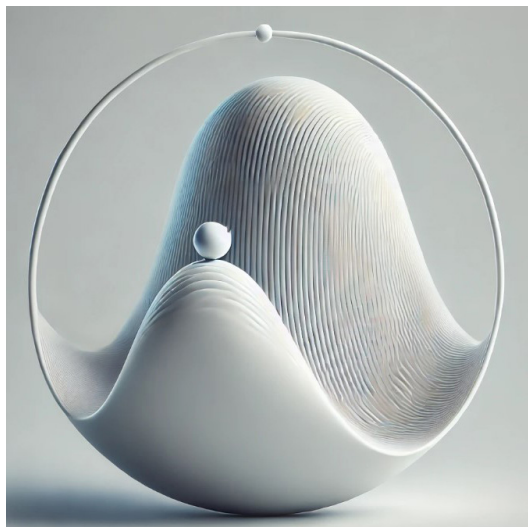
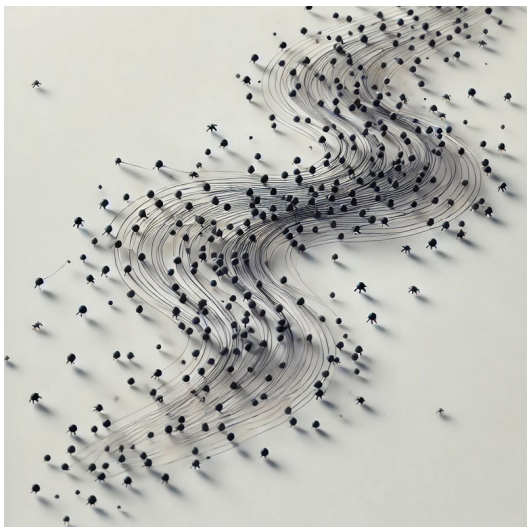


Oskar Skubisz



ALGORYTMY METAHEURYSTYCZNE

w optymalizacji tras transportu
produktów leczniczych

Difin

Oskar Skubisz

ALGORYTMY METAHEURYSTYCZNE

w optymalizacji tras transportu
produktów leczniczych

Difin

Spis treści

Wstęp	7
Rozdział 1	
Problem planowania tras transportowych w sieciach dystrybucji	13
Wprowadzenie do problematyki planowania tras	13
Problem marszrutyzacji	31
Rozdział 2	
Algorytmy metaheurystyczne i ich zastosowanie w logistyce	47
Przegląd algorytmów metaheurystycznych	47
Algorytm optymalizacji rojem cząstek	62
Algorytm optymalizacji kolonii mrówek	67
Algorytm sztucznej kolonii pszczół	73
Algorytm światlika	79
Algorytm nietoperzy	84
Algorytm kukułki	89
Algorytm żerowania bakteryjnego	94
Algorytm wyszukiwania wron	100
Algorytm stada słoni	105
Algorytm motyla monarchy	110
Rozdział 3	
Uwarunkowania planowania tras transportowych w sieci dystrybucji produktów leczniczych	119
Uwarunkowania dystrybucji produktów leczniczych w Polsce	119
Wybrane aspekty zarządzania ryzykiem w sektorze farmaceutycznym	134
Problem marszrutyzacji w branży farmaceutycznej	138
Informatyzacja procesów logistycznych w dystrybucji farmaceutyków	142

6 Spis treści

Uwarunkowania operacyjne w planowaniu tras w sektorze transportu drogowego produktów leczniczych	148
Sformułowanie problemu decyzyjnego w transporcie produktów leczniczych . . .	153
Rozdział 4	
Analiza zastosowania wybranego algorytmu metaheurystycznego w rozwiązaniu problemu planowania tras transportowych w sieci dystrybucji produktów leczniczych	157
Implementacja wybranego algorytmu	157
Modelowanie, symulacje i analiza wyników	171
Symulacja 1. Sektor 1. Liczba iteracji 1000	171
Symulacja 2. Sektor 2. Liczba iteracji 1000	179
Symulacja 3. Sektor 3. Liczba iteracji 1000/5000	186
Symulacja 4. Sektor 4. Liczba iteracji 1000	195
Symulacja 5. Sektor 5. Liczba iteracji 2000	199
Porównanie wyników z innymi metodami	206
Rozdział 5	
Koncepcja wsparcia planowania tras transportowych w sieci dystrybucji produktów leczniczych	209
Propozycja modelu usprawnień	209
Rekomendacje praktyczne	220
Możliwości zastosowania wyników badań	221
Zakończenie	225
Bibliografia	227
Spis tabel	242
Załącznik	246

