



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI
I INFORMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Paulina Brzecka
Nr albumu: 184701
Poziom kształcenia: studia drugiego stopnia
Forma studiów: stacjonarne
Kierunek studiów: Informatyka
Specjalność: Algorytmy i technologie internetowe

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Analiza algorytmów dla dominowania rzymskiego słabo spójnego

Tytuł pracy w języku angielskim: Analysis of algorithms for weakly connected Roman domination

Opiekun pracy: dr inż. Joanna Raczek

STRESZCZENIE

Streszczenie pracy opisuje problem naukowy polegający na opracowaniu i wdrożeniu metody analizy danych w środowisku wielowymiarowym. Celem pracy jest zaproponowanie algorytmu optymalizacyjnego, który pozwala na efektywne przetwarzanie dużych zbiorów danych. Zakres pracy obejmuje analizę istniejących metod, implementację nowego rozwiązania oraz ocenę jego skuteczności na wybranych przypadkach testowych. Zastosowana metoda badawcza obejmowała modelowanie matematyczne, programowanie w języku Python oraz wizualizację wyników. Wyniki wskazują na istotne przyspieszenie obliczeń przy zachowaniu wysokiej dokładności. Najważniejszym wnioskiem jest możliwość zastosowania zaproponowanego algorytmu w rzeczywistych aplikacjach analitycznych.

Słowa kluczowe: algorytmy, przetwarzanie danych, optymalizacja.

ABSTRACT

The abstract describes a scientific problem focusing on the development and implementation of a data analysis method in a multidimensional environment. The objective of this thesis is to propose an optimization algorithm that enables efficient processing of large datasets. The scope of the work includes an analysis of existing methods, the implementation of a new solution, and the evaluation of its effectiveness on selected test cases. The research methodology involved mathematical modeling, Python programming, and visualization of results. The results indicate significant acceleration in computations while maintaining high accuracy. The key conclusion is the feasibility of applying the proposed algorithm in real-world analytical applications.

Keywords: algorithms, data processing, optimization.

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	6
1 Wstęp i cel pracy	7
1.1 Cel pracy	7
1.2 Zakres pracy	7
2 Wprowadzenie teoretyczne	8
2.1 Geneza historyczna	8
2.2 Definicja problemu	8
2.3 Złożoność obliczeniowa	9
2.4 Przegląd literatury	11
2.5 Metody badań	12
3 Badane algorytmy	15
3.1 Wprowadzenie	15
3.2 Algorytm Brute Force	15
3.2.1 Działanie	15
3.2.2 Złożoność i wydajność	15
3.2.3 Pseudokod	16
3.3 Algorytm liniowy dla drzew	16
3.3.1 Działanie	16
3.3.2 Złożoność i wydajność	20
3.3.3 Pseudokod	20
3.4 Algorytm programowania liniowego I	22
3.4.1 Działanie	22
3.4.2 Złożoność i wydajność	23
3.4.3 Pseudokod	23
3.5 Algorytm programowania liniowego II	25
3.5.1 Działanie	25
3.5.2 Złożoność i wydajność	26
3.5.3 Pseudokod	26
3.6 Algorytm mrówkowy	28
3.6.1 Działanie	28
3.6.2 Złożoność i wydajność	29
3.6.3 Pseudokod	29
3.7 Algorytm aproksymacyjny	32

3.7.1	Działanie	32
3.7.2	Złożoność i wydajność	33
3.7.3	Pseudokod	33
3.8	Algorytm zachłanny	34
3.8.1	Działanie	34
3.8.2	Złożoność i wydajność	34
3.8.3	Pseudokod	34
4	Wyniki	36
4.1	Wprowadzenie	36
4.2	Hiperparametry algorytmu mrówkowego	36
4.3	Wyniki działania algorytmów	37
4.3.1	Grafy rzadkie	37
4.3.2	Grafy gęste	40
4.3.3	Drzewa	43
4.3.4	Grafy bezskalowe	46
4.4	Wyniki algorytmów przybliżonych	47
4.4.1	Algorytm mrówkowy	47
4.4.2	Algorytm zachłanny	49
4.4.3	Algorytm aproksymacyjny	49
4.4.4	Porównanie algorytmów przybliżonych	50
5	Zastosowania praktyczne	51
5.1	Wprowadzenie	51
5.2	Rozmieszczenie zabezpieczeń sieci energetycznych	51
5.3	Rozmieszczenie agentów wykrywających oszustwa w internetowej sieci społecznościowej	52
6	Podsumowanie i wnioski	54
6.1	Podsumowanie wyników	54
6.2	Wnioski i dalsze kierunki badań	54
Spis rysункów		56
Spis tabel		57

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- $WCRDP$ – Weakly Connected Roman Domination Problem - problem dominowania rzymskiego słabo spójnego.
- $WCRDS$ – Weakly Connected Roman Domination Set - zbiór dominujący rzymski słabo spójny.
- $WCRDF$ – Weakly Connected Roman Domination Function - funkcja dominowania rzymskiego słabo spójnego.
- $\gamma_R^{wc}(G)$ – Weakly Connected Roman Domination Number - liczba dominowania rzymskiego słabo spójnego.

ROZDZIAŁ 1. WSTĘP I CEL PRACY

Tematem pracy jest analiza algorytmów znajdujących funkcję dominującą rzymską słabo spójną w grafach. Problem znajdywania liczby dominowania rzymskiego słabo spójnego jest problemem NP-trudnym. Nie są znane zatem dokładne algorytmy rozwiązuające i weryfikujące problem w czasie wielomianowym. Wersja decyzyjna tego problemu jest NP-zupełna. Dodatkową motywacją jest widoczny potencjał zastosowania algorytmu w rozwiązywaniu praktycznych problemów. Dlatego niniejsza praca dokonuje analizy istniejących w literaturze i proponowanych algorytmów znajdowania minimalnej liczby dominowania rzymskiego słabo spójnego, jak i wyłącznie znajdujących funkcję dominowania rzymskiego słabo spójnego, w celu znalezienia możliwie skutecznych rozwiązań oraz zastosowań.

1.1 Cel pracy

Celem badawczym pracy jest opisanie istniejących i opracowanie własnych algorytmów znajdujących funkcje dominujące rzymskie słabo spójne, ich analiza oraz porównanie skuteczności i wyciągnięcie wniosków na temat możliwości ich praktycznego zastosowania, w szczególności w wersji minimalizacyjnej tego problemu.

1.2 Zakres pracy

W ramach pracy dokonano systematycznego przeglądu literatury. W literaturze szeroko zdefiniowano ten problem oraz jego złożoność obliczeniową. Zaproponowano również kilka algorytmów rozwiązujących ten problem - znajdujących minimalną liczbę dominowania rzymskiego słabo spójnego - wykorzystujących m.in. programowanie liniowe - jak i znajdujących funkcję dominowania rzymskiego słabo spójnego (niekoniecznie minimalną). Na podstawie znalezionej literatury zaimplementowane zostały dwa algorytmy programowania liniowego oraz $2(1 + \epsilon)(1 + \ln(\Delta - 1))$ -aproksymacyjny. W ramach własnej pracy, zaimplementowano algorytm brute force, zachłanny, liniowy dla drzew oraz mrówkowy. Niniejsza praca przedstawia problem dominowania rzymskiego słabo spójnego oraz jego złożoność obliczeniową. Opisuje wymienione algorytmy, porównuje je pod kątem wydajności, poprawności oraz czasu działania. Testy przeprowadzono na różnych klasach grafów: gęstych, rzadkich, drzewach oraz bezskalowych. Następnie dokonano analizy potencjalnych praktycznych zastosowań, w których algorytmiczne rozwiązanie tego problemu byłoby przydatne. Na koniec dokonano podsumowania wszystkich wyników dotyczących przeprowadzonych rozważań.

ROZDZIAŁ 2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

2.1 Geneza historyczna

Problem swoją nazwę zawdzięcza imperium rzymskiemu. Po raz pierwszy został opisany w artykule „Defend Roman Empire!”.[1] Obrazuje on problem następująco: Każdy wierzchołek grafu reprezentuje pewną lokalizację (miasto, wzgórze) w Imperium Rzymskim. Lokalizacja (wierzchołek v) jest niechroniona, jeśli nie stacjonują w niej żadne legiony wojska ($f(v) = 0$) oraz chroniona jeśli ($f(v) \in 1, 2$). Wartości te oznaczają liczbę legionów stacjonujących w danej lokalizacji. Niechroniona lokalizacja może być ochroniona poprzez wysłanie legionu stacjonującego w lokalizacji sąsiadującej. W czwartym wieku cesarz Konstantyn Wielki wydał dekret zakazujący przemieszczenia się legionu do lokalizacji sąsiadującej, jeśli sprawi to, że aktualna lokalizacja pozostanie niechroniona. Dlatego, żeby móc wysłać legion do sąsiedniej lokacji, w aktualnej muszą stacjonować dwa legiony. Oczywiście, cesarzowi zależało na jak najmniejszych kosztach utrzymania legionów, a zatem, żeby było ich jak najmniej. [2] Problem możemy zatem zinterpretować grafowo, gdzie lokalizacje to wierzchołki grafu, liczba legionów to wartości na wierzchołkach. W celu zachowania ciągłości efektywnej komunikacji między legionami wymagana jest słabo spójność zbioru dominującego.

2.2 Definicja problemu

Jako, że problem nie jest powszechnie znany, należy go zdefiniować, wprowadzając następujące pojęcia [2]:

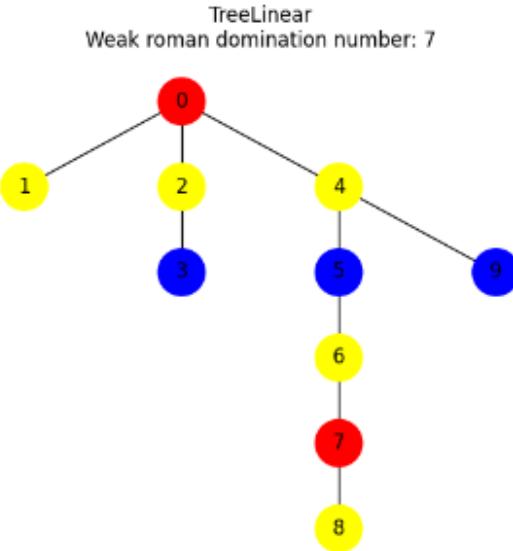
Definicja 1 Funkcja dominująca rzymska zdefiniowana jest dla grafu $G = (V, E)$, gdzie $f : V \rightarrow \{0, 1, 2\}$ spełnia warunek, że dla każdego wierzchołka u , dla którego $f(u) = 0$ jest sąsiadem przynajmniej jednego wierzchołka v , dla którego $f(v) = 2$.

Definicja 2 Dominujący zbiór $D \subseteq V$ jest zbiorem dominującym słabą spójnym grafu G jeśli graf $(V, E \cap (D \times V))$ jest spójny.

Definicja 3 Funkcja dominująca rzymska słabą spójną na grafie G będzie funkcją dominującą rzymską, taką, że zbiór $\{u \in V : f(u) \in \{1, 2\}\}$ jest jednocześnie zbiorem dominującym słabą spójnym.

Definicja 4 Wagę funkcji dominującej rzymskiej słabą spójnej definiujemy jako $f(V) = \sum_{u \in V} f(u)$. Minimalną wartość tej funkcji nazywamy liczbą dominowania rzymskiego słabą spójnego - $\gamma_R^{wc}(G)$.

Definicja 5 Jeśli graf G ma następującą własność: $\gamma_R^{wc}(G) = 2\gamma_{wc}(G)$, to nazywa się go grafem rzymskim słabą spójnym.



Rysunek 2.1: Przykład grafu rzymskiego słabo spójnego.

Od tego momentu zbiór dominujący rzymski słabo spójny będzie definiowany jako *WCRDS*, funkcja dominowania rzymskiego słabo spójnego to *WCRDF*. Problem dominowania rzymskiego słabo spójnego będzie oznaczany jako *WCRDP*.

2.3 Złożoność obliczeniowa

Poniższy szkic dowodu został przedstawiony w artykule: „Weakly connected Roman domination in graphs”[2]. Za pomocą redukcji alfa problem WCRDF zostanie sprowadzony do NP-zupełnego problemu dokładnego pokrycia 3 zbiorami (Exact Cover by 3-Sets, X3C)[3], czym zostanie udowodniona NP-zupełność wersji decyzyjnej WCRDF. Naturalnie, wersja minimalizacyjna - $\gamma_R^{wc}(G)$ jest wtedy NP-trudna.

Dane: Spójny graf G oraz dodatnia liczba całkowita k .

Pytanie: Czy istnieje słabo spójna funkcja dominacji rzymskiej w grafie G o wagie co najwyżej k ?

Problem WCRDF jest NP-zupełny, nawet dla grafów podziału (graf, w którym można wydzielić klikę oraz zbiór niezależny) oraz grafów dwudzielnych.

Szkic dowodu:

Problem WCRDF należy do klasy NP, ponieważ dla danego przyporządkowania $f : V(G) \rightarrow \{0, 1, 2\}$ można w czasie wielomianowym sprawdzić, czy f ma wagę co najwyżej k oraz czy spełnia warunki WCRDF.

Redukcja jest przeprowadzana z problemu dokładnego pokrycia 3-zbiorami (Exact Cover by 3-Sets, X3C). Dla danej instancji $X = \{x_1, \dots, x_{3q}\}$ i rodziny zbiorów $\mathcal{C} = \{C_1, \dots, C_m\}$, gdzie każdy $C_j \subseteq X$ oraz $|C_j| = 3$, konstruowany jest graf podziału G .

Dla każdego elementu $x_i \in X$ oraz zbioru $C_j \in \mathcal{C}$ tworzone są wierzchołki. Dodaje się krawędź między x_i a C_j wtedy i tylko wtedy, gdy $x_i \in C_j$. Dodatkowo wierzchołki odpowiadające

zbiorom C_j tworzą klikę K_m (poprzez połączenie tych wierzchołków krawędziami). Przyjęto: $k = 2q$.

Można wykazać, że \mathcal{C} zawiera dokładne pokrycie zbioru X wtedy i tylko wtedy, gdy graf G posiada słabo spójną funkcję dominacji rzymskiej o wadze co najwyżej k .

Przykładową konstrukcję można zdefiniować następująco:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$$

$$\mathcal{C} = \left\{ \begin{array}{l} C_1 = \{x_1, x_2, x_3\}, \\ C_2 = \{x_2, x_4, x_5\}, \\ C_3 = \{x_4, x_5, x_6\} \end{array} \right\}$$

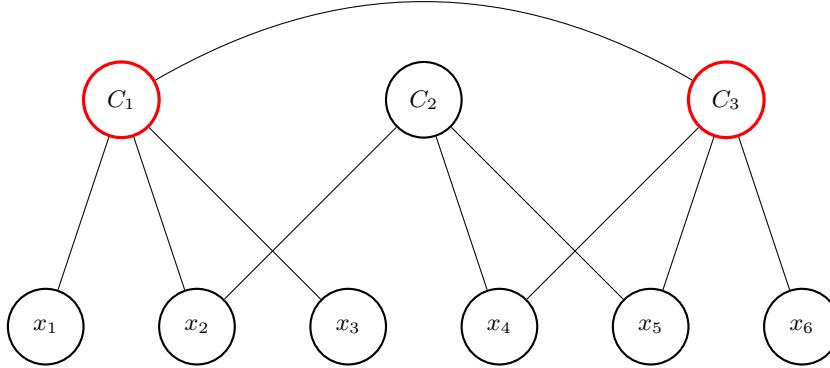
$$C_1 \cup C_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} = X$$

$$q = 2$$

$$k = 2q = 4$$

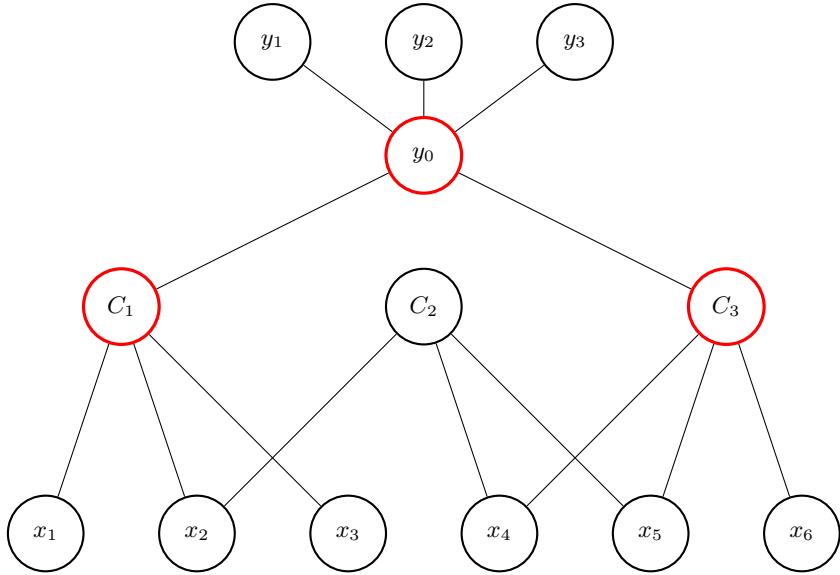
Zgodnie z konstrukcją, wierzchołki x zostaną połączone z wierzchołkami C , zgodnie z $x_i \in C_j$. W tym przypadku liczba zbiorów dokładnego pokrycia 3-zbiorami wynosi 2 i są to zbiory C_1 oraz C_2 . Je również należy połączyć krawędzią. Wierzchołki należące do WCRDS to C_1 oraz C_2 . Zgodnie z WCRDF, nadanie im wartości 2 spełnia jego definicję.

