tldso> (odsłona 29-09-2015).
8. <http://www.targeo.pl/> (odsłona 29-09-2015).
9. GTFS standard, <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference>, (odsłona 29-09-2015).
10. Cormen C.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C., *Wprowadzenie do algorytmów*, WNT, 2004.
11. <http://overpass-turbo.eu/> (odsłona 29-09-2015).

## ROUTING IN TRIP PLANER USING HEURISTICS

### *Abstract*

*The article proposes an algorithm A\* supplement to other heuristics than normally used for this purpose (Manhattan and Euclidean dist.). In the presented method, as the data source for the heuristics used matrix of indicators characterizing the road network. This indicator is assigned to each space regime due to its deliberate delimitation. Specifically, for each regime you can define a set of indicators: multimodal, safety, environmental friendly etc. Each of the indicators stresses otherwise use the transport network by the user. Constructed in this way heuristics has two basic func. For large areas of spatial regime accelerates compute time algorithm. For small areas of spatial profiles the route according to the user's expectations transport network in a manner other than heuristics based on measures of spatial. Keywords: A\* algorithm, A STAR algorithm, heuristic function, trip planner, sustainable transport, Open Street Map*

Autorzy:

mgr inż. Ireneusz **Celiński** –Katedra Systemów Transportowych i Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska w Gliwicach, ireneusz.celinski@polsl.pl

dr inż. **Marcin Staniek** – Katedra Systemów Transportowych i Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska w Gliwicach, marcin.staniek@polsl.pl

dr inż. **Grzegorz Sierpiński** – Katedra Systemów Transportowych i Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska w Gliwicach, grzegorz.sierpinski@polsl.pl