

Elżbieta MACIOSZEK

## PROGRAMY SŁUŻĄCE DO OBLICZANIA PRZEPUSTOWOŚCI ORAZ OCENY FUNKCJONOWANIA ROND NA ŚWIECIE

**Streszczenie.** Spośród programów służących do obliczania przepustowości rond w różnych krajach na świecie najczęściej stosowane są: Arcady, Rodel, Sidra, HCS-3, Kreisel, Girabase. Z tej grupy oprogramowania w Ameryce najczęściej stosowane są trzy programy, które są przedmiotem niniejszego opracowania. W artykule przedstawiono zastosowanie oraz porównanie programów Arcady, Rodel i Sidra. Pozostałe programy omówione zostały w pracy [3].

## THE APPLICATIONS CALCULATED ROUNDABOUTS CAPACITY ON THE WORLD

**Summary.** There are lot of programs: Arcady, Rodel, Sidra, HCS-3, Kreisel, Girabase calculated roundabouts capacity on the world. Programs Arcady, Rodel and Sidra has been presented and compared in the article. There are most popular applications used in America for calculated roundabouts capacity and other parameters. Other programs like: HCS-3, Kreisel, Girabase etc., has been presented in article [3].

### 1. WPROWADZENIE

Oprócz wymienionych programów służących do obliczania przepustowości są też programy służące do symulacji ruchu na rondach. Do najbardziej popularnych programów służących do symulacji ruchu na rondach można zaliczyć: Corsim, Integration, Simtraffic, Paramics, VisSim.

W Ameryce programy dla potrzeb ruchu drogowego są tworzone między innymi przez: U. S. Department of Transportation, Departments of Highway and Transportation, The Federal Highway Administration (FHWA), Federal Transit Administration (FTA), a także przez liczne uczelnie na całym świecie jak i przez prywatne organizacje.

Rozwój zastosowań symulacji do badania procesów ruchu w czasie i w przestrzeni zapoczątkowany został w latach pięćdziesiątych XX wieku przez Gerlough'a, Webstera, Von Neumana, Glicksteina oraz Wohla oraz związany był z rozwojem technik komputerowych i teorii potoków ruchu [2]. Symulacja procesów ruchu jest najbardziej naturalnym zastosowaniem metody Monte Carlo, której pierwszą systematyczną teorię opracował polski matematyk Ulam wraz z Von Neumanem w 1949 roku. W symulacji stosuje się modele

mikroskopowe, w których stan określa się na podstawie charakterystyk poszczególnych kierowców pojazdów i ich interakcji oraz modele makroskopowe, w których stan systemu określa się na podstawie potoków ruchu. Modele makroskopowe stosuje się zazwyczaj do symulacji ruchu w sieciach drogowych, podczas gdy do modelowania skrzyżowań i dróg dwupasowych stosuje się na ogół modele mikroskopowe [2].

## 2. PROGRAM ARCADY

Spośród istniejących zagranicznych aplikacji komputerowych służących do oceny i analizy rond można przede wszystkim wymienić program Arcady (Assesment of Roundabout Capacity and Delay). Jest to metoda brytyjska; pierwsza wersja pochodzi z 1981 r. Stosowana jest w Anglii jako podstawowe narzędzie do oceny przepustowości i funkcjonowania rond. Program był rozwijany przez MVA Systematica na zlecenie Transport Road Research Laboratory (TRRL). W 1985 r. powstała druga, poprawiona, wersja, nazwana Arcady 2. Obliczanie przepustowości bazuje na formule Kimbera. Spośród cech i zastosowań Arcady 2 można wymienić [5, str. 85 – 86]:

- uwzględnianie struktury kierunkowej ruchu,
- uwzględnianie struktury rodzajowej ruchu,
- zdolność modelowania wpływu natężenia ruchu pieszych na skrzyżowaniu,
- obliczanie opóźnienia pojazdów wynikającego z geometrii ronda, tzw. opóźnienie geometryczne,
- obliczanie liczby oraz częstotliwości zdarzeń drogowych na rondzie,
- zdolność uwzględniania w obliczeniach przepustowości lokalnych warunków ruchu.