Poniżej umieszczono rysunek poglądowy (na czerwono wierzchołki należące do WCRDS):



Aby uzyskać wynik również dla grafów dwudzielnych, należy zmodyfikować konstrukcję: zamiast dodawać krawędzie między wierzchołkami C_j , dodajemy cztery nowe wierzchołki y_0, y_1, y_2, y_3 oraz krawędzie y_0y_1, y_0y_2, y_0y_3 i y_0C_j dla każdego j . Ustawiamy wtedy $k = 2q + 2$.

Konstrukcję dla przykładowego grafu dwudzielnego przedstawia poniższy rysunek. K będzie wynosiło 6.



2.4 Przegląd literatury

W 2004 roku zdefiniowano formalnie funkcję dominowania rzymskiego (RDF) [4] i od tego czasu w wielu publikacjach analizowano właściwości tego parametru oraz inne wersje dominowania rzymskiego, m.in. silna, mieszana, totalna dominacja rzymska.

Henning i Hedetniemi w 2003 roku udowodnili, że problem słabego dominowania rzymskiego jest NP-zupełny w wersji decyzyjnej, nawet dla grafów dwudzielnych. [5]

W artykule z 2019 roku wprowadzono pojęcie słabo spójnego dominowania rzymskiego. Zdefiniowano WCRDF oraz $\gamma_R^{wc}(G)$ oraz następujące właściwości:

- Dla każdego spójnego grafu G zachodzi:

$$\gamma_{wc}(G) \leq \gamma_R^{wc}(G) \leq 2\gamma_{wc}(G)$$

co oznacza, że liczba słabo spójnej dominacji rzymskiej jest ograniczona od dołu przez klasyczną liczbę słabo spójnej dominacji oraz od góry przez jej podwojenie.

- Dla spójnego grafu G , $\gamma_{wc}(G) = \gamma_R^{wc}(G)$ zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy $G = K_1$ (graf jednoelementowy).
- Dla dowolnego spójnego grafu G o n wierzchołkach:

$$\gamma_R^{wc}(G) \leq n$$

z równością wtedy i tylko wtedy, gdy $G \in \{K_1, K_2\}$.

- Jeżeli $\gamma_R^{wc}(G) < n$ oraz $f = (V_0, V_1, V_2)$ jest funkcją minimalną WCRDF, to zachodzi:

$$|V_0| > 0 \quad \text{oraz} \quad |V_2| > 0$$

czyli co najmniej jeden wierzchołek musi mieć wartość 0, a co najmniej jeden wartość 2.

Dodatkowo pokazano, że problem ten jest NP-zupełny, nawet dla grafów dwudzielnych [2].

W 2021 rozszerzono wiedzę z poprzedniej publikacji o charakteryzację słabo spójnych drzew rzymskich oraz pokazano, że sprawdzenie, czy graf dwudzielny jest rzymski słabo spójny jest co-NP-trudne [6].

W 2021 roku Chakradhar i współautorzy zaproponowali dwa nowe modele programowania liniowego całkowitoliczbowego oraz algorytm $2(1 + \epsilon)(1 + \ln(\Delta - 1))$ -aproksymacyjny. W ramach niniejszej pracy, analizowane będą te dwa modele programowania liniowego oraz aproksymacyjny [7].

Dodatkowo analizowane będą propozycje własne rozwiązania tego problemu. W 2023 roku ukazał się artykuł proponujący GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) - zachłanna losowa procedura adaptacyjnego przeszukiwania dla problemu znajdowania $\gamma_R^{wc}(G)$, poprzez zdefiniowanie funkcji zachłannych: Dscore (dominacja) i Nscore (sąsiedztwo), strategie tabu w celu uniknięcia zapetlenia oraz lokalnych przeszukiwań w celu optymalizacji rozwiązania. Jednakże, autorzy artykułu źle zrozumieli definicję WCRDS, dlatego jego wyniki nie zostały dalej analizowane [8]. Literatura proponuje również zastosowanie rozwiązania tego problemu w obecnych czasach. Mianowicie, kosztowne pojazdy służb ratunkowych powinny być rozmieszczane tak, aby były w stanie udzielić pomocy potrzebującym, przy możliwie dużej redukcji kosztów utrzymania takiego pojazdu. Dlatego, na wzór legionów rzymskich, w budynkach służb ratunkowych powinien znajdować się pojazd, bądź być możliwość wypożyczenia go z sąsiedniej (najbliższej) lokalizacji służb ratunkowych [9].

2.5 Metody badań

W celu implementacji i testowania wydajności oraz poprawności algorytmów, stworzono program w języku Python, ze wsparciem następujących bibliotek:

- networkx - pakiet dostarczający funkcje umożliwiające operacje na grafach, wykresach i sieciach
- matplotlib - do wyświetlania wyników działania algorytmów w postaci wykresów grafów
- time - wykorzystywane do pomiarów czasu pracy algorytmów
- pulp - do programowania liniowego
- pandas - do analizy danych z csv
- geopandas - do analizy współrzędnych geograficznych
- itertools - do zagadnień kombinatorycznych

Program umożliwia wprowadzenie dowolnego grafu w postaci listy wierzchołków oraz krawędzi, jak i wygenerowanie losowego grafu. Następnie wybrane algorytmy analizują dany graf poprzez przypisywanie odpowiednich wartości wierzchołkom oraz wyliczania liczby dominowania rzymskiego słabo spójnego. Dla każdego z algorytmów wyliczany i zapisywany jest ich czas działania. Na końcu program wyświetla wykres z nadanymi wartościami na wierzchołkach.

W celu przeprowadzenia testów wygenerowano oraz zapisano w plikach grafy następujących klas:

- gęste - `nx.erdos_renyi_graph(p=0.7)` - z racji wielu krawędzi, co może znacznie wpływać na wyniki osiągane przez algorytmy, gdzie p to prawdopodobieństwo wystąpienia krawędzi,
- rzadkie - `nx.erdos_renyi_graph(p=0.3)` - z racji mniejszej liczby krawędzi, w celu zweryfikowania hipotezy, że dla tych grafów algorytmy będą działały szybciej,
- drzewa - `nx.random_unlabeled_rooted_tree(n)` - z racji implementacji specjalnego liniowego algorytmu dla drzew, który znajduje $\gamma_R^{wc}(G)$ oraz specyficznych własności drzew,
- bezskalowe - `nx.barabasi_albert_graph()` - grafy nieregularne, z powodu hipotetycznych zastosowań praktycznych, dobrze odzwierciedlają naturalnie powstające na świecie grafy np. sieci społecznościowych, komputerowych, energetycznych.

Grafy te wygenerowano kilka razy dla konkretnej liczby wierzchołków. Liczby wierzchołków, dla których przeprowadzano analizę to [10, 20, 30, 40, 50]. Wszystkie algorytmy zostały użyte dla tego samego zestawu grafów, w celu zachowania miarodajności przy analizie porównawczej. Wszystkie wyniki działania algorytmów na wszystkich wygenerowanych przykładowych grafach zostały zapisane w pliku csv. Zapisano tam również pomiary czasu oraz WCRDF oraz wyznaczoną $\gamma_R^{wc}(G)$. Dodatkowo zapisano też wykresy grafów wraz z przypisanymi wartościami WCRDF.

Czas mierzono za pomocą funkcji `time.perf_counter_ns()`, dając wyniki w nanosekundach o dokładności pomiaru 100 [ns]. Wyniki pomiaru czasu działania są uśrednione, wykonywane pięciokrotnie, aby uniknąć niespodziewanych odchyleń.

Przeprowadzono również dostosowywanie parametrów dla algorytmu mrówkowego na wcześniej wygenerowanych grafach, w celu znalezienia jak najlepszych parametrów dla tego konkretnego problemu. Następnie, na podstawie wielkości błędu dokonano wyboru najlepszego zestawu parametrów, których używano później w docelowej analizie porównawczej.

Algorytmy wyznaczające poprawnie WCRDF, jednakże nie zawsze wyznaczające $\gamma_R^{wc}(G)$, poddano dodatkowej analizie w celu określenia rozbieżności od optymalnego wyniku.

Następnie algorytmy zostały poddane analizie na grafach naturalnie powstały.

Dzięki bibliotece geopandas utworzono mapę Polski, a następnie naniesiono na niej punkty odpowiadające węzłom przesyłowym sieci najwyższych napięć w Polsce, na podstawie istniejącego w Polsce planu. Na grafie starano się odwzorować najważniejsze punkty i krawędzie tej sieci przesyłowej. Z tych danych powstał graf, który następnie zbadano przy użyciu zaimplementowanych algorytmów. Rozmieszczenie wartości WCRDF ma odpowiadać lokalizacjom mechanizmów zabezpieczających sieć przesyłową w razie awarii jednej ze stacji [10].

Następnie analizowano naturalne grafy odzwierciedlające sieci społecznościowe. Są to: mały graf sieci klubu karate Zacharego z 34 wierzchołkami i 78 krawędziami, oraz graf dużej sieci społecznościowej znajomych z Facebook'a (4039 wierzchołki i 80234 krawędzi). W przypadku

sieci społecznościowych WCRDF może mieć zastosowanie w optymalnym rozmieszczeniu agentów wykrywających oszustwa w internetowej sieci społecznościowej.

Dla grafów naturalnie powstały również mierzono czas działania, jak i jakość prezentowanych przez algorytmy wyników.

ROZDZIAŁ 3. BADANE ALGORYTMY

3.1 Wprowadzenie

Niniejszy rozdział opisuje algorytmy dla funkcji dominowania rzymskiego słabo spójnego. Analizowane one będą pod kątem złożoności, wydajności, poprawności oraz potencjalnego zastosowania. Wszystkie algorytmy wyznaczają dodatkowo zbiór dominowania rzymskiego słabo spójnego. Lista analizowanych algorytmów jest następująca:

- algorytm brute force
- algorytm liniowy dla drzew
- algorytm programowania liniowego I
- algorytm programowania liniowego II
- algorytm mrówkowy
- algorytm aproksymacyjny
- algorytm zachłanny

3.2 Algorytm Brute Force

3.2.1 Działanie

Jest to w zasadzie trywialna implementacja dokładnego algorytmu wyznaczającego funkcję oraz zbiór dominujący rzymski słabo spójny poprzez sprawdzenie każdej kombinacji wartości $\{0, 1, 2\}$ na wierzchołkach grafu wejściowego. Każda kombinacja sprawdzana jest pod względem poprawności według definicji słabo spójności w następujący sposób:

- wyznaczamy zbiór indukowany, który składa się ze zbioru dominującego (wierzchołki z wartościami $\{1, 2\}$) oraz sąsiadów wierzchołków zbioru dominującego,
- sprawdzamy czy wszystkie wierzchołki z wartością 0 mają sąsiada z wartością 2,
- dla każdego wierzchołka ze zbioru indukowanego dodajemy krawędzie, ale tylko te wychodzące z wierzchołków zbioru dominującego
- następnie sprawdzamy, czy powstały graf jest spójny. Jeśli jest, to zbiór spełnia założenia definicji.

3.2.2 Złożoność i wydajność

Algorytm ma złożoność wykładniczą, zatem nie będzie wykonywalny w rozsądny czasie dla większych grafów.

- generowanie wszystkich kombinacji możliwych przypisań: 3^n , gdzie n to liczba wierzchołków grafu,
- sprawdzanie własności zbioru słabo spójnego dla każdego przypisania: n^2

Zatem złożoność czasowa algorytmu wynosi $O(3^n \cdot n^2)$

Złożoność pamięciowa ogranicza się do przechowywania grafu w pamięci i wynosi $O(n + m)$

3.2.3 Pseudokod

Algorytm Brute Force

```
1: function FINDROMANDOMINATINGSET(graph)
2:   Initialize min_roman_number  $\leftarrow \infty$ 
3:   Initialize best_node_values  $\leftarrow \text{None}$ 
4:   nodes  $\leftarrow$  list of nodes in graph
5:   for each assignment of values (0, 1, 2) to all nodes do
6:     node_values  $\leftarrow$  mapping of nodes to values
7:     for each node in graph do                                 $\triangleright$  Sprawdzanie warunku dominacji
8:       if node_values[node] = 0 then
9:         if not any neighbor of node has value 2 then
10:          Continue to next assignment
11:        end if
12:      end if
13:    end for
14:    induced_set  $\leftarrow$  nodes with values {1, 2}
15:    for each node in induced_set do
16:      Add all its neighbors to induced_set
17:    end for
18:    Create empty induced_graph
19:    for each node in induced_set do
20:      if node_values[node] is 1 or 2 then
21:        for each neighbor in graph do
22:          if neighbor in induced_set then
23:            Add edge to induced_graph
24:          end if
25:        end for
26:      end if
27:    end for
28:    if induced_graph is connected then
29:      Compute roman_number  $\leftarrow$  sum of node_values
30:      if roman_number < min_roman_number then
31:        Update min_roman_number and best_node_values
32:      end if
33:    end if
34:  end for
35:  return (min_roman_number, best_node_values)
36: end function
```

3.3 Algorytm liniowy dla drzew

3.3.1 Działanie

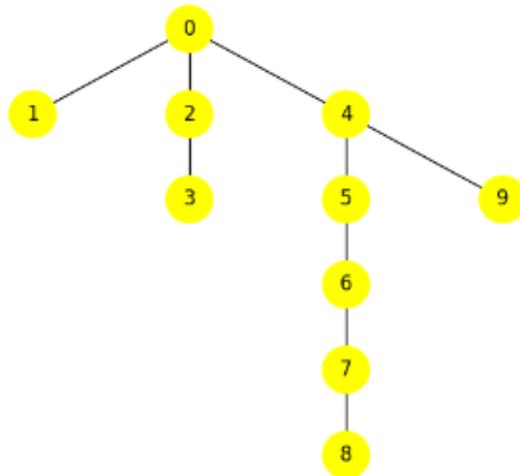
Dla każdego wierzchołka definiujemy następujące parametry:

- $v[R']$ - wartość funkcji dominowania rzymskiego słabo spójnego w wierzchołku v , z założeniem, że $v[R'] \in \{0, 1, 2\}$
- $v[n00']$ - oznacza liczbę dzieci z $R = 0$ oraz bez sąsiada z $R = 2$ (dziecko niezdominowane)
- $v[n01']$ - oznacza liczbę dzieci z $R = 0$ i z sąsiadem z $R = 2$ (dziecko zdominowane)
- $v[n1']$ - oznacza liczbę dzieci wierzchołka v z $R = 1$
- $v[n2']$ - oznacza liczbę dzieci wierzchołka v z $R = 2$

- $v['sw']$ - oznacza liczbę dzieci wierzchołka v z $n00 = 1$ i $n01 = 0$. (wierzchołek wspierający)
- $v['ch'] = 1$ jeśli $v['sw'] > 1$ lub jeśli $v['sw'] = 1$ i mający przynajmniej jedno dziecko z $R = 0$; w przeciwnym razie $v['ch'] = 0$. Jeśli $v['ch'] = 1$, wtedy $v['R'] = 2$ i w Fazie 2 każde dziecko v z $n00 = 1$ i $n01 = 0$ dostaje $R = 0$ i jego jedyne dziecko z $R = 0$ zmienia wartość na $R = 1$.
- $v['child']$ - jeśli v jest wierzchołkiem wspierającym, wtedy wartość ta jest numerem liścia sąsiadującego z v .

