

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ**

Стефка Стоянова Фиданова

**МЕТОД НА МРАВКИТЕ
ЗА РЕШАВАНЕ НА
КОМБИНАТОРНИ ОПТИМИЗАЦИОННИ
ЗАДАЧИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация
за придобиване на научна степен "доктор на науките"
в професионално направление 4.6
"Информатика и компютърни науки"

София, 2023

Дисертационният труд е обсъден на заседание на секция „Паралелни Алгоритми“ на Института по Информационни и Комуникационни Технологии при БАН на 07.03.2023 г. и е насочен за защита в научна област: 4. Природни науки, математика и информатика, Професионално направление: 4.6. Информатика и компютърни науки.

Данни за дисертационния труд

- Брой страници: 189
- Брой на използваните източници: 127
- Брой на използваните публикации на автора по темата на дисертацията: 19

Състав на научното жури:

- акад. Иван Попчев
- акад. Красимир Атанасов
- проф. Таня Пенчева
- проф. Мария Нишева
- член. кор. Любка Дуковска
- проф. Иван Димов
- проф. Петя Копринкова

Съдържание

1	Увод	3
2	Метод на мравките	5
3	Метод на мравките за задачата за раницата	7
4	Инспектиране на GPS мрежа	11
5	Построяване на безжична сензорна мрежа	12
6	Наемане на работна сила	14
7	Моделиране на пътничкопоток	16
8	Заклучение	17

1 Увод

Актуалност и мотивировка на темата

Оптимизацията е ключова тема в информатиката, изкуствения интелект, изследването на операциите и свързаните с тях области. Целта на комбинаторната оптимизация е да намери оптимален обект по някакъв критерий, от крайно множество от обекти. Тя се отнася за тези оптимизационни задачи, за които множеството от валидни решения е дискретно или може да бъде редуцирано до дискретно и целта е да бъде намерено възможно най-доброто решение. Примери за комбинаторни оптимизационни задачи са задачата за търговския пътник [114], маршрутизация на превозни средства [125], минимално обхващащо дърво [104], удовлетворяване на ограничения [86], задачата за раницата [29] и други. Това са NP (неполиномиални) задачи и за да бъдат намерени решения близки до оптималните, обикновено се използват метаевристични методи. Един от тях е методът на мравките [25]. Той е много подходящ за решаване на дискретни задачи със строги ограничения, защото е конструктивен метод.

Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационния труд е разработването на алгоритми, на основата на метода на мравките, за решаването на задачи от реалния живот и индустрията.

За постигането на тази цел са формулирани следните пет задачи:

- Разработване на алгоритъм за решаване на задачата за раницата;
- Разработване на алгоритъм за инспектиране на GPS мрежа;
- Разработване на алгоритъм за построяване на безжична сензорна мрежа по два критерия, минимален брой сензори и минимална използвана енергия;
- Разработване на алгоритъм за наемане на работна сила;
- Разработване на алгоритъм за моделиране на пътничкопоток по два критерия, време за придвижване и цена за придвижване.

Методика на изследването

Един от най-успешните метаевристични методи за решаване на комбинаторни оптимизационни задачи е методът на мравките. Идеята за него идва от поведението на мравките в природата. Когато търсят храна, мравките в природата маркират своя път оставяйки химическа субстанция наречена феромон. Ако е изолирана, една мравка се движи основно по случаен начин. Ако има предварително поставен феромон, мравката го регистрира и решава да го следва с голяма вероятност и по този начин го засилва с ново количество феромон. Повтарянето на горния механизъм от мравките в природата води до това, че ако по една следа са преминали повече мравки, толкова по-желана става тя за следващите мравки. От друга страна, феромонът на слабо използваните пътища постепенно намалява заради изпарение. Така природата предпазва мравките да следват стари и неизгодни следи.