Dane wejściowe programu obejmują [4]:

- szerokości wlotów,
- szerokości dróg dojazdowych do ronda (wlotów i wylotów),
- średnicę ronda,
- promienie skrętu na wjazdach na rondo,
- widoczności na wlotach przy wjeździe.

Dane wyjściowe dla każdego interwału czasu zawierają informacje o [4]:

- natężeniu ruchu pojazdów i pieszych,
- przepustowości ronda,
- wskaźniku obciążenia (czyli stosunku natężenia ruchu do przepustowości,  $\frac{Q}{C}$ [-]),
- długości kolejek na wlotach na początku i na końcu interwału obliczeniowego,
- opóźnieniu wynikającym z oczekiwania w kolejce,
- opóźnieniu wynikającym z geometrii ronda.

W 1990 r. wydano nową wersję programu - Arcady 3. Metoda szacowania codziennego rozkładu długości kolejek została opracowana przez Kimberę, Daly'ego, Bartona i Giokasa na podstawie licznie przeprowadzonych badań na modelu symulacyjnym. Stwierdzono, że różne czasy przybyć pojazdów na wloty oraz różne czasy obsługi pojazdów na rondzie w efekcie dają różne długości kolejek na wlotach każdego dnia, pomimo że średni wskaźnik przybyć i przepustowość ronda są wielkościami stałymi. Różnica w długościach kolejek szczególnie widoczna jest podczas godzin szczytu. Zaobserwowano, że długości kolejek w poszczególnych dniach przybierają wartości od zera do podwojonej wartości średniej [5].

W licznych programach użytkowych wymagana jest znajomość rozkładu długości kolejek. Arcady 3 posiada zdolność określania zmiennej długości kolejek, średniej długości kolejek oraz prawdopodobieństwa tego, że długość kolejki osiągnie maksimum.

Biorąc pod uwagę cechy potoku ruchu w godzinie szczytu oraz przepustowość widoczne są dwie charakterystyczne własności codziennego rozkładu długości kolejek, a mianowicie rozkład i jego wariancja. Arcady 3 posiada zdolność określania zmian przepustowości i ewentualnych zdarzeń drogowych po wprowadzeniu drobnych zmian w parametrach projektowych [5, str. 85 - 86].

Amerykański naukowiec Burrow w 1986 r. wydał pracę na temat negatywnego wpływu ciemności na przepustowość skrzyżowań drogowych. Stwierdził, że przepustowość skrzyżowań w ciemności jest niższa o 5% w stosunku do przepustowości przy tych samych natężeniach ale w warunkach dobrego oświetlenia (w ciągu dnia). Program Arcady określa i uwzględnia panujące warunki oświetleniowe na rondzie, a także modeluje wymagane warunki oświetlenia rond dla celów obliczeń przepustowości. Podczas modelowania brak naturalnego oświetlenia na rondzie jest uzupełniany oświetleniem sztucznym.

Ostatnia, najnowsza wersja Arcady 4, która bazuje na środowisku Windows, co sprawia, że program jest przyjazny dla użytkownika.

### 3. PROGRAM RODEL

Rodel (Roundabout Delay) to program służący do oceny i projektowania rond. Program utworzony został przez Highway Department of Staffordshire County Council w Wielkiej Brytanii. Bazuje na modelu empirycznym Kimbera, który jest podobny do modelu użytego w programie Arcady. Podstawową różnicą pomiędzy tymi programami jest fakt, że poziom ufności danych wyjściowych w programie Arcady ma konkretnie sprecyzowaną wartość, natomiast w programie Rodel poziom ufności jest określany przez sam program. Rodel posiada dwa główne tryby działania: tryb I oraz tryb II [5, str. 86 - 87].