Algorytm ma 2 fazy. W obu fazach rozpatrujemy wszystkie wierzchołki drzewa według odwrotnego porządku drzewa, czyli od ostatniego wierzchołka do korzenia (reverse tree-order). Wszystkie początkowo zdefiniowane wartości mają wartości 0. W bardzo ogólnym rozumieniu, rozpatrujemy każdy wierzchołek na podstawie sąsiedztwa, relacji ojciec-dziecko oraz wartości zdefiniowanych parametrów i aktualizację ich w obu fazach. Wartości R przy każdym wierzchołku, to wartości dominowania rzymskiego słabo spójnego, a suma tych wartości to funkcja dominowania rzymskiego słabo spójnego.

Z racji sporego stopnia skomplikowania algorytmu, jego działanie zostanie przedstawione na przykładzie. Dany jest graf G będący drzewem ukorzenionym o 10 wierzchołkach, ponumerowanych wartościami od 0 do 9. Zakładamy, że wyznaczenie ojca każdego z wierzchołków jest trywialne i niezłożone czasowo, dlatego podczas rozważań wyznaczanie ojca wierzchołka będzie pomijane.



Rysunek 3.1: Graf G - przykładowe drzewo

1. Jeśli wierzchołek jest liściem i nie jest korzeniem to zwiększamy wartość 'n00' o 1.

Zatem dla liści 1,3,8,9, wartości ich ojców wyglądają następująco:

$$T[7]['n00'] = 1$$

$$T[7]['child'] = 8 \text{ (od wierzchołka 8)}$$

$$T[4]['n00'] = 1$$

$$T[4]['child'] = 9 \text{ (od wierzchołka 9)}$$

$$T[2]['n00'] = 1$$

$$T[2]['child'] = 3 \text{ (od wierzchołka 3)}$$

$T[0]['n00'] = 1$

$T[0]['child'] = 1$ (od wierzchołka 1)

2. Jeśli wierzchołek nie jest liściem:

- (a) Sprawdzamy czy wierzchołek posiada tylko jedno niezdominowane dziecko i posiada ojca. W tym przypadku ojciec będzie wierzchołkiem wspierającym.

$T[6]['sw'] = 1$ (od wierzchołka 7)

$T[0]['sw'] = 2$ (od wierzchołka 4 i 2)

- (b) Sprawdzamy sumę wartości dzieci zdominowanych, niezdominowanych oraz liczbę dzieci dla których wierzchołek jest wspierający. Jeśli ta suma jest większa od 1, to wartość tego wierzchołka ustawiamy na 2, a parametr 'ch' na 1.

$T[0]['R'] = 2$ (od wierzchołka 0)

$T[0]['ch'] = 1$ (od wierzchołka 0)

- i. Jeśli wierzchołek ma ojca to parametr 'n2' ojca zwiększamy o 1, a jeśli wierzchołek posiada tylko jedno niezdominowane dziecko zmniejszamy parametr wspierający u ojca.

(c) Jeśli wierzchołek nie jest wspierający:

- i. Jeśli wierzchołek posiada niezdominowane dzieci lub jedno dziecko i żadnych dzieci z wartością 2 lub dzieci zdominowane, to wtedy wierzchołek będzie miał wartość 2. Dla istniejącego ojca wierzchołka zwiększamy 'n2'.

$T[7]['R'] = 2$ (od wierzchołka 7)

$T[6]['n2'] = 1$ (od wierzchołka 7)

$T[4]['R'] = 2$ (od wierzchołka 4)

$T[0]['n2'] = 2$ (od wierzchołka 4 i 2)

$T[2]['R'] = 2$ (od wierzchołka 2)

- ii. Jeśli wierzchołek posiada niezdominowane dziecko, to danemu wierzchołkowi przypisujemy wartość 0, a temu dziecku wartość 1, a dla ojca zmniejszamy wartość wspierania.

- iii. Jeśli wierzchołek posiada tylko dzieci zdominowane, to danemu wierzchołkowi przypisujemy wartość 1, a ojcu zwiększamy wartość 'n1'.

$T[5]['R'] = 1$ (od wierzchołka 5)

$T[4]['n1'] = 1$ (od wierzchołka 5)

(d) Jeśli wartość wierzchołka wynosi 0, posiada on dzieci z wartością 2 oraz ojca, to zwiększamy wartość ojca 'n01' o 1,

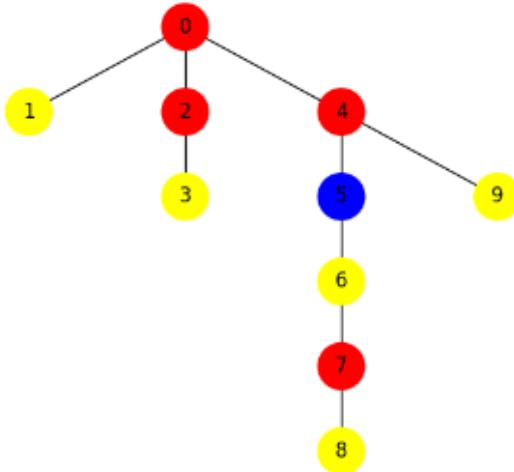
$T[5]['n01'] = 1$ (od wierzchołka 6)

(e) Jeśli wartość wierzchołka wynosi 0, nie posiada on dzieci z wartością 2 oraz ojca, to zwiększamy wartość ojca 'n00' o 1,

3. Korzeń należy rozpatrzyć dodatkowo. Jeśli nie posiada on dzieci z wartościami 2 i sam ma wartość 0, to przypisujemy mu $R = 2$,

4. Jeśli liczba dzieci korzenia z $R = 1$ jest równa liczbie dzieci pomniejszonej o 1, to korzeń również ma wartość 1.

Zdjęcie przedstawia zachowanie algorytmu po fazie 1. Czerwone wierzchołki to wartość $R = 2$, niebieskie to $R = 1$, a żółte to $R = 0$. Widać, że przypisanie nie jest jeszcze optymalne.



Rysunek 3.2: Graf G - po fazie 1

W fazie 2, dla każdego wierzchołka posiadającego ojca, tylko jedno dziecko niezdominowane i parametr ojca 'ch' wynoszący 1, wtedy musimy „zmienić” układ, poprzez ustawienie 0 na obecnym wierzchołku, ustawienie dziecka na 1 oraz zwiększenie liczby dzieci niedominowanych ojca wierzchołka. Ten warunek spełniony jest dla wierzchołków 4 i 2. Zatem:

$$T[4]['R'] = 0 \text{ (od wierzchołka 4)}$$

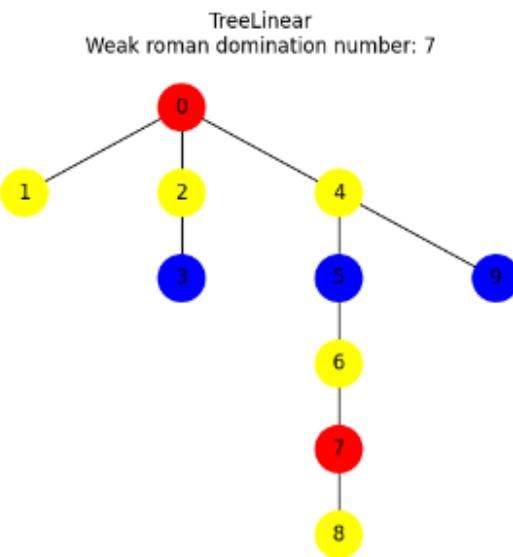
$$T[9]['R'] = 1 \text{ (dziecko wierzchołka 4)}$$

$$T[2]['R'] = 0 \text{ (od wierzchołka 2)}$$

$$T[3]['R'] = 1 \text{ (dziecko wierzchołka 2)}$$

$$T[0]['n00'] = 3 \text{ (ojciec wierzchołków 4 i 2)}$$

Poniższy rysunek przedstawia prawidłowe przypisanie wartości R po fazie 2.



Rysunek 3.3: Graf G - po fazie 2 - finalna wersja

3.3.2 Złożoność i wydajność

Algorytm ma złożoność liniową $O(n)$, gdzie n to liczba wierzchołków drzewa. Algorytm zatem jest skalowalny i szybki dla większych grafów, natomiast ograniczony do jednej ich klasy - drzew.

3.3.3 Pseudokod

Algorytm liniowy dla drzew - Faza 1

```
1: function PHASE1(T, root)
2:   father_map  $\leftarrow$  Compute parent-child relationships using BFS
3:   nodes_ids  $\leftarrow$  List of all nodes in T
4:   for each node  $v$  in reversed(nodes_ids) do
5:     father  $\leftarrow$  father_map[ $v$ ]
6:     if  $v$  is a leaf and  $v \neq root$  then
7:       Increase  $T[father]['n00']$ 
8:       Set  $T[father]['child'] \leftarrow v$ 
9:     else
10:      if  $T[v]['n00'] == 1$  and  $T[v]['n01'] == 0$  and father exists then
11:        Increase  $T[father]['sw']$ 
12:      end if
13:      if  $T[v]['sw'] + T[v]['n00'] + T[v]['n01'] > 1$  then
14:        Set  $T[v]['R'] = 2$ 
15:        if father exists then
16:          Increase  $T[father]['n2']$ 
17:          if  $T[v]['n00'] == 1$  and  $T[v]['n01'] == 0$  then
18:            Decrease  $T[father]['sw']$ 
19:          end if
20:        end if
21:         $T[v]['ch'] = 1$ 
22:      end if
23:      if  $T[v]['sw'] == 0$  then
24:        if  $T[v]['n00'] > 1$  or ( $T[v]['n00'] == 1$  and ( $T[v]['n2'] == 0$  or  $T[v]['n01'] > 0$ ))
25:          then
26:            Set  $T[v]['R'] = 2$ 
27:            if father exists then
28:              Increase  $T[father]['n2']$ 
29:            end if
30:            else if  $T[v]['n00'] == 1$  then
31:              Set  $T[v]['R'] = 0$ 
32:              Set  $T[T[v]['child']]['R'] = 1$ 
33:              if father exists then
34:                Decrease  $T[father]['sw']$ 
35:              end if
36:            end if
37:            if  $T[v]['n00'] == 0$  and  $T[v]['n01'] > 0$  then
38:              Set  $T[v]['R'] = 1$ 
39:              if father exists then
40:                Increase  $T[father]['n1']$ 
41:              end if
42:            end if
43:            if  $T[v]['R'] = 0$  and  $T[v]['n2'] > 0$  and father exists then
44:               $T[father]['n01'] \leftarrow T[father]['n01'] + 1$ 
45:            end if
46:            if  $T[v]['R'] = 0$  and  $T[v]['n2'] = 0$  and father exists then
47:               $T[father]['n00'] \leftarrow T[father]['n00'] + 1$ 
48:            end if
49:          end if
50:        end for
51:        if  $T[root]['n2'] == 0$  and  $T[root]['R'] == 0$  then
52:          Set  $T[root]['R'] = 2$ 
53:        end if
54:        if  $T[root]['n1'] == (\text{number of root's neighbors} - 1)$  then
55:          Set  $T[root]['R'] = 1$ 
56:        end if
57:      return T
58:    end function
```

Algorytm liniowy dla drzew - Faza 2

```

1: function PHASE2( $T$ , root)
2:   for each node  $v$  in reversed( $nodes\_ids$ ) do
3:      $father \leftarrow father\_map[v]$ 
4:     if  $father$  exists then
5:       if  $T[v]['n00'] == 1$  and  $T[father]['ch'] == 1$  and  $T[v]['n01'] == 0$  then
6:         Set  $T[v]['R'] = 0$ 
7:         Set  $T[T[v]['child']]['R'] = 1$ 
8:         Increase  $T[father]['n00']$ 
9:       end if
10:      end if
11:    end for
12:    return  $T$ 
13: end function

```

3.4 Algorytm programowania liniowego I

Jest to algorytm programowania liniowego zaimplementowany na podstawie artykułu „Algorithmic complexity of weakly connected Roman domination in graphs”[7].

3.4.1 Działanie

Ten model programowania liniowego wymagańa zdefiniowania następujących zmiennych:

$$x_e = \begin{cases} 1, & e \in E' \\ 0, & e \notin E' \end{cases} \quad y_e = \begin{cases} 1, & e \in T' \\ 0, & e \notin T' \end{cases}$$

$$a_v = \begin{cases} 1, & v \in V_1 \cup V_2 \\ 0, & v \in V_0 \end{cases} \quad b_v = \begin{cases} 1, & v \in V_2 \\ 0, & v \in V_0 \cup V_1 \end{cases}$$

gdzie $v \in V$, $e \in E$ i T' to drzewo rozpinające podgrafu G' .

Definiujemy funkcję celu, czyli minimalizację wagi zbioru dominującego rzymskiego słabo spójnego:

$$Z: \min \left(\sum_{v \in V} a_v + \sum_{v \in V} b_v \right)$$

oraz ograniczenia:

Wierzchołek o wartości 0, bedzie miał przynajmniej jednego sasiada z wartością 2:

$$a_v + \sum_{k \in N_G(v)} b_k \geq 1, \quad v \in V, \tag{1}$$

Krawędź istnieje w drzewie rozpinającym T' , jesli ta krawędź należy do G' . Ograniczenie to zapewnia spójność w G' :

$$y_e \leq x_e, \quad e \in E, \tag{2}$$

Wybór krawędzi, które mają wartość należącą do zbioru dominującego na przynajmniej jednym

swoim końcu:

$$x_e \leq a_{i_e} + a_{j_e}, \quad e \in E_{G'}, \quad (3)$$

Drzewo rozpinające T' ma liczbę krawędzi równą liczbie wierzchołków grafu pomniejszoną o 1:

$$\sum_{e \in E} y_e = n - 1, \quad (4)$$

Drzewo rozpinające T' nie posiada cykli:

$$\sum_{i_e, j_e \in S} y_e \leq |S| - 1, \quad S \subseteq V, \quad |S| \geq 3, \quad (5)$$

Podzbior wierzchołków z $b_v = 1$, czyli (V_2) , jest podzbiorem wierzchołków z $a_v = 1$, czyli $(V_1 \cup V_2)$

$$b_v \leq a_v, \quad v \in V. \quad (6)$$

Warunki 1, 2, 5 gwarantują, że T' jest drzewem rozpinającym grafu G' .

3.4.2 Złożoność i wydajność

Liczba zmiennych dla grafu o n wierzchołkach i m krawędziach wynosi $O(n+m)$. Z powodu wykładniczej natury nierówności liczba ograniczeń wynosi $O(2^n)$.

3.4.3 Pseudokod

Algorytm programowania liniowego I

```
1: function ILP_I(graph)
2:    $V \leftarrow$  list of nodes in graph
3:    $E \leftarrow$  list of edges in graph
4:   Initialize ILP model model
5:   Set objective: Minimize  $\sum(a[i] + b[i])$  for all nodes  $i \in V$ 
6:   Define binary variables:
7:      $x[i, j]$  for  $(i, j) \in E$                                  $\triangleright$  1 jeśli krawędź jest w  $G'$ 
8:      $y[i, j]$  for  $(i, j) \in E$                                  $\triangleright$  1 jeśli krawędź jest w drzewie rozpinającym  $T'$ 
9:      $a[i]$  for  $i \in V$                                      $\triangleright$  1 jeśli wierzchołek należy do  $V1 \cup V2$ 
10:     $b[i]$  for  $i \in V$                                      $\triangleright$  1 jeśli wierzchołek należy do  $V2$ 
11:   Constraints:
12:     for each node  $i$  in  $V$  do                       $\triangleright$  Każdy wierzchołek musi być broniony
13:       Add constraint:  $a[i] + \sum b[k] \geq 1$ , where  $k$  are neighbors of  $i$ 
14:     end for
15:     for each edge  $(i, j)$  in  $E$  do
16:       Add constraint:  $y[i, j] \leq x[i, j]$                  $\triangleright$  Krawędź drzera musi istnieć w  $G'$ 
17:       Add constraint:  $x[i, j] \leq a[i] + a[j]$              $\triangleright$  Krawędzie drzera muszą łączyć bronione
           wierzchołki
18:     end for
19:     Add constraint:  $\sum y[i, j] = |V| - 1$            $\triangleright$  Drzewo musi mieć  $|V| - 1$  krawędzi
20:     Find cliques of size  $\geq 3$  in graph and store as subsets
21:     for each subset  $S$  in subsets do                   $\triangleright$  Eliminacja cykli
22:       Add constraint:  $\sum y[i, j] \leq |S| - 1$  for edges  $(i, j) \in S$ 
23:     end for
24:     for each node  $i$  in  $V$  do                       $\triangleright$  Wierzchołki z  $V2$  muszą należeć do  $V1 \cup V2$ 
25:       Add constraint:  $b[i] \leq a[i]$ 
26:     end for
27:     Solve ILP model
28:     Extract solution:
29:     for each node  $i$  in  $V$  do
30:        $solution[i] \leftarrow round(a[i].X) + 2 * round(b[i].X)$ 
31:     end for
32:     return (model.objVal, solution)
33: end function
```

3.5 Algorytm programowania liniowego II

Jest to algorytm programowania liniowego zaimplementowany na podstawie artykułu „Algorithmic complexity of weakly connected Roman domination in graphs”[7], podobnie jak poprzedni.

