

# Projektowanie Sieci Transportu Publicznego Z Wykorzystaniem Algorytmu Memetycznego

## **Abstrakt**

W dynamicznym krajobrazie transportu miejskiego projektowanie sieci transportu publicznego leży na przecięciu innowacji i wydajności. W miarę ewolucji i rozwoju miast zapotrzebowanie na dobrze zaprojektowane i zorganizowane systemy transportu staje się coraz ważniejsze. Sieci transportowe nie tylko stanowią siłę napędową mobilności w miastach, ale także odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu charakteru i dostępności miasta. Ten skomplikowany system tras, węzłów i rozkładów jazdy odzwierciedla trudne wyzwanie, jakim jest harmonizacja różnych, często sprzecznych ze sobą, czynników, od gęstości zaludnienia i ograniczeń geograficznych po postęp technologiczny i względy środowiskowe. Sztuka projektowania sieci transportowych rozwija się jako wieloaspektowe przedsięwzięcie, wymagające osiągnięcia delikatnej równowagi między spełnianiem zmieniających się wymagań pasażerów (np. osób dojeżdżających do pracy) a wspieraniem zrównoważonego rozwoju.

W niniejszej pracy przedstawiamy algorytm memetyczny (MA) jako rozwiązanie problemu projektowania sieci transportowej (UTND – Urban Transit Network Design). MA opiera się na fundamentach tradycyjnego algorytmu genetycznego (GA – Genetic Algorithm). Proponowany algorytm zawiera algorytm wyszukiwania lokalnego „wspinaczki górskiej” (HCLS – Hill Climbing Local Search) w celu wzmocnienia i udoskonalenia wyników uzyskanych za pomocą tradycyjnego algorytmu GA.

Podstawowym wyzwaniem w tym problemie jest określenie efektywnego zestawu tras, który optymalizuje podróże pasażerów poprzez minimalizację czasu podróży i liczby przesiadek pomiędzy trasami. Nasze eksperymenty przeprowadzamy na dobrze znanych benchmarkach, w tym na szwajcarskiej sieci Mandla, trzech obszernych zbiorach danych znanych jako sieci Mumford, a także na oryginalnym zbiorze danych miasta Kraków. Wyniki pokazują, że HCLS znacząco poprawia jakość rozwiązania w porównaniu z tradycyjnym GA. W przypadku krakowskiej sieci miejskiej porównanie funkcji dopasowania (fitness) MA zastosowanej z istniejącym rozwiązaniem krakowskim i rozwiązaniem MA wykazuje poprawę w zakresie przesiadek bezpośrednich na poziomie 8,48%. Poprawa ta rozciąga się na inne aspekty i obejmuje poprawę odpowiednio o 3,06%, 1,69% i 3,72% w przypadku podróży bezpośrednich, podróży z jedną przesiadką oraz podróży z dwoma lub większą liczbą przesiadek.

W sieci Mandla zaproponowany przez nas algorytm wyróżnia się pod względem procentu bezpośrednich podróży, osiągając 100% satysfakcji całkowitego zapotrzebowania na transfer bezpośrednio w scenariuszach z ośmioma i siedmioma trasami. Z drugiej strony, wartości średniego czasu transferu (ATT) uzyskane w naszych wynikach są obiecujące i porównywalne z innymi podejściami. W przypadku sieci Mumford sugerowany algorytm przewyższa poprzednie prace pod względem bezpośrednich podróży z różnicami procentowymi wynoszącymi 3,37%, 3,78% i 7,03% w porównaniu z wynikami z pracy Islam i in. (2019) odpowiednio w Mumford1, Mumford2 i Mumford3. Pomimo korzystnych wyników MA, wartości ATT są prawie porównywalne z najlepszymi ATT z poprzednich prac, co podkreśla kompromis na korzyść poszukiwania bezpośrednich podróży.

Przeprowadzono też eksperyment w celu oceny wydajności proponowanego przez nas algorytmu (MA) poprzez obliczenie wartości dopasowania zarówno czystego GA, jak i MA bez operatora

mutacji (opierając się wyłącznie na HCLS) na trasach Mandl\_4 i Mumford3. Wyniki eksperymentów na sieciach Mandla i Mumforda podkreślają znaczną poprawę wartości funkcji przystosowania uzyskanych przez sugerowany MA w porównaniu z wolniejszymi, czystymi GA i MA pozbawionymi operatora mutacji, które mają tendencję do wpadania w pułapki lokalnych minimów.