W trybie I użytkownik podaje średnie opóźnienie, maksymalne opóźnienie, maksymalną długość kolejki, maksymalną wartość wskaźnika RFC (RFC to stosunek natężenia do przepustowości). Na podstawie wprowadzonych danych Rodel generuje kilka zestawów geometrii dla każdego wlotu oddzielnie. W zależności od stopnia szczegółowości oraz ograniczeń wygenerowana geometria ronda może zostać wykorzystana na potrzeby projektowe. Tryb II to ocena sprecyzowanych wartości geometrycznych oraz wartości charakteryzujących ruch.

### 4. PROGRAM SIDRA

Sidra (Signalized Intersection Design and Research Aid) to metoda australijska, utworzona przez ARRB Transport Research (The Australian Road Research Board). Służy do analizy, obliczania przepustowości, oceny funkcjonowania skrzyżowań oraz określania wielu innych parametrów ruchowych na skrzyżowaniach odosobnionych, zarówno bez sygnalizacji jak i z sygnalizacją świetlną oraz na skrzyżowaniach typu rondo o maksymalnie ośmiu wlotach [4, str. 9]. Początkowe wymagania stawiane przez ARRB przed programem Sidra to jedynie użycie mocy komputerów do badań i analiz ruchu. Dlatego ciągle powstają nowe wersje programu. Poniżej opisano tylko te cechy programu Sidra, które dotyczą zastosowania w przypadku rond.

Podstawą metody użytej do analizy przepustowości i funkcjonowania rond w Sidra 4.07 oraz w wytycznych projektowania „Austroad” z 1993 r. jest specjalne opracowanie ARRB.

Ostatnia wersja Sidra 5.0 jest nieznacznie poprawiona w stosunku do wersji Sidra 4.1. Zasada sprzężenia zwrotnego potoku ruchu na wlotach z potokiem na jezdni ronda została wprowadzona od wersji Sidra 4.1.

Sidra jest jednym z trzech programów stosowanych aktualnie w Ameryce do obliczania przepustowości. Pozostałe dwa to brytyjskie programy Arcady i Rodel. Sidra uwzględnia losowe przybycia pojazdów jak i przybycia plutonów pojazdów generowanych przez skoordynowane sygnalizacje świetlne [1]. Uwzględnia wpływ sąsiedztwa ronda obok skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. W programie Sidra akceptowany odstęp uzależniony jest między innymi od geometrii ronda, ruchu pojazdów wokół wyspy centralnej, ruchu pojazdów na wlotach w następujący sposób [5, str. 88 – 89]:

- przepustowość potoku wjeżdżającego na jezdnię ronda zmniejsza się wraz ze:
  - wzrostem średnicy ronda,
  - spadkiem liczby pasów ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej ronda,
  - wzrostem natężenia ruchu na jezdni ronda,
  - wzrostem liczby pasów ruchu na wlotach;
- luka krytyczna przyjmuje wartości z zakresu 1.1. [s] do 2.1 [s] oraz spada wraz ze wzrostem:
  - natężenia potoku ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej ronda,
  - liczby pasów ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej ronda,
  - średniej szerokości pasa ruchu na wlocie;
- dla rond o wlotach wielopasowych pas ruchu na wlocie o największym natężeniu ruchu nazywany jest „dominujący”, natomiast pozostałe pasy nazywane są „subdominujące”;
  - minimalna liczba odjazdów pojazdów z pasa subdominującego jest większa niż minimalna liczba odjazdów z pasa dominującego,
  - współczynnik minimalnej liczby odjazdów z pasa subdominującego wzrasta wraz ze wzrostem współczynnika minimalnej liczby odjazdów z pasa dominującego. Średnia wartość współczynnika wynosi 1.2,

Przepustowości pasów ruchu na wlotach zależą od natężenia ruchu na tych pasach. Do obliczeń przepustowości oraz wielkości potoku ruchu na pasach używana jest metoda iteracyjna.