Представяне на резултатите

В съответствие с поставените задачи са разработени алгоритми, решаващи конкретни класове проблеми. Направена е програмна реализация на всеки от разработените алгоритми. Програмите са написани на езика C. Направено е изследване за стойностите на управляващите параметри.

Публикации

Авторът на дисертацията има над 200 публикации, като повечето са в областта на комбинаторната оптимизация и прилагането на стохастични методи. Резултатите от дисертацията са публикувани в 19 публикации съдържащи: 1 монография издадена в престижното научно издателство Springer, 1 с импакт фактор в списание в топ 10% на Q1, 11 с импакт ранг, 5 реферирани в световната система за реферирание и индексирание и една публикувана в международно списание. Всички публикации са след 2016, когато дисертантката е придобила званието професор, и не са участвали в предходни процедури.

Цитирания

Авторът на дисертацията има над 1250 цитирания. Публикациите, на основата на които е написана тази дисертация, са цитирани 51 пъти. Използваните публикации и цитирания са след придобиване на предходни степени и звания и не са използвани в други процедури. Индексът на Хирш на автора, спрямо известните ѝ цитирания, е $h=18$.

2 Метод на мравките

Мравките, имайки ограничени индивидуални възможности, работейки като колектив са в състояние да намерят най-краткия път между своето гнездо и източника на храна. Това се нарича групова интелигентност. Те действат по следния начин:

- Първата мравка намира източника на храна, по някакъв начин, след което се връща в гнездото, оставяйки по пътя следа от феромон;
- Мравките следват възможните пътища следейки концентрацията на феромон и така правят по-късите пътища по-привлекателни.;
- Мравките предпочитат по-късите пътища, по този начин голяма част от по-дългите пътища губят от своя феромон.

Пръв Marco Dorigo прилага идеи от поведението на мравки за решаване на комбинаторни оптимизационни задачи [21, 25, 27]. Първият алгоритъм на мравките е въведен през 1992 от него в докторската му дисертация [24], която той защитава в Политехниката на Милано, Италия.

Методът на мравките (Ant Colony Optimization - ACO) е част от метаевристичните методи за оптимизация. Метаевристиката е процедура от високо ниво, предназначена за намиране, изграждане или избор на процедура на ниско ниво, която може да гарантира намирането на достатъчно добро решение на оптимизационната задача, особено когато информацията е непълна или компютърните ресурси са ограничени. Методът е итеративен. Накратко алгоритъмът може да бъде представен по следния начин:

- На всяка итерация, всяка мравка започва да строи своето решение от случаен връх в графа. Случайният старт е начин за разнообразяване на търсенето в множеството от решения;
- Мравката избира следващият връх, който да включи в решението с помощта на функция, наречена вероятност на прехода. Тази функция е произведение от количеството феромон съответстващо на прехода (на дъгата свързваща двата върха или на избрания връх), и евристична информация;

- Мравката спира да прибавя нови върхове когато вероятността за добавяне на нов връх стане 0;
- Накрая на всяка итерация феромонът се обновява;
- Алгоритъмът спира когато е достигнато условието за край.

Мравката се придвижва от връх i до връх j от графа на задачата с вероятност:

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{\text{all possible } k} \tau_{ik}^{\alpha} \eta_{ik}^{\beta}} \quad (1)$$

Където:

- τ_{ij} е количеството феромон съответстващо на прехода от връх i до връх j ;
- α е параметър, контролиращ влиянието на τ_{ij} ;
- η_{ij} е евристичната информация;
- β е параметър, контролиращ влиянието на η_{ij}

Преди първата итерация се поставя начален феромон τ_0 , който има малка положителна стойност. Правилото за обмяна на феромона е следното:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}, \quad (2)$$

Където τ_{ij} е количеството феромон, съответстващо на прехода от връх i до връх j , ρ е скоростта на изпарение на феромона.

3 Метод на мравките за задачата за раницата

Резултатите от тази глава са публикувани в следните статии [45, 48, 51, 56, 61, 62].