3.5.1 Działanie

Model ten opiera się na przepływach. W tym modelu rozpatrujemy graf jako wierzchołek który zużywa jednostkę przepływu, przepływając przez krawędzie grafu. Na wejściu definiujemy zewnętrzny przepływ, którego liczba jednostek jest równa liczbie wierzchołków grafu. Zachowujemy zasadę przepływu sieci, dlatego próbujemy wprowadzić przepływ zewnętrzny w jak największej ilości przez pojedynczy wierzchołek.

Definiujemy następujące zmienne:

$$x_i = \begin{cases} 1, & i \in V_1 \cup V_2 \\ 0, & i \in V_0 \end{cases} \quad y_i = \begin{cases} 1, & i \in V_2 \\ 0, & i \in V_0 \cup V_1 \end{cases}$$

$$a_e = \begin{cases} 1, & e \in E' \\ 0, & e \notin E' \end{cases} \quad t_i = \begin{cases} 1, & \text{wierzchołek korzenia} = i \\ 0, & \text{pozostałe wierzchołki} \end{cases}$$

$$u_i \in N \cup \{0\}, \quad v_e \in [-n, n].$$

gdzie:

t_i zdefiniowany dla każdego wierzchołka grafu. Identyfikuje, gdzie zewnętrzny wierzchołek jest traktowany jako wejście.

u_i reprezentuje liczbę jednostek przepływu zewnętrznego dla danego wierzchołka grafu.

v_e oznacza jednostki przepływające przez dane krawędzie.

x_i, y_i oznaczają przynależność do zbioru dominującego rzymskiego słabo spójnego.

Minimalizującą liczbę dominowania rzymskiego słabo spójnego jako funkcję celu definiujemy następująco:

$$Z: \min \left(\sum_{i \in V} x_i + \sum_{i \in V} y_i \right),$$

mając dane ograniczenia:

Wierzchołek z wartością 0 sąsiaduje z przynajmniej jednym wierzchołkiem z wartością 2:

$$x_i + \sum_{j \in N_G(i)} y_j \geq 1, \quad i \in V, \tag{1}$$

Prawidłowe zdefiniowanie zmiennych x i y :

$$y_i \leq x_i, \quad i \in V, \quad (2)$$

Krawędź $e \in E'$ ma przynajmniej jeden koniec z wierzchołkiem o wartości przynajmniej 1:

$$a_e \leq x_{i_e} + x_{j_e}, \quad e \in E, \quad (3)$$

Jest tylko jeden wierzchołek w grafie G' gdzie jest dostarczony przepływ zewnętrzny:

$$\sum_{i \in V} t_i = 1, \quad (4)$$

Wielkość przepływu wielkości co najwyżej n :

$$u_i \leq n \cdot t_i, \quad i \in V, \quad (5)$$

Przepływ ma miejsce tylko w krawędziach należących do E' :

$$v_e \leq n \cdot a_e, \quad e \in E, \quad (6)$$

$$v_e \geq -n \cdot a_e, \quad e \in E, \quad (7)$$

Reprezentacja zasady zachowania sieci:

$$u_i + \sum_{e:j_e=i} v_e - \sum_{e:i_e=i} v_e = 1, \quad i \in V, \quad (8)$$

Każdy wierzchołek $v \in V$ musi mieć przynajmniej jeden ustalony wierzchołek w E'

$$a_e \geq 1, \quad e \in E, \quad (9)$$

3.5.2 Złożoność i wydajność

Suma zmiennych w sformułowanym modelu wynosi $3n+m$, będących wartościami logicznymi, n integralnych i m ciągłych.

Liczba ograniczeń wynosi $7n + 3m + 2$. Wynika to z tego, że nie wszystkie ograniczenia to są nierówności.

3.5.3 Pseudokod

Algorytm programowania liniowego II

```
1: function ILP_II(graph)
2:   Initialize ILP model model with minimization objective
3:    $V \leftarrow$  list of nodes in graph
4:    $E \leftarrow$  list of edges in graph
5:    $n \leftarrow |V|$                                       $\triangleright$  Liczba wierzchołków
6:   Define binary variables:
7:    $x[i]$  for  $i \in V$                           $\triangleright$  1 jeśli wierzchołek i należy do zbioru X
8:    $y[i]$  for  $i \in V$                           $\triangleright$  1 jeśli wierzchołek i należy do zbioru Y
9:    $a[e]$  for  $e \in E$                           $\triangleright$  1 jeśli krawędź e należy do drzewa rozpinającego
10:   $t[i]$  for  $i \in V$                             $\triangleright$  1 jeśli wierzchołek i jest korzeniem
11: Define integer and continuous variables:
12:  $u[i]$  for  $i \in V$                           $\triangleright$  Zmienna całkowita do struktury drzewa
13:  $v[e]$  for  $e \in E$                           $\triangleright$  Zmienna przepływu z ograniczeniami  $[-n, n]$ 
14: Objective:
15: Minimize  $\sum(x[i] + y[i])$  for all  $i \in V$ 
16: Constraints:
17: for each node i in V do            $\triangleright$  Zapewnij pokrycie wszystkich wierzchołków
18:   Add constraint:  $x[i] + \sum y[j] \geq 1$ , where  $(i, j) \in E$ 
19:   Add constraint:  $y[i] \leq x[i]$ 
20:   Add constraint:  $\sum a[e] \geq 1$ , where e contains i
21: end for
22: for each edge e =  $(i_e, j_e)$  in E do
23:   Add constraint:  $a[e] \leq x[i_e] + x[j_e]$ 
24:   Add constraint:  $v[e] \leq n \cdot a[e]$ 
25:   Add constraint:  $v[e] \geq -n \cdot a[e]$ 
26: end for
27: Add constraint:  $\sum t[i] = 1$                    $\triangleright$  Tylko jeden korzeń istnieje
28: for each node i in V do            $\triangleright$  Ograniczenia struktury drzewa
29:   Add constraint:  $u[i] \leq n \cdot t[i]$ 
30:   Add constraint:  $u[i] + \sum v[e] - \sum v[e] = 1$ , for edges e entering/exiting i
31: end for
32: Solve ILP model
33: Extract solution:
34: for each node i in V do
35:    $solution[i] \leftarrow round(x[i].varValue) + 2 \times round(y[i].varValue)$ 
36: end for
37: return (model.objVal, solution)
38: end function
```

3.6 Algorytm mrówkowy

3.6.1 Działanie

Definiujemy następujące zmienne i heurystyki:

- **num_ants** – liczba mrówek w każdej iteracji.
- **num_iterations** – liczba iteracji algorytmu.
- ρ – współczynnik parowania feromonów, określający, jak szybko feromony zanikają.
- τ_{init} – początkowa wartość feromonów na wszystkich krawędziach.
- α – wpływ poziomu feromonów na decyzję wyboru ścieżki.
- β – wpływ heurystyki lokalnej (np. liczby sąsiadów) na decyzję wyboru ścieżki.

Na początku należy zainicjować feromony na każdej krawędzi wejściowego grafu.

Dla zdefiniowanej liczby iteracji algorytmu, a następnie dla każdej mrówki:

1. na podstawie heurystyk, parametrów, sąsiadów wierzchołków i feromonów budowane jest rozwiązanie dla pojedynczej mrówki w postaci prawdopodobieństw wartości na wierzchołkach grafu.

Każdy wierzchołek i przyjmuje wartość $v \in \{0, 1, 2\}$ z prawdopodobieństwem:

$$P_i(v) = \frac{\left(\sum_{j \in N(i)} \tau_{ij} \right)^\alpha \cdot (\eta_i)^\beta}{\sum_{v' \in \{0, 1, 2\}} \left(\sum_{j \in N(i)} \tau_{ij} \right)^\alpha \cdot (\eta_i)^\beta}$$

gdzie:

- τ_{ij} to poziom feromonów na krawędzi (i, j) ,
- $\eta_i = |N(i)|$ to liczba sąsiadów wierzchołka i będąca heurystyką

2. rozwiązanie sprawdzane jest pod katem poprawności względem definicji. Sprawdzane jest, czy wierzchołki z wartościami 0, posiadają sąsiada z wartościami 2 oraz warunek słabo spójności. Jeśli warunek nie jest spełniony, rozwiązanie otrzymuje nieskończoną wartość wagi, co sprawia, że nie jest brane pod uwagę w rozwiązaniu. W przeciwnym razie sumujemy wartości na wierzchołkach grafu.

Po przejściu wszystkich mrówek, aktualniamy wartości feromonów na grafie, zmniejszając ich wartość o współczynnik ewaporacji oraz aktualizację wartości feromonów na podstawie najlepszego dotychczasowego rozwiązania.

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}$$

gdzie:

- ρ to współczynnik parowania feromonów,
- $\Delta\tau_{ij}$ to ilość feromonów dodana w oparciu o najlepsze rozwiązanie:

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{1}{f(best_solution^*)}$$

gdzie $best_solution^*$ to najlepsze znalezione rozwiązanie, a $f(best_solution^*)$ to suma wartości wierzchołków grafu najlepszego rozwiązania.

3.6.2 Złożoność i wydajność

Złożoność wynosi $O(num_iterations \cdot num_ants \cdot V^2)$, co sprawia, że algorytm dla większych grafów może być kosztowny obliczeniowo.

Złożoność pamięciowa wynosi $O(V^2 + num_ants \cdot V)$.

3.6.3 Pseudokod

Algorytm mrówkowy -inicjalizacja

```
1: function INITIALIZEPHEROMONES(graph)
2:   pheromones  $\leftarrow$  Assign initial pheromone value to all edges
3:   return pheromones
4: end function
5: function CHOOSENODEVALUE(node, pheromones, neighbors)
6:   values  $\leftarrow \{0, 1, 2\}$ 
7:   Initialize probabilities as empty list
8:   for each value in  $\{0, 1, 2\}$  do
9:     Compute pheromone_level as sum of pheromones of neighboring edges
10:    Compute probability as  $(\text{pheromone\_level}^\alpha) \times (\text{heuristic}^\beta)$ 
11:    Append probability to probabilities
12:   end for
13:   Normalize probabilities
14:   return Random weighted choice from  $\{0, 1, 2\}$ 
15: end function
16: function BUILDSOLUTION(graph, pheromones)
17:   Initialize node_values as empty dictionary
18:   for each node in graph do
19:     neighbors  $\leftarrow$  list of node's neighbors
20:     Assign node_values[node]  $\leftarrow$  CHOOSENODEVALUE(node, pheromones, neighbors)
21:   end for
22:   return node_values
23: end function
24: function ISVALIDROMANDOMINATINGSET(graph, node_values)
25:   for each node in graph do
26:     if node_values[node] = 0 and no neighbor has value 2 then
27:       return False
28:     end if
29:   end for
30:   induced_set  $\leftarrow$  nodes with values  $\{1, 2\}$ 
31:   for each node in induced_set do
32:     Add all neighbors to induced_set
33:   end for
34:   Create empty graph induced_graph
35:   for each node in induced_set do
36:     if node_values[node]  $\in \{1, 2\}$  then
37:       for each neighbor in graph do
38:         if neighbor in induced_set then
39:           Add edge between node and neighbor in induced_graph
40:         end if
41:       end for
42:     end if
43:   end for
44:   if induced_graph is not connected then
45:     return False
46:   end if
47:   return True
48: end function
```

Algorytm mrówkowy - główna pętla

```
1: function UPDATEPHEROMONES(graph, pheromones, solutions)
2:   for each edge in pheromones do
3:     Reduce pheromone level using evaporation rate
4:   end for
5:   best_solution ← Solution with minimum Roman number
6:   for each node in best_solution do
7:     for each neighbor of node do
8:       Increase pheromone level on edge (node, neighbor)
9:     end for
10:   end for
11: end function
12: function EXECUTE(graph)
13:   pheromones ← INITIALIZEPHEROMONES(graph)
14:   best_solution ← None
15:   best_roman_number ← ∞
16:   for each iteration in num_iterations do
17:     Initialize solutions as empty list
18:     for each ant in num_ants do
19:       solution ← BUILDSOLUTION(graph, pheromones)
20:       roman_number ← EVALUATESOLUTION(graph, solution)
21:       Append (solution, roman_number) to solutions
22:       if roman_number < best_roman_number then
23:         Update best_roman_number and best_solution
24:       end if
25:     end for
26:     UPDATEPHEROMONES(graph, pheromones, solutions)
27:   end for
28:   return (best_roman_number, best_solution)
29: end function
```

3.7 Algorytm aproksymacyjny

3.7.1 Działanie

Algorytm ten został również zaimplementowany na podstawie artykułu [7]. Zdefiniowano tam następujące kroki algorytmu:

1. Wyznaczenie zbioru dominującego spełniającego warunki zbioru dominującego spójnego, dalej *Connected dominating set* - CDS.
2. Dla wierzchołków ze zbioru dominującego przypisywana jest wartość 2, dla pozostałych wierzchołków przypisujemy wartość 0.

Udowodniono, że takie rozwiązań jest aproksymacyjne, o współczynniku aproksymacji równym $2(1 + \epsilon)(1 + \ln(\Delta - 1))$. Aby móc przetestować w pełni działanie algorytmu, zaimplementowano go w całości, na podstawie sugestii obecnych w artykule:

1. Wyznaczenie minimalnego zbioru dominującego spełniającego spójnego. Problem ten również jest NP-trudny, dlatego zbiór ten wyznaczono przy użyciu programowania liniowego, w celu zachowania poprawności rozwiązania oraz - dla wielu przypadków - w rozsądny czasie.

Niech $G = (V, E)$ będzie grafem nieskierowanym, gdzie:

- V — zbiór wierzchołków,
- $E \subseteq V \times V$ — zbiór krawędzi.

Definiujemy funkcję celu jako minimalizację liczby wierzchołków w zbiorze dominującym:

$$Z : \min \sum_{v \in V} x_v$$

Definiujemy następujące zmienne decyzyjne:

- $x_v \in \{0, 1\}$ — czy wierzchołek $v \in V$ należy do zbioru dominującego (CDS),
- $f_{uv} \in Z_{\geq 0}$ — ilość jednostek przepływu z u do v , dla każdej krawędzi $(u, v) \in E$.

Oraz ograniczenia:

Dominacja — każdy wierzchołek musi być zdominowany (sam lub przez sąsiada):

$$\forall v \in V : x_v + \sum_{u \in N(v)} x_u \geq 1$$

Bilans przepływu dla każdego wierzchołka $v \neq r$:

$$\forall v \in V \setminus \{r\} : \sum_{u \in N(v)} f_{uv} - \sum_{u \in N(v)} f_{vu} = x_v$$

Źródło przepływu (root) — wysyła dokładnie $\sum x_v - 1$ jednostek przepływu:

$$\sum_{u \in N(r)} f_{ru} = \sum_{v \in V} x_v - 1$$

Ograniczenie przepływu — przepływ możliwy tylko między wierzchołkami należącymi do CDS:

$$\forall(u, v) \in E : f_{uv} \leq (|V| - 1) \cdot x_u \quad \text{oraz} \quad f_{uv} \leq (|V| - 1) \cdot x_v$$

2. Dla wierzchołków CDS przypisywana jest wartość 2, dla pozostałych wierzchołków przypisujemy wartość 0.

3.7.2 Złożoność i wydajność

W pesymistycznym przypadku rozwiązywanie modelu programowania liniowego wynosi $O(2^n)$.