Wstęp

Transport drogowy produktów leczniczych stanowi krytyczny element funkcjonowania sektora farmaceutycznego, wpływa bowiem bezpośrednio na bezpieczeństwo, jakość oraz dostępność produktów leczniczych dla pacjentów. Jego znaczenie wynika z konieczności zapewnienia nieprzerwanych dostaw leków niezbędnych dla ochrony zdrowia publicznego. Niezawodność systemów transportu leków jest konieczna do spełnienia rygorystycznych standardów branżowych, co skłania podmioty trudniące się dystrybucją leków do ciągłego doskonalenia procesów logistycznych. Wyzwania związane z transportem farmaceutyków, takie jak konieczność zapewnienia stabilnych warunków przewozu, a także dążenie do redukcji kosztów i czasu dostaw, wymagają wdrażania zaawansowanych technologii oraz metod wspierających procesy podejmowania decyzji. Ze względu na swoją specyfikę transport leków jest związany z licznymi ograniczeniami wynikającymi z wymogów bezpieczeństwa, regulacji prawnych oraz konieczności zachowania odpowiednich warunków przewozu. Dodatkowo rosnąca złożoność sieci transportowych i potrzeba dynamicznego dostosowywania tras do zmiennych warunków operacyjnych sprawiają, że tradycyjne metody planowania okazują się niewystarczające.

W związku z powyższym coraz większą rolę odgrywają stale rozwijane metody optymalizacyjne. Metody te charakteryzują się dużą zdolnością adaptacyjną oraz możliwością skutecznego przetwarzania dużych zbiorów danych. Dotychczasowe badania nad ich zastosowaniem w planowaniu transportu wykazały, że mogą one przynosić korzyści w zakresie redukcji czasu i dystansu dostaw, ograniczania kosztów operacyjnych oraz poprawy organizacji wybranych aspektów procesów transportowych. Jednak w kontekście transportu farmaceutycznego wykorzystanie tych metod pozostaje obszarem wymagającym dalszej eksploracji. Problematyka ta wynika z konieczności uwzględnienia specyficznych wymagań tej branży, związanych m.in. z potrzebą zapewnienia synchronizacji dostaw z warunkami

przechowywania leków czy reorganizacji tras wynikającej ze zmieniających się uwarunkowań operacyjnych.

Charakterystyka problemu planowania tras dostaw farmaceutyków w transporcie drogowym oraz brak jednoznacznych wytycznych dotyczących zastosowania algorytmów metaheurystycznych w tym obszarze wskazują na lukę badawczą, którą należy wypełnić. Istnieje potrzeba przeprowadzenia analizy różnych podejść optymalizacyjnych w celu identyfikacji tych metod, które najlepiej odpowiadają specyfice drogowego transportu farmaceutycznego. Niniejsza monografia koncentruje się na analizie możliwości zastosowania algorytmów wzorowanych na procesach zachodzących w naturze, zaliczanych do grupy algorytmów metaheurystycznych, w planowaniu tras transportowych produktów leczniczych. Szczególną uwagę poświęcono poprawie jakości decyzji transportowych oraz dostosowaniu modeli optymalizacyjnych do rzeczywistych warunków funkcjonowania branży transportu farmaceutyków.

Mimo szerokiego zainteresowania problemem planowania tras transportowych badania dotyczące zastosowania metod metaheurystycznych w transporcie produktów leczniczych pozostają ograniczone. W literaturze przedmiotu dominują klasyczne podejścia do problemu VRP i jego wariantów, a niewiele prac koncentruje się na specyficznych wyzwaniach transportu leków, takich jak konieczność ścisłej kontroli temperatury, organizacja dostaw w określonych przedziałach czasowych oraz rygorystyczne regulacje prawne nakładające dodatkowe obowiązki związane z procesem transportu. Dotychczasowe analizy wykorzystania algorytmów metaheurystycznych w planowaniu transportu dotyczą głównie standardowych problemów optymalizacyjnych lub ich modyfikacji, nie uwzględniają natomiast specyficznych ograniczeń związanych z transportem farmaceutyków. Brak jest wystarczających badań nad modyfikacjami tych algorytmów ukierunkowanymi na integrację priorytetów dostaw z ograniczeniami wynikającymi z okien czasowych, co stanowi istotną barierę dla ich praktycznego zastosowania w planowaniu tras transportu drogowego produktów leczniczych.