Многомерната задача за раницата (МКР) е сложна комбинаторна оптимизационна задача с широко приложение. Задачи от различни области

на индустрията могат да бъдат представени като МКР включително финансово и друг вид управление.

За задачата за раницата можем да си мислим като задача за разпределение на ресурси. Има m ресурса (раници) и n обекта, като обект j носи печалба p_j . Всеки ресурс има свой собствен бюджет c_i (обем на раницата) и обект j консумира количество r_{ij} от ресурс i . Ние се интересуваме от максимизирането на общата печалба и в същото време да останем в рамките на ограничения бюджет. МКР може да се формализира по следния начин:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j=1}^n p_j x_j \\ & \text{subject to } \sum_{j=1}^n r_{ij} x_j \leq c_i \quad i = 1, \dots, m \\ & x_j \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \tag{3}$$

x_j е 1 ако обект j е избран и 0 в другия случай. Нека $I = \{1, \dots, m\}$ и $J = \{1, \dots, n\}$, като $c_i \geq 0$ за всяко $i \in I$. Добре дефинираната МКР предполага, че $p_j > 0$ и $r_{ij} \leq c_i \leq \sum_{j=1}^n r_{ij}$ за всички $i \in I$ и $j \in J$. Отбелязваме, че матрицата $[r_{ij}]_{m \times n}$ и векторът $[c_i]_m$ са не отрицателни.

3.1 АСО алгоритъм за МКР

Определяме графа съответстващ на МКР по следния начин: върховете съответстват на обектите и всеки два върха са свързани с ребра. Пълното свързване на графа означава, че след обект i обект j може да бъде избран ако има достатъчно ресурс и ако обект j все още не е избран. Алгоритъмът е итеративен. На всяка итерация всяка мравка конструира решение. Началният обект (върх в графа) се избира по случаен начин. След това се добавят нови обекти без да се нарушават ограниченията на ресурса. След като всички мравки построят своите решения, стойностите на феромона се обновяват.

Използване на интуиционистки размит феромон

В тази секция ще приложим интуиционистка размитост към обновяването на феромона. В началото се поставя еднакъв феромон на всичките ребра, който има малка положителна стойност τ_0 , $\tau_0 \in (0, 1)$. На

края на всяка итерация феромонът се обновява съобразно построените, от мравките, решения. Нека ρ е скоростта на изпарение. Правилото за обновяване на феромона е:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}. \quad (4)$$

В повечето приложения на АСО към МКР, $\Delta\tau_{ij} = \rho F$, където F е стойността на целевата функция за съответното решение [32].

В традиционния метод на мравките, параметърът на изпарение ρ е входен параметър и остава непроменен до края на изпълнението на алгоритъма. В [61] е предложено използването на *интуиционистки размит феромон*. В случая на интуиционистки размит феромон сме предложили следната формула за обновяване на феромона [61]:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \alpha F, \quad (5)$$

където $(1 - \rho) + \alpha \leq 1$, $\alpha \in (0, 1)$.

В случая на интуиционистки размит феромон генерираме параметъра ρ като случайно число в интервала $(0, 1)$; след това параметърът α се генерира като случайно число в интервала $(0, \rho)$. Предложили сме два варианта на прилагането на интуиционистки размито обновяване на феромона. В първия вариант, параметрите ρ и α се генерират в началото на изпълнението на алгоритъма още преди първата итерация. Така те остават непроменени до края на изпълнението на алгоритъма, но са различни за различните изпълнения на алгоритъма. Във втория вариант, параметрите ρ и α се генерират в началото на всяка итерация. Така техните стойности са различни за всяка итерация на едно изпълнение на алгоритъма.

Двата предложени варианта за обновяване на феромона са тествани върху 10 МКР тестови примера от Operational Research Library “OR-Library”, <http://people.brunel.ac.uk/mastjjb/jeb/orlib/mknapinfo.html> (21 Jun 2021).