Model zawiera $|V|$ zmiennych x_v oraz $2|E|$ zmiennych przepływu f_{uv} . Dodatkowo zawiera $|V| + 2|E|$ ograniczeń. Zatem liczba zmiennych oraz ograniczeń dają złożoności $O(V + E)$.

3.7.3 Pseudokod

Algorytm aproksymacyjny

```

1: function COMPUTEDOMINATINGSET( $G$ )
2:    $N \leftarrow$  list of nodes in  $G$ 
3:    $E \leftarrow$  list of edges in  $G$ 
4:    $x_v \in \{0, 1\}$  for all  $v \in N$ 
5:   Choose arbitrary root  $r \in N$ 
6:    $f_{uv} \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  for all  $(u, v) \in E$  and reversed
7:   Minimize  $\sum_{v \in N} x_v$ 
8:   for all  $v \in N$  do
9:     Ensure:  $x_v + \sum_{u \in \text{Neighbors}(v)} x_u \geq 1$                                 ▷ Dominacja
10:    end for
11:    for all  $v \in N, v \neq r$  do
12:      Inflow  $\leftarrow \sum_{u \in \text{Neighbors}(v)} f_{uv}$ 
13:      Outflow  $\leftarrow \sum_{u \in \text{Neighbors}(v)} f_{vu}$ 
14:      Ensure: Inflow – Outflow =  $x_v$                                               ▷ Bilans przepływu
15:    end for
16:    Ensure:  $\sum_{u \in \text{Neighbors}(r)} f_{ru} = \sum_{v \in N} x_v - 1$                   ▷ Źródło przepływu
17:    for all  $(u, v) \in E$  and  $(v, u)$  do
18:      Ensure:  $f_{uv} \leq (|N| - 1) \cdot x_u$ 
19:      Ensure:  $f_{uv} \leq (|N| - 1) \cdot x_v$                                          ▷ Warunki spójności
20:    end for
21:    Solve ILP
22:    return  $\{v \in N : x_v = 1\}$ 
23: end function
24: function EXECUTE( $G$ )
25:    $N \leftarrow$  list of nodes in  $G$ 
26:    $D \leftarrow$  COMPUTEDOMINATINGSET( $G$ )
27:   for all  $v \in N$  do
28:     if  $v \in D$  then
29:        $value[v] \leftarrow 2$ 
30:     else
31:        $value[v] \leftarrow 0$ 
32:     end if
33:   end for
34:    $R \leftarrow \sum_{v \in N} value[v]$ 
35:   return  $(R, value)$ 
36: end function

```

3.8 Algorytm zachłanny

3.8.1 Działanie

1. Początkowo definiujemy zbiory wierzchołków chronionych (początkowo pusty) i niechronionych (początkowo wszystkie wierzchołki grafu).
2. Wybieramy wierzchołek o największym stopniu, jako wierzchołek startowy. Ustawiamy mu wartość 2, a następnie dodajemy go do zbioru wierzchołków chronionych, usuwając go z niechronionych. Analogicznie postępujemy z sąsiadami tego wierzchołka, tj. usuwamy ich ze zbioru wierzchołków niechronionych, dodając do chronionych.
3. Następnie, dopóki istnieją wierzchołki w zbiorze wierzchołków niechronionych:
 - Iterujemy po zbiorze wierzchołków chronionych, wyznaczając ich sąsiadów. Jeśli znajduje się wierzchołek niechroniony, dodajemy go do zbioru wierzchołków „kandydujących”.
 - Jeśli zbiór „kandydatów” jest pusty, to wybieramy pierwszy wierzchołek ze zbioru wierzchołków niechronionych, ustawiamy mu wartość 2 i dodajemy go do zbioru wierzchołków chronionych, usuwając go z niechronionych.
 - W przypadku znalezienia „kandydatów”, wybieramy wierzchołek, który zabezpieczy jak najwięcej wierzchołków jeszcze niechronionych.
 - Następnie sprawdzamy, czy będą istnieć nowo-ochronieni sąsiedzi. Jeśli nie, to nie ma potrzeby ustawiać temu wierzchołkowi wartości 2, ustawiamy mu wartość 1. Jeśli istnieją tacy sąsiedzi, to ustawiamy wierzchołkowi wartość 2.

3.8.2 Złożoność i wydajność

Załóżmy, że $n = |V|$ to liczba wierzchołków grafu G oraz $m = |E|$ to liczba krawędzi grafu G . Inicjacja wszystkich zmiennych wykonuje się w czasie liniowym. Iteracyjna ochrona wszystkich wierzchołków w najgorszym przypadku może wynieść $O(n)$, bo każda iteracja zabezpiecza przy najmniej jeden wierzchołek. Dodatkowo iterujemy przez niezabezpieczone jeszcze wierzchołki w maksymalnie $O(n)$ oraz ich sąsiadów, czyli w najgorszym wypadku po wszystkich krawędziach grafu - $O(m)$. Dodatkowe aktualizacje w głównej pętli wykonują się w czasie maksymalnie liniowym. Dlatego ostatecznie złożoność obliczeniowa wynosi $O(n(m+n))$. Zakładając, że dla grafów rzadkich $m = O(n)$, a dla grafów gęstych $m = O(n^2)$ to złożoność czasowa wynosi odpowiednio $O(n^2)$ oraz $O(n^3)$.

Złożoność pamięciowa obejmuje struktury danych przechowujące wierzchołki grafu wejściowego, dlatego wynosi ona $O(n)$.

Algorytm nie jest dokładny, natomiast w stosunku do innych proponowanych algorytmów, charakteryzuje się wielomianową złożonością obliczeniową.

3.8.3 Pseudokod

Algorytm zachłanny

```
1: function EXECUTE( $G$ )
2:    $f[v] \leftarrow 0$  for all  $v \in \text{nodes of } G$ 
3:    $\text{secured\_nodes} \leftarrow \emptyset$ 
4:    $\text{uncovered\_nodes} \leftarrow \text{set of all nodes in } G$ 
5:    $\text{start\_node} \leftarrow \text{node with maximum degree}$ 
6:    $f[\text{start\_node}] \leftarrow 2$ 
7:   Add  $\text{start\_node}$  to  $\text{secured\_nodes}$ 
8:   Remove  $\text{start\_node}$  from  $\text{uncovered\_nodes}$ 
9:   for all neighbors  $\text{neighbor}$  of  $\text{start\_node}$  do
10:    Add  $\text{neighbor}$  to  $\text{secured\_nodes}$ 
11:    Remove  $\text{neighbor}$  from  $\text{uncovered\_nodes}$ 
12:   end for
13:   while  $\text{uncovered\_nodes}$  is not empty do
14:      $\text{candidate\_nodes} \leftarrow \emptyset$ 
15:     for all  $v \in \text{secured\_nodes}$  do
16:       for all neighbors  $\text{neighbor}$  of  $v$  do
17:         if  $\text{neighbor} \in \text{uncovered\_nodes}$  then
18:           Add  $\text{neighbor}$  to  $\text{candidate\_nodes}$ 
19:         end if
20:       end for
21:     end for
22:     if  $\text{candidate\_nodes}$  is empty then
23:       Pick any node from  $\text{uncovered\_nodes}$ 
24:        $f[\text{node}] \leftarrow 2$ 
25:       Add  $\text{node}$  to  $\text{secured\_nodes}$ 
26:       for all neighbors  $\text{neighbor}$  of  $\text{node}$  do
27:         Add  $\text{neighbor}$  to  $\text{secured\_nodes}$ 
28:         Remove  $\text{neighbor}$  from  $\text{uncovered\_nodes}$ 
29:       end for
30:       continue
31:     end if
32:      $\text{node} \leftarrow \text{node in } \text{candidate\_nodes} \text{ covering the most uncovered neighbors}$ 
33:      $\text{new\_covered\_neighbors} \leftarrow \text{number of uncovered neighbors of } \text{node}$ 
34:     if  $\text{new\_covered\_neighbors} > 0$  then
35:        $f[\text{node}] \leftarrow 2$ 
36:     else
37:        $f[\text{node}] \leftarrow 1$ 
38:     end if
39:     Add  $\text{node}$  to  $\text{secured\_nodes}$ 
40:     Remove  $\text{node}$  from  $\text{uncovered\_nodes}$ 
41:     for all neighbors  $\text{neighbor}$  of  $\text{node}$  do
42:       Add  $\text{neighbor}$  to  $\text{secured\_nodes}$ 
43:       Remove  $\text{neighbor}$  from  $\text{uncovered\_nodes}$ 
44:     end for
45:   end while
46:    $\text{min\_roman\_domiantion\_number} \leftarrow \sum_v f[v]$ 
47:   return ( $\text{min\_roman\_domiantion\_number}, f$ )
48: end function
```

ROZDZIAŁ 4. WYNIKI

4.1 Wprowadzenie

4.2 Hiperparametry algorytmu mrówkowego

alpha	beta	evaporation_rate	liczba mrówek	średni błąd
3	20	0.5	150	7.933333
3	20	0.7	150	8.000000
1	5	0.7	150	8.000000
1	20	0.7	150	8.066667
1	20	0.5	100	8.066667

Tabela 4.1: Wpływ kombinacji hiperparametrów na błąd rozwiązania

Klasa grafów	alpha	beta	evaporation_rate	liczba mrówek	średni błąd
ErdosRenyi_dense	1	5	0.5	100	0.666667
ErdosRenyi_sparse	3	20	0.5	150	7.000000
RandomTree	3	20	0.5	150	11.733333
ScaleFree	1	5	0.7	150	11.933333

Tabela 4.2: Wpływ kombinacji hiperparametrów na błąd rozwiązania na konkretnych klasach grafów

alpha	beta	evaporation_rate	liczba mrówek
3	20	0.5	150

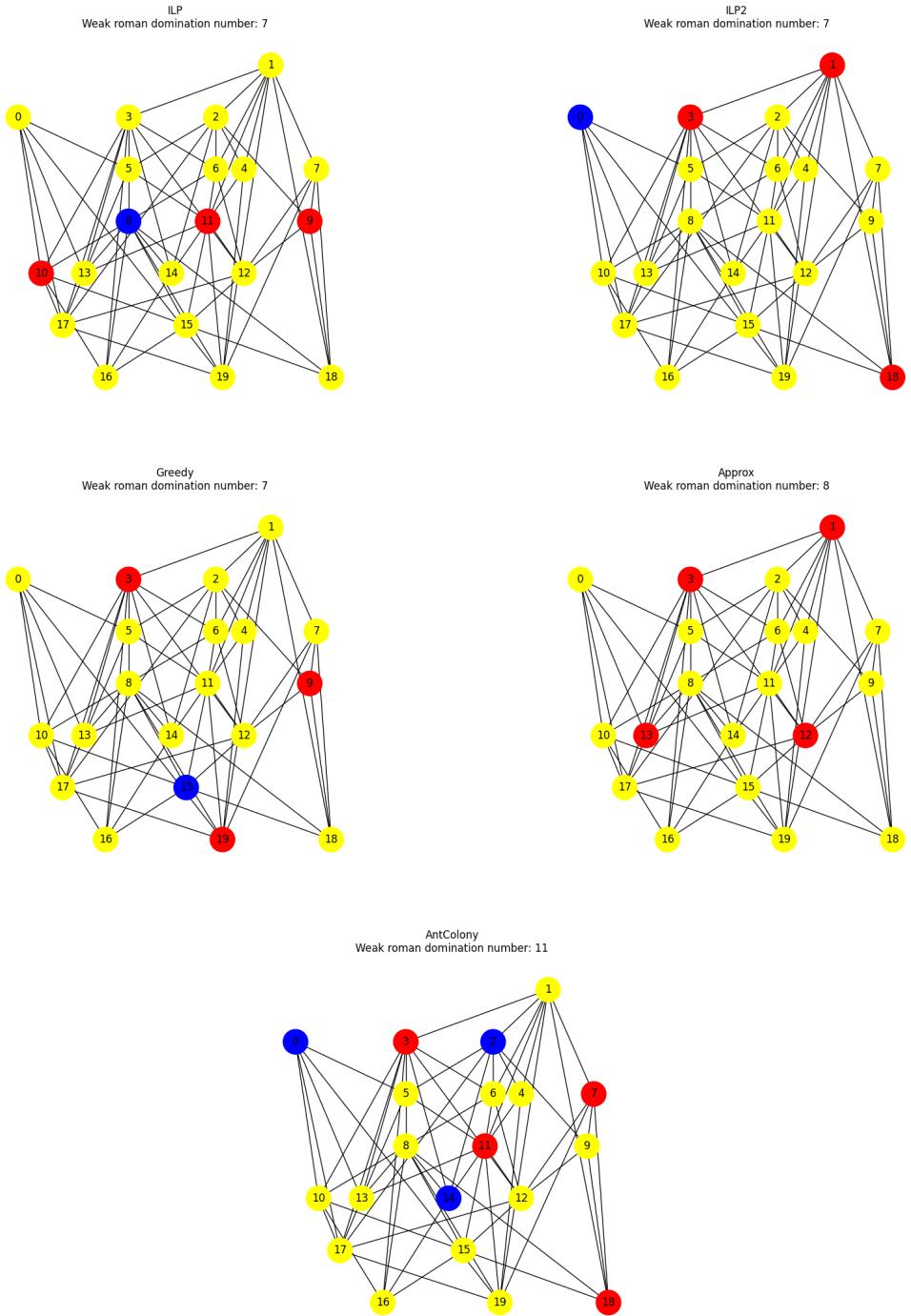
Tabela 4.3: Wybrany zestaw parametrów

4.3 Wyniki działania algorytmów

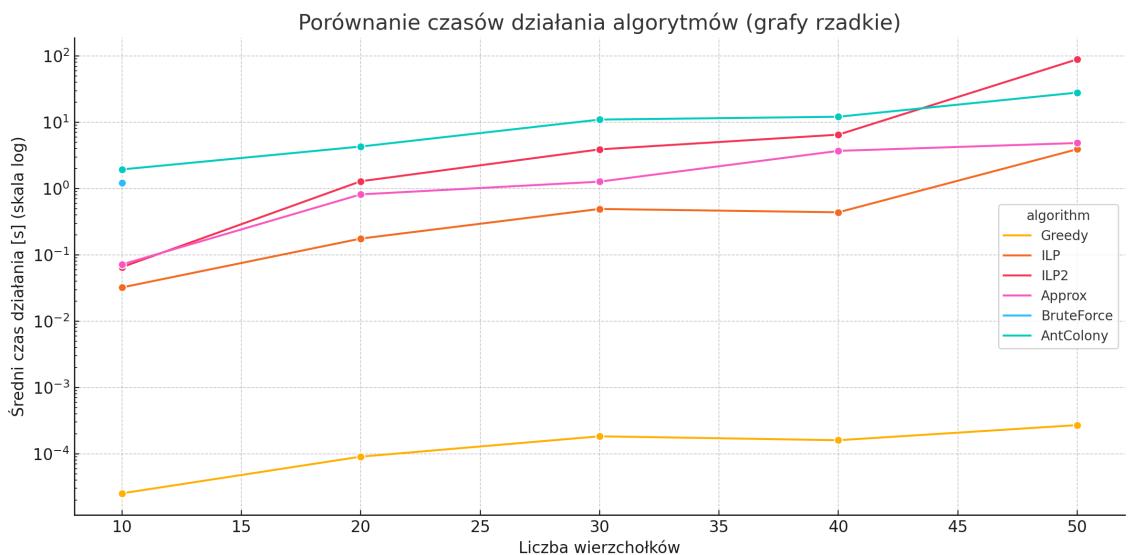
4.3.1 Grafy rzadkie

Algorytm	Liczba wierzchołków	Liczba krawędzi	WCRDF	Średni czas (s)
Greedy	10	15	5	0,0000253
	ILP	15	5	0,03225824
	ILP2	15	5	0,06530336
	Approx	15	6	0,0716367
	BruteForce	15	5	1,22720146
	AntColony	15	5	1,9432132
Greedy	20	61	7	0,00009044
	ILP	61	7	0,17597988
	Approx	61	8	0,81655686
	ILP2	61	7	1,28852564
	AntColony	61	11	4,302339
Greedy	30	122	10	0,00018332
	ILP	122	9	0,4925489
	Approx	122	10	1,27100858
	ILP2	122	9	3,89847968
	AntColony	122	19	10,9692404
Greedy	40	215	11	0,00015998
	ILP	215	8	0,4383133
	Approx	215	10	3,70053236
	ILP2	215	8	6,50026534
	AntColony	215	25	12,11287052
Greedy	50	353	10	0,00027048
	ILP	353	8	3,9218204
	Approx	353	10	4,86207684
	AntColony	353	30	28,00923878
	ILP2	353	8	88,8271173

Tabela 4.4: Wyniki dla grafów rzadkich



Rysunek 4.1: Wyniki dla przykładowego grafu rzadkiego.