W kontekście zidentyfikowanej luki badawczej pojawia się pytanie o możliwość dostosowania wybranych algorytmów metaheurystycznych do specyficznych wymagań transportu farmaceutyków z uwzględnieniem kryteriów optymalizacyjnych właściwych dla tej branży. Kluczowe jest określenie, które spośród dostępnych algorytmów mogą znaleźć zastosowanie w planowaniu tras przewozowych produktów leczniczych oraz jakie modyfikacje są niezbędne do uwzględnienia ograniczeń operacyjnych wynikających z organizacji tego rodzaju transportu. Udzielenie odpowiedzi na te pytania wymaga m.in. analizy struktury

algorytmów, ich dotychczasowych zastosowań oraz zdolności do rozwiązywania problemów związanych z planowaniem tras w transporcie leków, uwzględniających zarówno ograniczenia regulacyjne, jak i operacyjne. Istotnym zagadnieniem jest również identyfikacja koniecznych modyfikacji tych algorytmów, zwłaszcza poprzez uwzględnienie nowych parametrów krytycznych dla transportu farmaceutycznego, takich jak priorytety dostaw czy możliwość ponownego wykorzystania zasobów. Analiza powinna obejmować możliwości stworzenia symulacji obliczeniowych, w których zmodyfikowany algorytm metaheurystyczny będzie odwzorowywał trasy dostaw oraz warunki charakterystyczne dla transportu leków, co pozwoli na ocenę jego potencjalnej skuteczności w rzeczywistych warunkach operacyjnych.

Przedmiotem niniejszej monografii jest analiza możliwości zastosowania metod metaheurystycznych w planowaniu tras transportowych produktów leczniczych oraz dostosowanie wybranych metod do specyfiki tego rodzaju transportu. Badanie obejmuje identyfikację algorytmów odpowiednich dla tego obszaru, określenie oraz wdrożenie koniecznych modyfikacji wynikających z ograniczeń operacyjnych, a także ocenę skuteczności proponowanych rozwiązań na podstawie symulacji obliczeniowych odwzorowujących rzeczywiste warunki przewozu farmaceutyków

W sytuacji rosnących wymagań dotyczących organizacji transportu farmaceutyków oraz potrzeby doskonalenia procesów decyzyjnych w tym obszarze konieczne jest poszukiwanie metod umożliwiających precyzyjne i elastyczne planowanie tras przewozowych. Wykorzystanie algorytmów metaheurystycznych stanowi jedno z potencjalnych rozwiązań pozwalających na dostosowanie strategii transportowych do specyficznych uwarunkowań tej branży. W związku z tym przyjęto założenie, że istnieją wśród algorytmów metaheurystycznych takie, które mogą skutecznie wspomagać proces planowania tras przewozowych produktów leczniczych w transporcie drogowym, umożliwiając optymalizację tych tras z uwzględnieniem specyficznych ograniczeń operacyjnych. Aby zweryfikować tę tezę, konieczna była analiza potencjału algorytmów metaheurystycznych w zakresie rozwiązywania problemów marszrutyzacji (VRP). Badanie obejmuje zarówno identyfikację algorytmów o największym potencjale aplikacyjnym, jak i ocenę skuteczności wybranej metody po wprowadzeniu modyfikacji uwzględniających specyficzne ograniczenia. Wnioski płynące z przeprowadzonych analiz pozwoliły na ocenę możliwości wdrożenia tych metod w rzeczywistych warunkach funkcjonowania hurtowni farmaceutycznych związanych z planowaniem tras transportu drogowego leków.