Dodatkowo w przeprowadzonych eksperymentach z wykorzystaniem zbiorów danych Mandl średni czas wykonania MA został porównany z optymalizacją roju cząstek (PSO) w kontekście sieci Mandl. Proponowany MA wykazał swoją skuteczność w porównaniu z podejściem (Kechagiopoulos i Beligiannis, 2014), które opierało się wyłącznie na algorytmie PSO w celu rozwiązania problemu sieci Mandl. Rozbieżności czasu wyniosły odpowiednio 94,17, 99,24, 101,38 i 95,34 sekundy dla liczby tras 4, 6, 7 i 8. Jednakże ze względu na niewystarczającą dostępność danych analiza porównawcza oparta na czasie wykonania innych zbiorów danych nie była możliwa. Ogólnie rzecz biorąc, zastosowanie HCLS w rozwiązaniach generowanych przez GA zapewnia znaczną poprawę w porównaniu z poprzednimi pracami w zbiorach danych w Krakowie, a także Mandl i Mumford.

Drugim wyzwaniem jest zastosowanie techniki kompresji w celu „skondensowania” dużych grafów modelujących sieci transportowe, co skraca czas i wysiłek wymagany do znalezienia najlepszego rozwiązania. Proces kompresji przebiega w dwóch fazach. Początkowo opracowano narzędzie do tworzenia losowych grafów sieci w celu generowania wielu modeli sieci drogowych, zaprojektowanych z takim samym rozkładem prawdopodobieństwa niektórych cech, jak zbiór danych miasta Kraków. Po zakończeniu tej fazy otrzymano kilka grafów wraz z odpowiadającymi im macierzami czasu podróży i macierzami zapotrzebowania (OD matrix), gotowych do kompresji. Następnie do utworzonych grafów zastosowano technikę kompresji, w wyniku czego

powstają skompresowane grafy, a także skompresowane macierze czasu podróży i zapotrzebowania. Warto zauważyć, że proces kompresji pozwala zachować integralność oryginalnych danych. Następnie zidentyfikowano najlepsze rozwiązanie zarówno na grafach skompresowanych, jak i nieskompresowanych, co pozwoliło ocenić wpływ wykorzystania techniki kompresji. W naszych eksperymentach serię losowo wygenerowanych grafów wraz z wykresem sieci krakowskiej poddano kompresji uzyskując odpowiednio 45,6%, 51,0%, 52,3%, 54,3%, 57,7% i 62,4% redukcji rozmiaru grafu (liczby wierzchołków). Następnie zaproponowany algorytm MA wykonano zarówno na grafie oryginalnym, jak i skompresowanym. Następnie przedstawiono analizę porównawczą czasu realizacji wymaganego do uzyskania najlepszego rozwiązania problemu UTND wraz z odpowiadającymi im wartościami funkcji przystosowania. Technika kompresji przyniosła znaczną poprawę, skracając czas wykonania odpowiednio o 50,8%, 53,9%, 55,6%, 56,4%, 56,8% i 57,2% w porównaniu z oryginalnymi grafami. Co ciekawe, pomimo kompresji, jakość najlepszych wartości przystosowania pozostała niezmienna przy wykorzystaniu maksymalnego czasu podróży dla skompresowanych grafów przy zadanym zapotrzebowaniu pasażerów.

Trzecim wyzwaniem jest stopniowe przejście od istniejącej sieci transportowej do sieci zalecanej zaproponowanej przez nasz algorytm. Transformacja przebiegała w obrębie krakowskiej sieci transportowej, co stanowi studium przypadku. Nacisk położony był na szczegółowo określone wykonanie transformacji na kilku etapach, mając na celu zminimalizowanie zakłóceń i zapewnienie płynnego przejścia pomiędzy sąsiednimi rozwiązaniami „pośrednimi”. Integracja algorytmu węgierskiego (HA) i HCLS ma na celu zapewnienie skutecznego przejścia z obecnej sieci do nowej sieci. HA rozwiązuje problem przypisania istniejących i proponowanych tras sieciowych, podczas gdy HCLS określa najlepszą kombinację między nimi, ułatwiając stopniowe

przejście do proponowanej sieci. Wyniki eksperymentów ujawniają wahania zarówno zmienionych kosztów krawędzi, jak i wartości sprawności w całym procesie. Wahania te są jednak uzasadnione jako kompromis mający na celu osiągnięcie (sub)optimalnej sieci, zapewniającej spełnienie wymagań pasażerów na wszystkich etapach transformacji.