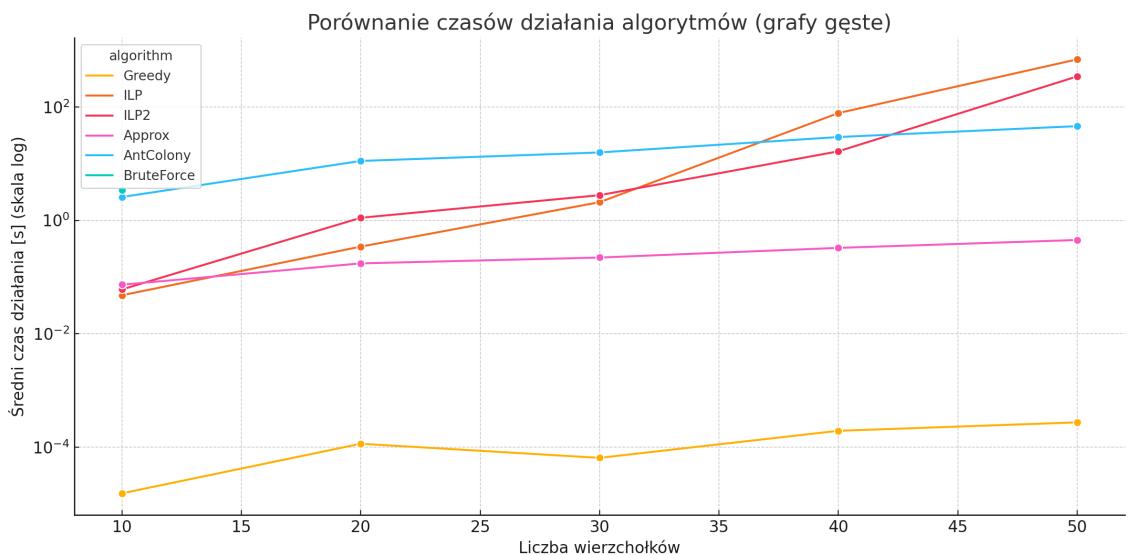


Rysunek 4.2: Porównanie średniego czasu działania algorytmów na grafach rzadkich w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.

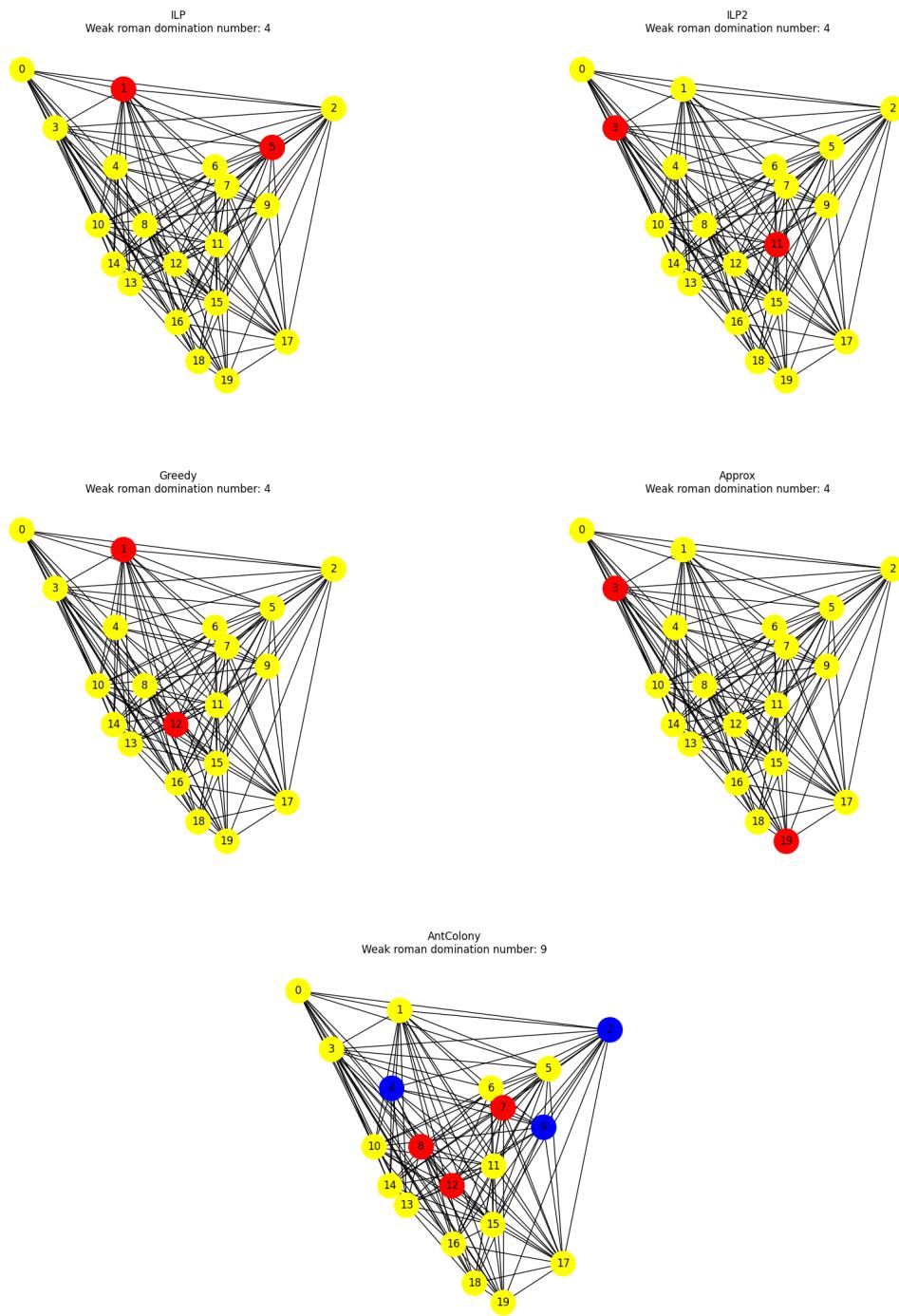
4.3.2 Grafy gęste

Algorytm	Liczba wierzchołków	Liczba krawędzi	WCRDF	Średni czas (s)
Greedy	10	31	2	0,00001534
ILP	10	31	2	0,04773922
ILP2	10	31	2	0,06054642
Approx	10	31	2	0,07325536
AntColony	10	31	2	2,58175592
BruteForce	10	31	2	3,39913678
Greedy	20	132	4	0,00011488
Approx	20	132	4	0,17418222
ILP	20	132	4	0,34445046
ILP2	20	132	4	1,10987306
AntColony	20	132	9	11,15454742
Greedy	30	288	4	0,00006476
Approx	30	288	4	0,22087496
ILP	30	288	4	2,09136932
ILP2	30	288	4	2,7780365
AntColony	30	288	14	15,7567997
Greedy	40	522	5	0,0001943
Approx	40	522	4	0,32690006
ILP2	40	522	4	16,49655814
AntColony	40	522	21	29,47564454
ILP	40	522	4	77,93719362
Greedy	50	839	5	0,00027366
Approx	50	839	4	0,45039484
AntColony	50	839	28	45,90004724
ILP2	50	839	4	345,33312052
ILP	50	839	4	690,41462788

Tabela 4.5: Wyniki dla grafów gęstych



Rysunek 4.3: Porównanie średniego czasu działania algorytmów na grafach gęstych w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.

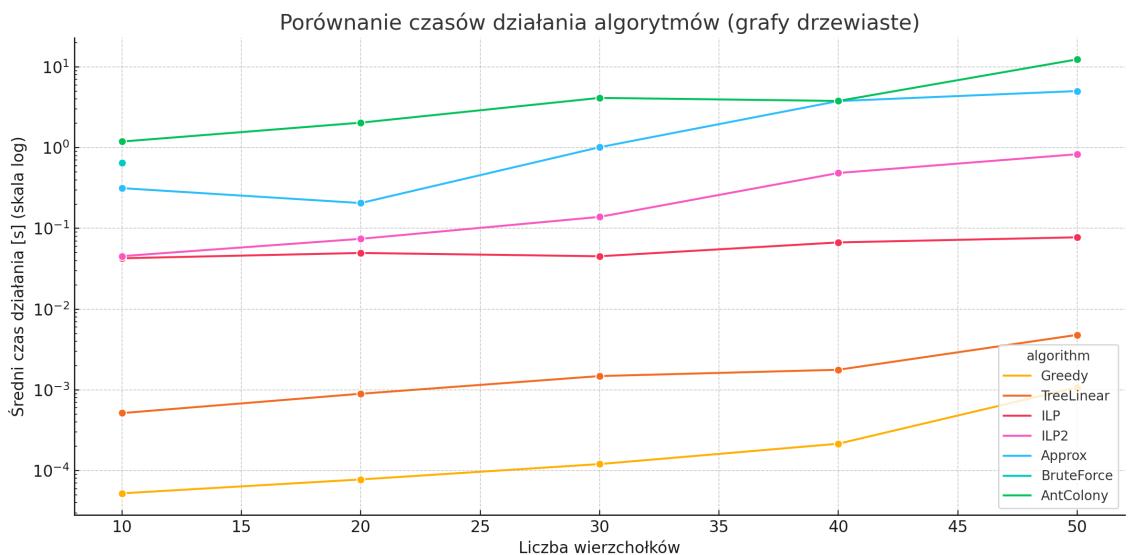


Rysunek 4.4: Wyniki dla przykładowego grafu gęstego.

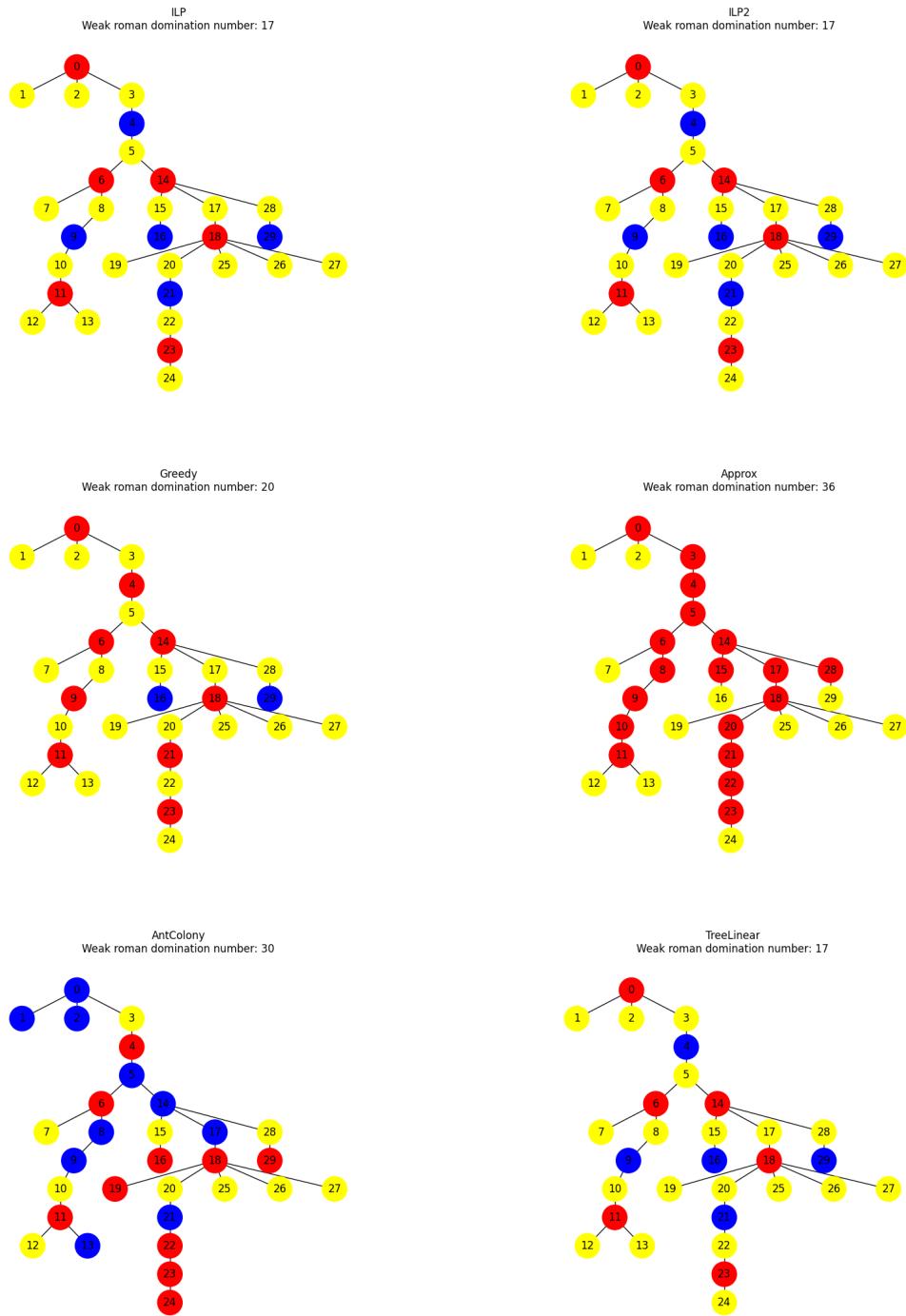
4.3.3 Drzewa

Algorytm	Liczba wierzchołków	Liczba krawędzi	WCRDF	Średni czas (s)
Greedy	10	9	8	0,00005232
TreeLinear	10	9	7	0,00051616
ILP	10	9	7	0,04267752
ILP2	10	9	7	0,04535534
Approx	10	9	14	0,3153601
BruteForce	10	9	7	0,65010432
AntColony	10	9	8	1,19096304
Greedy	20	19	12	0,00007772
TreeLinear	20	19	12	0,00089554
ILP	20	19	12	0,04966132
ILP2	20	19	12	0,07429058
Approx	20	19	16	0,20606074
AntColony	20	19	18	2,04032124
Greedy	30	29	20	0,0001205
TreeLinear	30	29	17	0,00148292
ILP	30	29	17	0,04517938
ILP2	30	29	17	0,13887008
Approx	30	29	36	1,0127093
AntColony	30	29	30	4,13727904
Greedy	40	39	33	0,00021536
TreeLinear	40	39	29	0,0017755
ILP	40	39	29	0,06708872
ILP2	40	39	29	0,48569172
Approx	40	39	48	3,7790714
AntColony	40	39	43	3,79114808
Greedy	50	49	45	0,00107456
TreeLinear	50	49	35	0,00480282
ILP	50	49	35	0,07759686
ILP2	50	49	35	0,82981668
Approx	50	49	66	5,0276923
AntColony	50	49	59	12,4118761

Tabela 4.6: Wyniki dla drzew



Rysunek 4.5: Porównanie średniego czasu działania algorytmów na drzewach w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.