W kontekście zdefiniowanego problemu badawczego, dotyczącego zastosowania metod metaheurystycznych do planowania i optymalizacji tras transportowych produktów leczniczych, zaplanowano wiele procedur badawczych uwzględniających analizę literatury, modelowanie problemu, implementację algorytmów oraz symulacje komputerowe. Metodyka badań została opracowana w taki sposób, aby umożliwić identyfikację algorytmów o największym potencjale aplikacyjnym pozwalającym na ich dostosowanie do specyficznych wymagań transportu farmaceutycznego oraz weryfikację ich skuteczności w warunkach symulacyjnych. Początkowy etap badań obejmował analizę literatury przedmiotu w celu zidentyfikowania obecnych trendów oraz ograniczeń w stosowaniu metaheurystycznych metod optymalizacyjnych. Szczególny nacisk położono na klasyczne i rozwojowe podejścia do problemu VRP, metod optymalizacji tras dostaw oraz dotychczasowych zastosowań algorytmów metaheurystycznych. Analiza uwzględniała również aspekty regulacyjne oraz wymagania operacyjne specyficzne dla transportu leków, co umożliwiło zdefiniowanie kryteriów, jakie powinny spełniać analizowane algorytmy.

Kolejnym etapem badawczym było modelowanie problemu optymalizacji tras dostaw farmaceutyków przy wykorzystaniu teorii grafów oraz metod heurystycznych i metaheurystycznych. Skupiono się w szczególności na przedstawieniu sieci transportowej jako grafu, gdzie węzły odpowiadają punktom dostaw, a krawędzie reprezentują potencjalne trasy transportowe. W celu opracowania realistycznego modelu przebiegu tras uwzględniono ograniczenia operacyjne, takie jak okna czasowe dostaw, priorytety przewozów oraz parametry wpływające na ponowne wykorzystanie zasobów transportowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury dokonano selekcji algorytmów metaheurystycznych wykorzystywanych w optymalizacji tras transportowych. Kryteria wyboru obejmowały skuteczność algorytmów w rozwiązywaniu problemów VRP, zdolność do adaptacji w warunkach dynamicznych oraz potencjalną możliwość implementacji w badanym kontekście.

Po dokonaniu wstępnej selekcji przeprowadzono analizę możliwości modyfikacji wybranych algorytmów. Oczekiwane możliwości wprowadzania zmian obejmowały m.in.: dostosowanie funkcji celu, wprowadzenie dodatkowych parametrów związanych z priorytetami dostaw oraz adaptację mechanizmów eksploatacji i eksploatacji w przestrzeni rozwiązań. Skuteczność wybranej metody została oceniona na podstawie symulacji komputerowych, które umożliwiły analizę otrzymanych rozwiązań w warunkach odzwierciedlających rzeczywiste scenariusze transportowe. W celu implementacji i testowania algorytmu opracowane zostało oprogramowanie wykorzystujące język programowania C# oraz środowisko

Visual Studio¹. W strukturze modelu symulacyjnego uwzględniono dane wejściowe odzwierciedlające rzeczywiste warunki realizacji tras transportowych pozyskane w ramach współpracy z przedsiębiorstwem funkcjonującym w sektorze dystrybucji farmaceutycznej. Ocena skuteczności algorytmu odbywała się na podstawie wielu wskaźników, takich jak długość tras, czas dostawy, liczba obsłużonych punktów w zadanym przedziale czasowym, liczba priorytetowych lokalizacji obsłużonych w zadanych oknach czasowych. Przede wszystkim analizowano wpływ wprowadzonych modyfikacji na zdolność metod algorytmicznych do adaptacji w warunkach operacyjnych. Ostatecznym etapem procesu badawczego była analiza porównawcza wyników przeprowadzonych symulacji oraz ocena potencjału wdrożeniowego proponowanych rozwiązań. Symulacje umożliwiły identyfikację mocnych i słabych stron analizowanych metod oraz określenie obszarów wymagających dalszych badań i udoskonaleń. Uzyskane wyniki dostarczyły podstaw do sformułowania wniosków dotyczących skuteczności metod metaheurystycznych w planowaniu tras transportowych farmaceutyków oraz potencjalnych kierunków dalszych badań nad ich zastosowaniem w logistyce farmaceutycznej.

¹ Microsoft Corporation, C# Language Specification Version 5.0: chapter 2.4.4.1 Boolean literals. Available from: <http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=7029> [dostęp: 2.03.2025]; Microsoft Corporation <https://learn.microsoft.com/pl-pl/visualstudio/windows/?view=vs-2022> [dostęp: 2.03.2025]; Microsoft Corporation, <https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/visualstudio/visual-studio-2017/xml-tools/xml-document-properties-properties-window?view=vs-2017> [dostęp: 2.03.2025].