Główne cechy programu Sidra do analizy rond [5]:

- kolejki na wlotach ronda mają wpływ na przepustowość, rondo nie jest analizowane jako ciąg skrzyżowań typu „T” tylko na zasadzie macierzy źródło - cel,
- metoda iteracji jest używana do określenia:
  - natężenia ruchu na jezdni ronda wokół wyspy centralnej przy danym wlocie, natężenia ruchu opuszczającego rondo w stosunku do potoku ruchu wjeżdżającego na jezdnię ronda z tego wlotu,
  - dla każdego potoku ruchu na jezdni ronda wokół wyspy centralnej oraz potoku ruchu opuszczającego rondo udziału ruchu pojazdów ciężkich, stosunku liczby pojazdów w kolejce do ogólnej liczby pojazdów dla pasa dominującego oraz stosunku pojazdów na wlotach zarówno jednopasowych, jak i wielopasowych,
- przepełnione wloty stanowią podstawę do obliczeń podstawowych charakterystyk potoku ruchu na jezdni ronda jak i potoku opuszczającego jezdnię ronda;
- parametry luki krytycznej są przystosowane dla ruchu ciężkiego wjeżdżającego na rondo jak i dla ruchu na jezdni ronda;
- do wartości parametrów luki krytycznej są stosowane różne ograniczenia;
- dla różnych kierunków (w prawo, na wprost, w lewo) na tym samym wlocie mogą być określane różne wartości luki krytycznej;
- stopień „skupienia” pojazdów zależy od skuteczności użycia pasów ruchu oraz potoku ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej biorąc pod uwagę potoki ruchu na wlotach;
- wartość potoku ruchu na pasie wjazdowym jest funkcją przepustowości pasa wjazdowego (do obliczeń wykorzystywana jest metoda iteracyjna);

- dozwolone jest nierównomierne wykorzystanie pasów ruchu na wlotach dojazdowych;
- stosowane jest szczegółowe modelowanie funkcjonowania oraz obliczanie przepustowości każdego pasa ruchu oddzielnie (włączając oszacowanie zużycia paliwa, kosztów operacyjnych oraz emisji zanieczyszczeń);
- w aplikacji tej w przypadkach nasycenia ruchem stosowane są wzory działań zależnych od czasu;
- metoda określania opóźnień geometrycznych jest taka sama dla wszystkich typów skrzyżowań.

Metoda opóźnień geometrycznych użyta w Sidrze różni się od metody użytej w wytycznych "Austroad" sposobem określania opóźnień geometrycznych pojazdów stojących w kolejce oraz pojazdów, które nie stoją w kolejce [5]:

- dokonywane są obliczenia opóźnień, np.: całkowite opóźnienie, średnie opóźnienie, opóźnienie powstałe z zatrzymania, beczynny czas systemu (czyli brak zgłoszeń pojazdów na wlotach), opóźnienie geometryczne;
- dokonywane są obliczenia liczby pojazdów w kolejce, długości kolejek, średniej długości kolejek (średnie wartości 90%, 95%, 98%), wskaźnika przesuwania się kolejki, wskaźnika efektywnych zatrzymań, proporcji liczby pojazdów jadących w kolejce do liczby pojazdów poruszających się w ruchu swobodnym.

Pozostałe cechy programu Sidra [5]:

- zgodność metod użytych do obliczania przepustowości, analiz działania rond i skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej oraz z sygnalizacją świetlną jest osiągnięta przez użycie zintegrowanej struktury modelowania,
- ocena poziomu swobody ruchu,
- minimalizacja zatrzymań i opóźnień,
- określanie stopnia obciążenia, czyli stosunku natężenia do przepustowości,
- uwzględnienie ewentualnych blokad pasów ruchu,
- uwzględnienie pasów, z których może korzystać kilka relacji,
- określanie wielkości potoku ruchu na danym pasie,
- możliwość oceny przepustowości krótkich pasów ruchu, wjazdów oraz zjazdów,
- modelowanie nierównomiernego obciążenia ruchem i wykorzystania pasów ruchu,
- zmienność potoku ruchu używana jest do opracowywania prognoz ruchowych,
- określanie prędkości pojazdów,
- Sidra zawiera liczne, gotowe do zastosowania zestawy geometrii skrzyżowań,
- dokonuje obliczeń w pojedynczych okresach (interwałach) czasu.