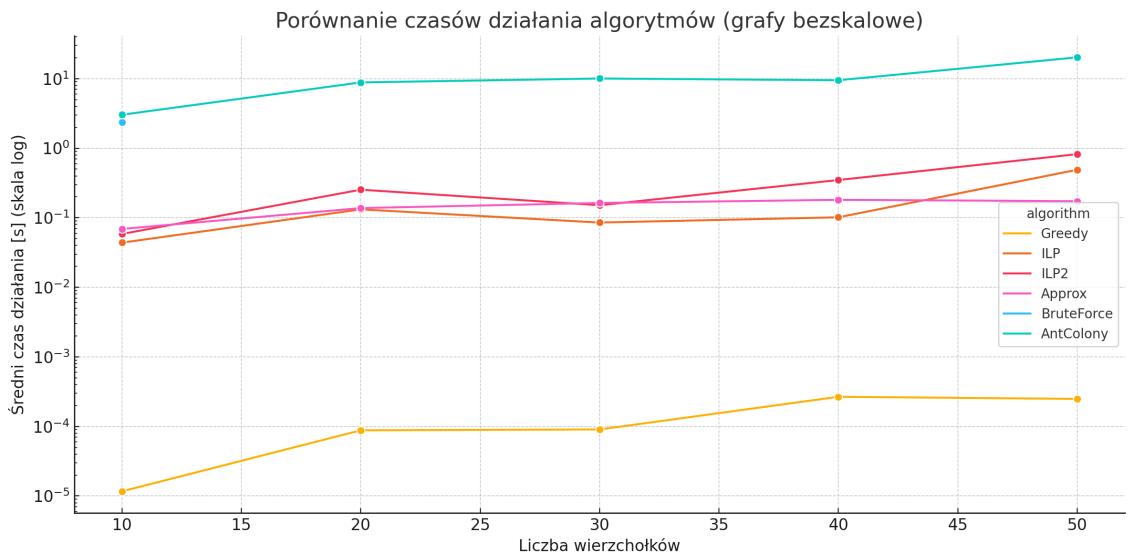


Rysunek 4.6: Wyniki dla przykładowego drzewa.

4.3.4 Grafy bezskalowe

Algorytm	Liczba wierzchołków	Liczba krawędzi	WCRDF	Średni czas (s)
Greedy	10	25	2	0,00001166
	10	25	2	0,04384846
	10	25	2	0,05840188
	10	25	2	0,06902438
	10	25	2	2,3746041
	10	25	3	3,02645522
ILP	20	75	5	0,00008788
	20	75	4	0,1319412
	20	75	4	0,13767914
	20	75	4	0,25321824
	20	75	9	8,82321618
ILP2	30	125	9	0,00009044
	30	125	6	0,08527778
	30	125	6	0,15141182
	30	125	6	0,16305526
	30	125	18	10,0423744
Approx	40	175	10	0,00026662
	40	175	7	0,1015079
	40	175	8	0,18101464
	40	175	7	0,3487031
	40	175	24	9,48435894
AntColony	50	225	14	0,00024856
	50	225	10	0,17308662
	50	225	10	0,48920074
	50	225	10	0,82045656
	50	225	35	20,21980648

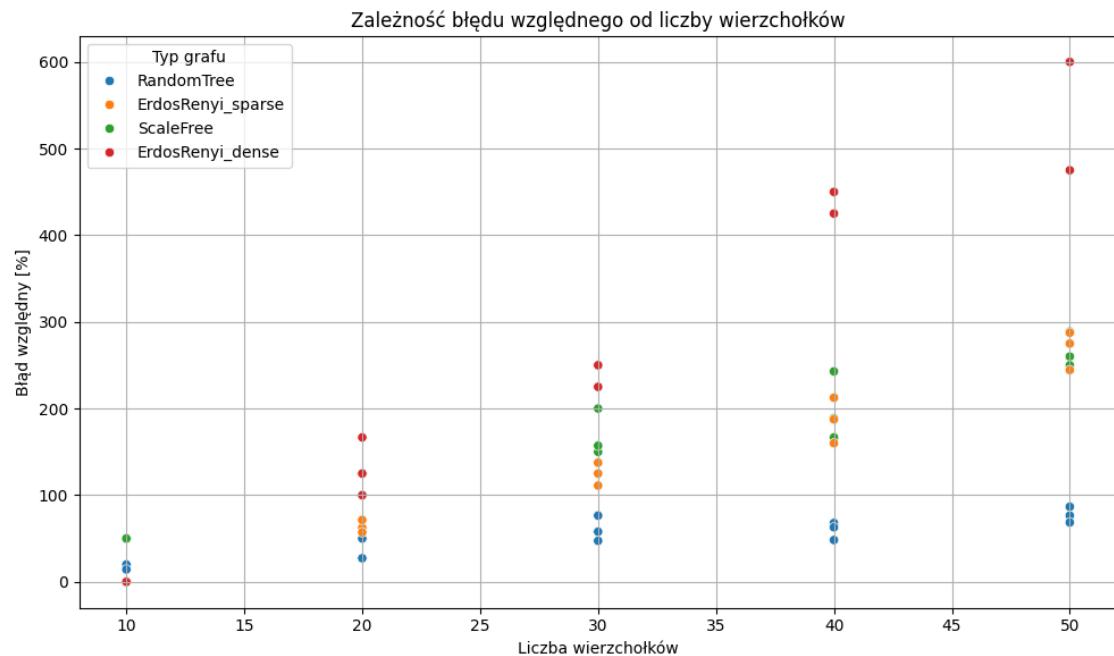
Tabela 4.7: Wyniki dla grafów bezskalowych



Rysunek 4.7: Porównanie średniego czasu działania algorytmów na grafach bezskalowych w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.

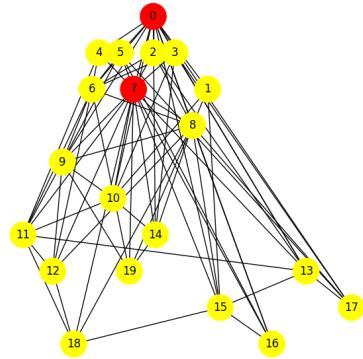
4.4 Wyniki algorytmów przybliżonych

4.4.1 Algorytm mrówkowy

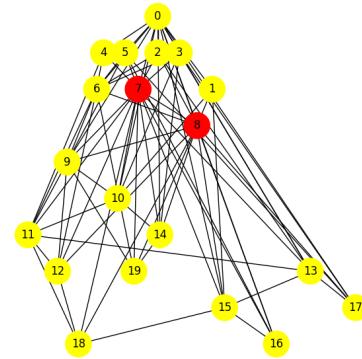


Rysunek 4.9: Zależność błędu względnego algorytmu mrówkowego od liczby wierzchołków.

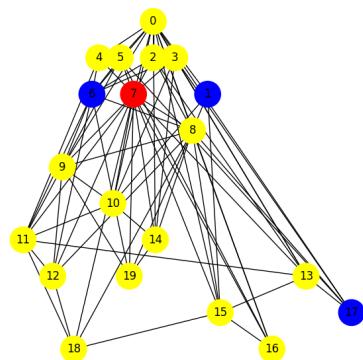
ILP
Weak roman domination number: 4



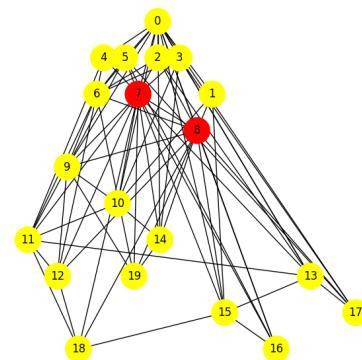
ILP2
Weak roman domination number: 4



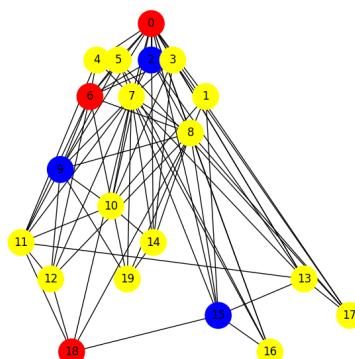
Greedy
Weak roman domination number: 5



Approx
Weak roman domination number: 4

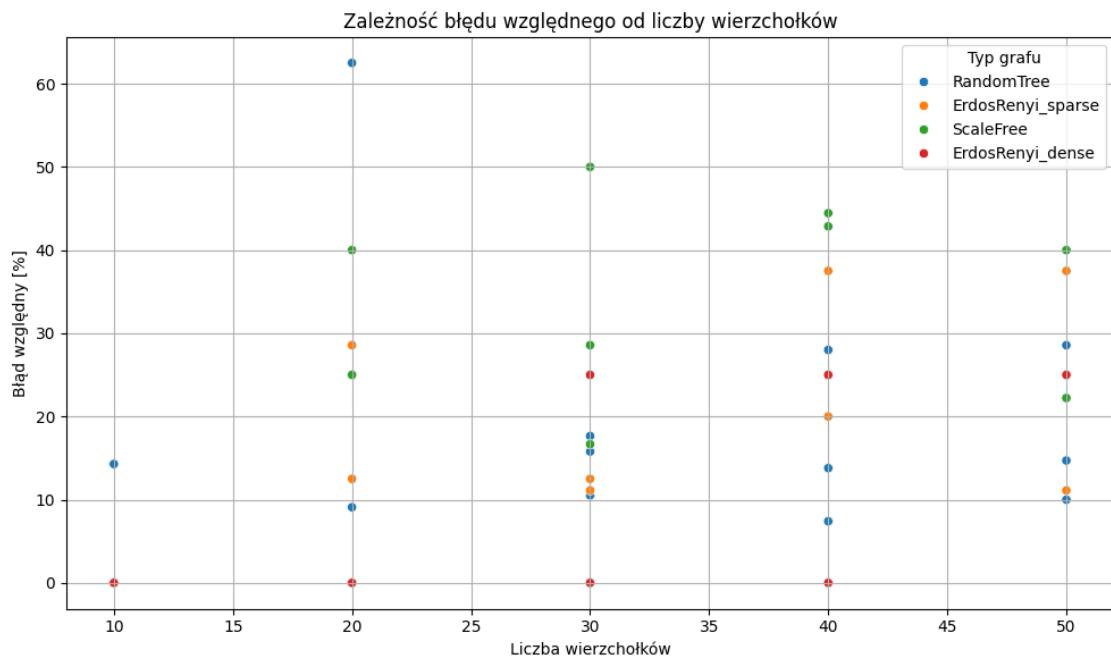


AntColony
Weak roman domination number: 9



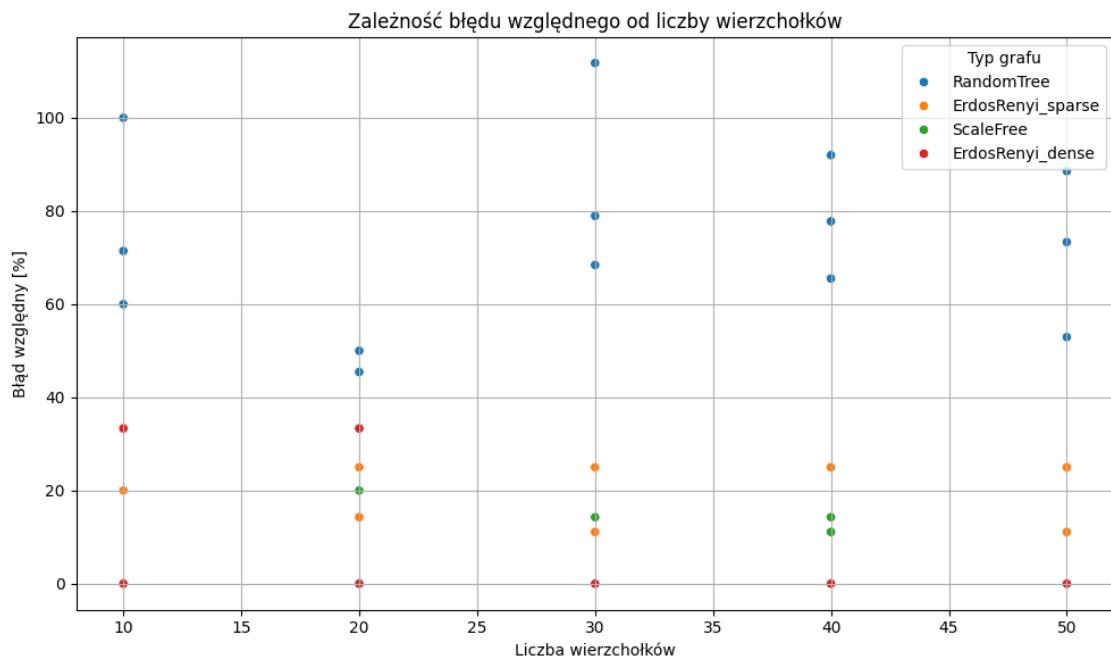
Rysunek 4.8: Wyniki dla przykładowego grafu bezskalowego.

4.4.2 Algorytm zachłanny

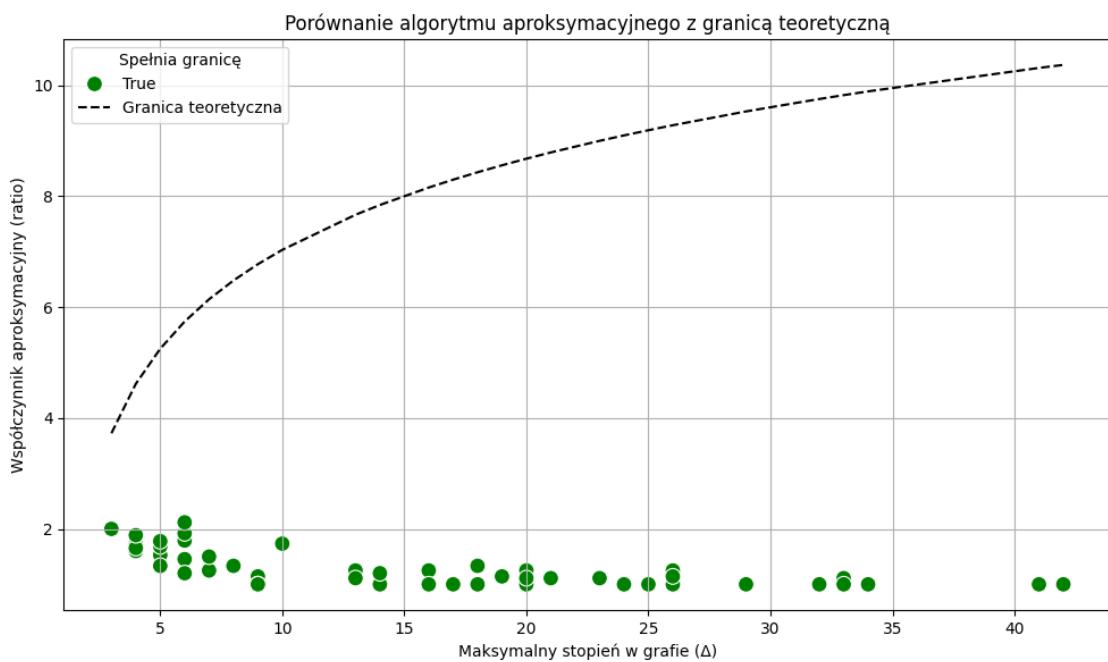


Rysunek 4.10: Zależność błędu względnego algorytmu zachłannego od liczby wierzchołków.

4.4.3 Algorytm aproksymacyjny

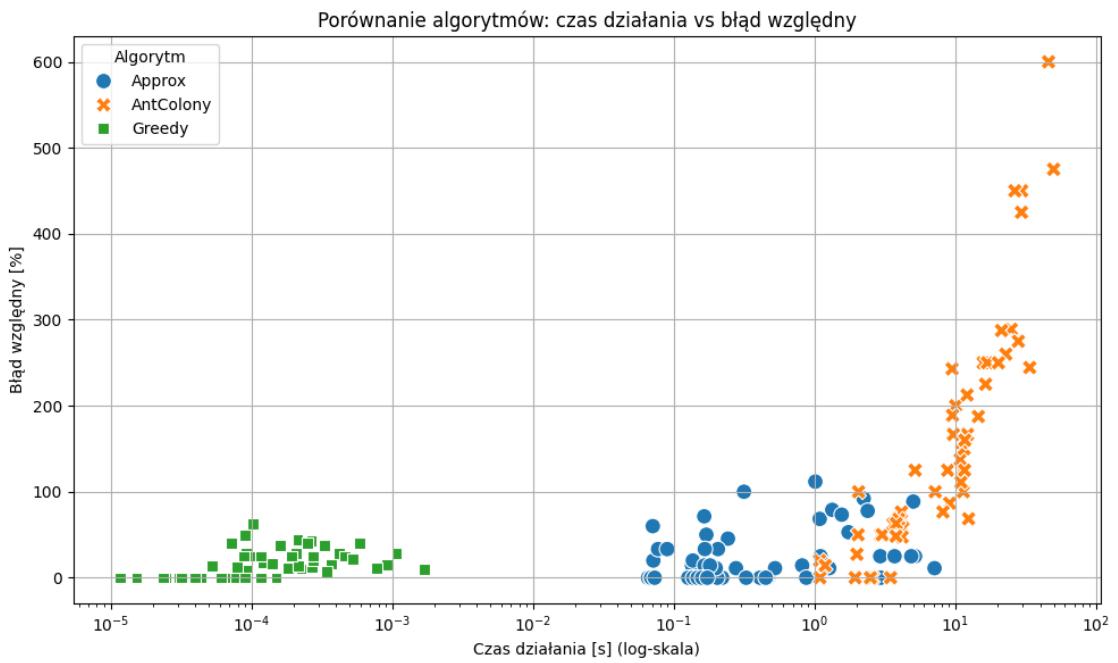


Rysunek 4.11: Zależność błędu względnego algorytmu aproksymacyjnego od liczby wierzchołków.



Rysunek 4.12: Porównanie algorytmu aproksymacyjnego z granicą teoretyczną $2(1+\epsilon)(1+\ln(\Delta-1))$.

4.4.4 Porównanie algorytmów przybliżonych

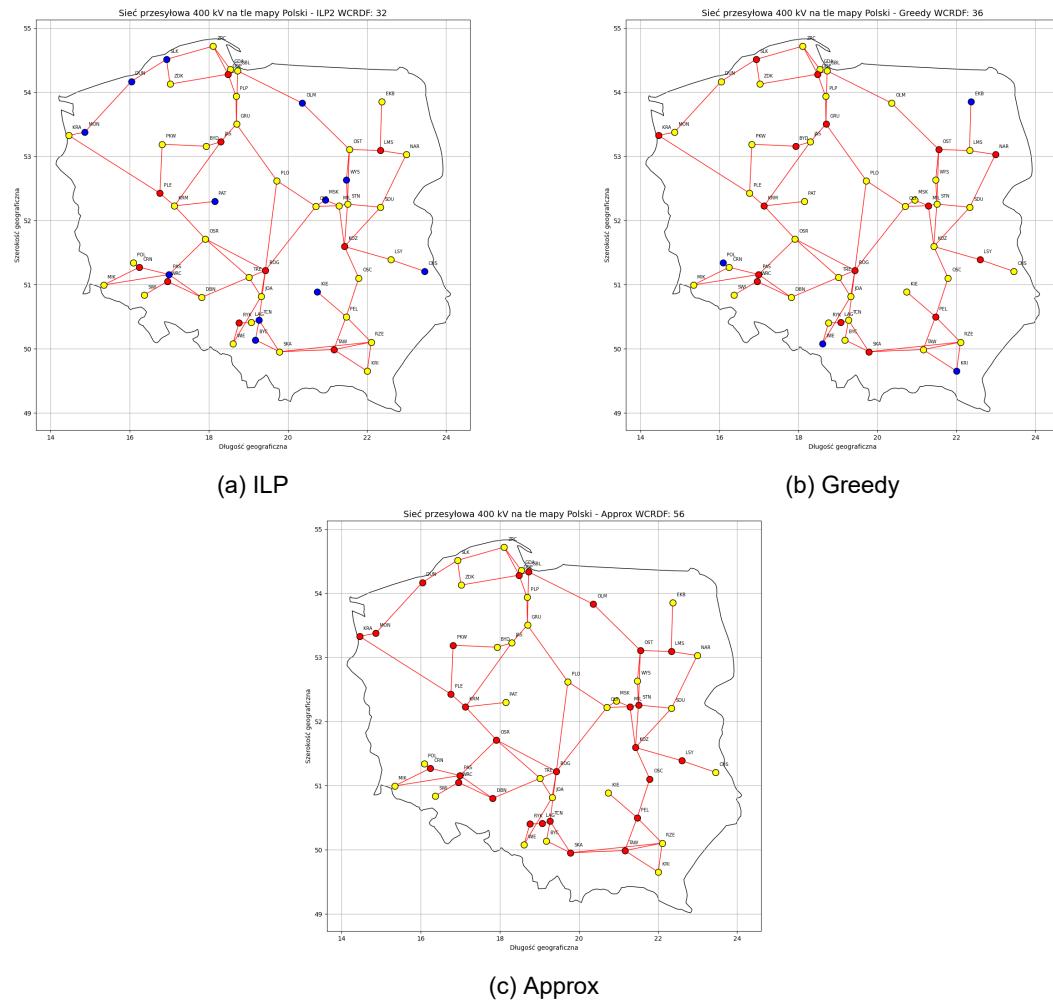


Rysunek 4.13: Algorytmy przybliżone: czas działania w stosunku do błędu względnego.

ROZDZIAŁ 5. ZASTOSOWANIA PRAKTYCZNE

5.1 Wprowadzenie

5.2 Rozmieszczenie zabezpieczeń sieci energetycznych



Rysunek 5.1: Efekt działania algorytmów ILP, Greedy i Approx dla problemu rozmieszczenia zabezpieczeń sieci energetycznych.

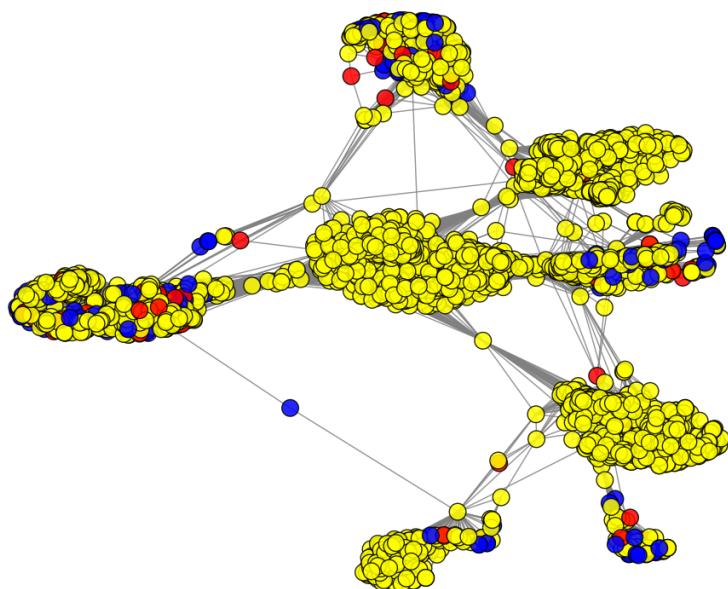
Algorytm	WCRDF	Czas działania [s]
ILP2	32	2,7014378
Greedy	36	0,0003222
Approx	56	647,6564676

Tabela 5.1: Wynik działania wybranych algorytmów dla problemu rozmieszczenia zabezpieczeń sieci energetycznych.

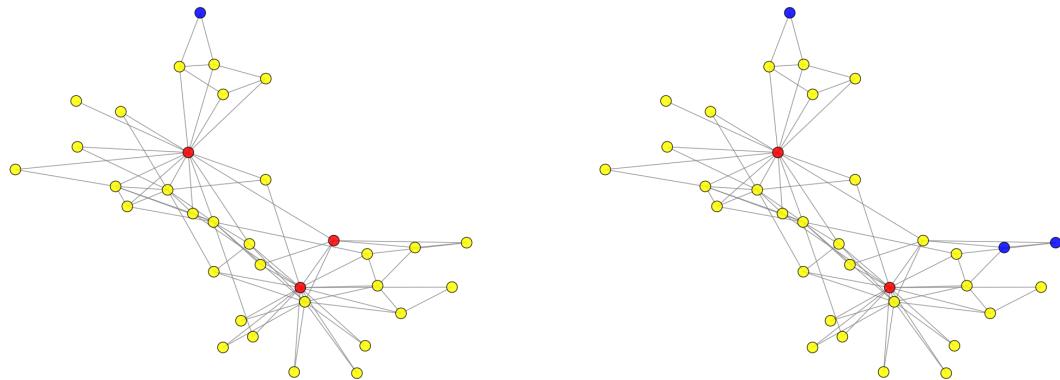
5.3 Rozmieszczenie agentów wykrywających oszustwa w internetowej sieci społecznościowej

Algorytm	WCRDF	Czas działania [s]
ILP2	7	0,0865662
ILP	7	0,0624058
Greedy	7	0,0001245
Approx	8	0,1533187
AntColony	21	5,1319121

Tabela 5.2: Wynik działania wybranych algorytmów dla problemu rozmieszczenia agentów w małej sieci społecznościowej.

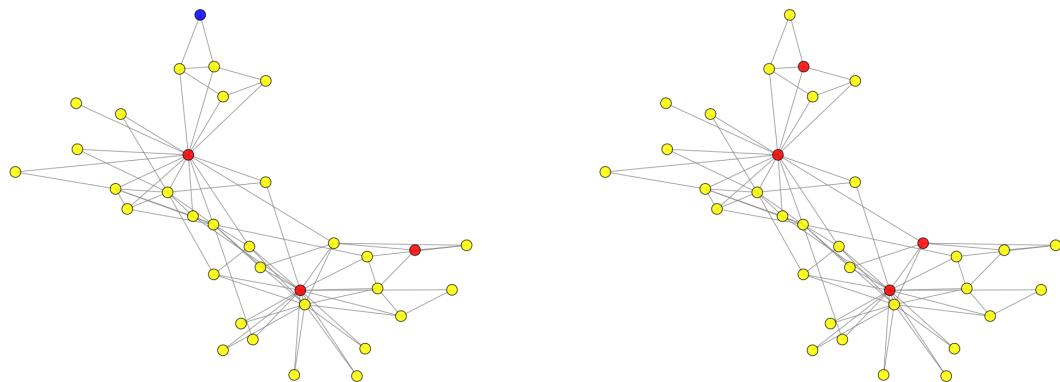


Rysunek 5.3: Efekt działania algorytmu zachłannego dla problemu rozmieszczenia agentów w dużej, rzeczywistej sieci społecznościowej. WCRDF: 411, czas działania 2,9348995 s.



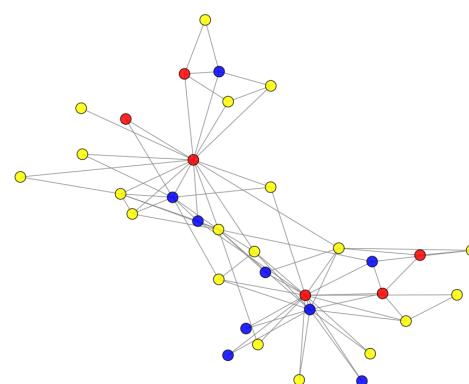
(a) ILP, WCRDF: 7

(b) ILP2, WCRDF: 7



(c) Greedy WCRDF: 7

(d) Approx WCRDF: 8



(e) AntColony WCRDF: 21

Rysunek 5.2: Efekt działania algorytmów ILP, Greedy i Approx dla problemu rozmieszczenia agentów w małej, rzeczywistej sieci społecznościowej.

ROZDZIAŁ 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

6.1 *Podsumowanie wyników*

Przedstawienie kluczowych wyników pracy oraz ich znaczenia w kontekście postawionego celu badawczego.

6.2 *Wnioski i dalsze kierunki badań*

Na podstawie wyników pracy sformułowano następujące wnioski:

- Wniosek 1: [Opis pierwszego wniosku].
- Wniosek 2: [Opis drugiego wniosku].

Dalsze badania mogłyby obejmować:

- Rozszerzenie algorytmu na inne typy danych.
- Testy w środowisku rzeczywistym.

WYKAZ LITERATURY

1. STEWART, I. Defend the Roman Empire!, w: USA: Scientific, 1999, s. 136–139. Dostęp: 03.03.2025.
2. DR INŻ. JOANNA RACZEK, DR JOANNA CYMAN. *Weakly connected Roman domination in graphs*. Dostępne także z: https://mostwiedzy.pl/en/publication/weakly-connected-roman-domination-in-graphs_150016-1. Dostęp: 03.03.2025.
3. *Exact cover by 3-sets*. Dostępne także z: https://en.wikipedia.org/wiki/Exact_cover. Dostęp: 11.05.2025.
4. ERNIE J COCKAYNE, PAULA DREYER JR., SANDRA M HEDETNIEMI, STEPHEN T HEDETNIEMI. *Roman domination in graphs*. 2004. Dostępne także z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012365X03004473>. Dostęp: 11.05.2025.
5. MICHAELA. HENNING, STEPHEN T. HEDETNIEMI. *Defending the Roman Empire—A new strategy*. 2003. Dostępne także z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012365X02008117>. Dostęp: 11.05.2025.
6. JOANNA RACZEK, RITA ZUAZUA. *Progress on Roman and Weakly Connected Roman Graphs*. 2021. Dostępne także z: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/16/1846>. Dostęp: 11.05.2025.
7. PADAMUTHAM CHAKRADHAR, PALAGIRI VENKATA SUBBA REDDY, IKHANDELWAL HIMANSHU. *Algorithmic complexity of weakly connected Roman domination in graphs*. 2021. Dostępne także z: <https://www.worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/S1793830921501251>. Dostęp: 15.03.2025.
8. DANGDANG NIU, XIAOLIN NIE, LILIN ZHANG, HONGMING ZHANG, MINGHAO YIN. *A greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) for minimum weakly connected dominating set problem*. 2023. Dostępne także z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422023569>. Dostęp: 11.05.2025.
9. MARIJA IVANOVIĆ. *Improved integer linear programming formulation for weak Roman domination problem*. 2017. Dostępne także z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-017-2706-4>. Dostęp: 15.03.2025.
10. *Plan istniejącej sieci przesyłowej najwyższych napięć*. 2024. Dostępne także z: <https://www.pse.pl/obszary-dzialalnosci/krajowy-system-elektroenergetyczny/plan-sieci-elektroenergetycznej-najwyzszych-napiec/istniejaca>. Dostęp: 11.05.2025.

SPIS RYSUNKÓW

2.1 Przykład grafu rzymskiego słabo spójnego.	9
3.1 Graf G - przykładowe drzewo	17
3.2 Graf G - po fazie 1	19
3.3 Graf G - po fazie 2 - finalna wersja	20
4.1 Wyniki dla przykładowego grafu rzadkiego.	38
4.2 Porównanie średniego czasu działania algorytmów na grafach rzadkich w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.	39
4.3 Porównanie średniego czasu działania algorytmów na grafach gęstych w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.	41
4.4 Wyniki dla przykładowego grafu gęsteego.	42
4.5 Porównanie średniego czasu działania algorytmów na drzewach w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.	44
4.6 Wyniki dla przykładowego drzewa.	45
4.7 Porównanie średniego czasu działania algorytmów na grafach bezskalowych w stosunku do liczby wierzchołków w grafie.	47
4.9 Zależność błędu względnego algorytmu mrówkowego od liczby wierzchołków. . . .	47
4.8 Wyniki dla przykładowego grafu bezskalowego.	48
4.10 Zależność błędu względnego algorytmu zachłanego od liczby wierzchołków. . . .	49
4.11 Zależność błędu względnego algorytmu aproksymacyjnego od liczby wierzchołków. . . .	49
4.12 Porównanie algorytmu aproksymacyjnego z granicą teoretyczną $2(1+\epsilon)(1+\ln(\Delta-1))$	50
4.13 Algorytmy przybliżone: czas działania w stosunku do błędu względnego.	50
5.1 Efekt działania algorytmów ILP, Greedy i Approx dla problemu rozmieszczenia za-bezpieczeń sieci energetycznych.	51
5.3 Efekt działania algorytmu zachłanego dla problemu rozmieszczenia agentów w dużej, rzeczywistej sieci społecznościowej. WCRDF: 411, czas działania 2,9348995 s.	52
5.2 Efekt działania algorytmów ILP, Greedy i Approx dla problemu rozmieszczenia agen-tów w małej, rzeczywistej sieci społecznościowej.	53

SPIS TABEL

4.1	Wpływ kombinacji hiperparametrów na błąd rozwiązania	36
4.2	Wpływ kombinacji hiperparametrów na błąd rozwiązania na konkretnych klasach grafów	36
4.3	Wybrany zestaw parametrów	36
4.4	Wyniki dla grafów rzadkich	37
4.5	Wyniki dla grafów gęstych	40
4.6	Wyniki dla drzew	43
4.7	Wyniki dla grafów bezskalowych	46
5.1	Wynik działania wybranych algorytmów dla problemu rozmieszczenia zabezpieczeń sieci energetycznych.	51
5.2	Wynik działania wybranych algorytmów dla problemu rozmieszczenia agentów w małej sieci społecznościowej.	52