W programie Sidra dane wejściowe stanowią: natężenia ruchu na wlotach, liczba pasów ruchu na wlotach, liczba pasów ruchu na jezdni ronda wokół wyspy centralnej, średnica wyspy środkowej ronda, szerokość jezdni wokół wyspy centralnej.

W programie standardowo ustawiona jest wartość przepustowości praktycznej ronda i wynosi ona 85% (współczynnik natężenia ruchu do przepustowości). Przepustowość potoku dojeżdżającego do ronda oraz charakterystyki operacyjne są mniej możliwe do oszacowania, zatem "Austroad" i "Sidra" zalecają maksymalizację wartości wskaźnika natężenia ruchu do przepustowości do 0,85. Według Austroad opóźnienia na rondach składają się z opóźnień wynikających z oczekiwania w kolejce oraz opóźnień geometrycznych. Sidra zawiera opcję uwzględniania bądź nieuwzględniania opóźnienia geometrycznego w obliczeniach.

W 1998 r. badania amerykańskiego naukowca Aimee Flannery w Stanach Zjednoczonych na programie Sidra dowiodły, że dla niskich natężeń ruchu na rondzie obliczone programem Sidra straty czasu ponoszone przez kierowców są zgodne z danymi rzeczywistymi, natomiast dla wysokich wartości natężeń program Sidra oblicza za niskie wartości strat czasu, niż jest to w rzeczywistości [5].

## 5. PORÓWNANIE PROGRAMÓW ARCADY, RODEL I SIDRA

Programy Rodel i Arcady dokonują obliczeń przepustowości według formuły Kimbera. Sidra jest modelem analitycznym o strukturze deterministycznej, więc nie rozpoznaje zasad stochastycznych.

Kenneth G. Courage z Florydy w 1996 r. porównywał trzy modele: Arcady, Rodel i Sidra. Na podstawie tego porównania stwierdził, że [5, str. 90 – 91]:

- największe wartości opóźnień otrzymywane są z programu Rodel przy poziomie ufności 85%,
- przy niskich wartościach natężenia ruchu Sidra oblicza niższe wartości opóźnień niż Rodel niezależnie od poziomu ufności,
- przy natężeniach bliskich przepustowości opóźnienia w programie Sidra wzrastają szybciej, a ostatecznie utrzymują się w połowie pomiędzy 50% a 85% poziomem ufności dla programu Rodel,
- Sidra rozpoznaje tylko dwa parametry geometryczne, średnicę wyspy centralnej oraz szerokość jezdni wokół wyspy centralnej. Wpisanie tych wartości powoduje automatyczne dobranie średnicy zewnętrznej ronda. Dla małych wartości średnic zewnętrznych Sidra oblicza niższe wartości przepustowości niż Rodel (przy poziomie ufności 85%) oraz wyższe wartości przepustowości niż Rodel dla dużych średnic zewnętrznych. Program Rodel wyznacza dodatkowo trzy parametry geometryczne wlotu: szerokość, kąt oraz promień skrętu. W niektórych przypadkach te trzy parametry mają znaczny wpływ na wynik prowadzonych obliczeń w programie Rodel.

### Bibliografia

1. Akcelik R., Besley M.: SIDRA 5, User Guide, 1998.
2. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKŁ, Warszawa 1999.
3. Macioszek E.: Przegląd oprogramowania dla rond stosowanego na świecie i w Polsce (w druku).
4. Sabra Z., Wallace Ch., Lin F.: Traffic Analysis software tools. Transportation Research Board/National Research Council. Circular number E - CO14, september 2000.
5. Taekratok T.: Modern Roundabouts for Oregon. Oregon Department of Transportation. Research Unit, 200 Hawthorne SE, Suite B-240 Salem, OR 97310, June 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Romuald Szopa

*Praca wykonana w ramach BW-514/RT5/2008*