Всеки тестови пример се състои от 100 обекта и 10 раници/ограничения. За всички тестове АСО алгоритъмът е с едни и същи параметри. Параметрите са фиксирани експериментално. Алгоритъмът е прилаган 30 пъти със всеки един от вариантите за всеки един от тестовите примери. Приложен е ANOVA тест за да се гарантира статистическата разлика между получените осреднени резултати. Можем да заключим, че интуиционистки размитото обновяване на феромона подобрява действието на

алгоритъма и постигнатите резултати, като увеличава разнообразието на търсене и от там вероятността за намиране на добро решение. Това разнообразяване е по-балансирано, когато пресмятането на коефициентите се извършва еднократно в началото на алгоритъма, отколкото на всяка итерация.

3.2 Хибриден АСО

Понякога използваният алгоритъм не е достатъчен за постигането на добри решения. Тогава се прави комбинация от няколко методологии, за да могат да се комбинират добрите им качества. Най-често се използва един основен метод и намерените от него решения се подобряват с прилагането на локална оптимизация (локално търсене). Решенията на МКР се представят като двоичен низ, като 1 съответства на избраните обекти, а 0 на тези, които не са избрани. В нашата процедура за локално търсене избираме по случаен начин две позиции в построеното от мравката решение. Ако една от избраните позиции има стойност 0, я заменяме с 1, а ако им стойност 1 я заменяме с 0. Проверяваме дали новополученото решение е валидно. Ако решението е валидно го сравняваме с текущото (първоначалното) решение. Ако новогенерираното решение е по-добро от текущото, то го заменяме с него. Можем да заключим, че предложената процедура за локално търсене е ефективна и ефикасна. Действието на алгоритъма е подобро без съществено увеличаване на времето за изпълнението му. Приложени са четири варианта на интеркритериален анализ за сравнение на двата алгоритъма. Изводът, че хибридният АСО алгоритъм работи по-добре се потвърждава недвусмислено от четирите различни алгоритъма за интеркритериален анализ.

3.3 Стартови стратегии

За по-добро управление на процеса на построяване на решение, сме включили полу-случаен старт на мравките. Нашата цел е да използваме опита на мравките и да направим алгоритъма по-ефективен. Разделяме множеството от върхове на графа на задачата на няколко подмножества. Въвеждаме оценка за това колко е добре и колко не е добре мравката да започне построяването на решение от връх принадлежащ на дадено множество, съобразно броя на добрите и на лошите решения стартирали от върхове, принадлежащи на съответното множество [45, 51].

Предложени са няколко стартови стратегии и комбинации от тях. За всяко множество j , $D_j(i)$ е оценката доколко е добре началният връх на решението да е от това множество, а оценката $E_j(i)$ показва доколко не е добре началният връх на решението да е от това множество, където i е номерът на текущата итерация. Определяме граница D за това дали оценката е добра и граница E под която оценката е лоша. Предложени са следните стартови стратегии [39]:

- 1) Ако $\frac{E_j(i)}{D_j(i)} > E$ тогава за текущата итерация подмножество j е забранено. Началният връх се избира по случаен начин от $\{j \mid j \text{ не е забранено}\}$;
- 2) Ако $\frac{E_j(i)}{D_j(i)} > E$ тогава до края на алгоритъма подмножество j е забранено. Началният връх се избира по случаен начин от множество $\{j \mid j \text{ не е забранено}\}$;
- 3) Ако $\frac{E_j(i)}{D_j(i)} > E$ тогава за K_1 поредни итерации подмножество j е забранено. Началният връх се избира по случаен начин от $\{j \mid j \text{ не е забранено}\}$;
- 4) Нека $r_1 \in [\frac{1}{2}, 1)$ и $r_2 \in [0, 1]$ са случайни числа. Ако $r_2 > r_1$ избираме по случаен начин връх от подмножество $\{j \mid D_j(i) > D\}$, в противен случай се избира връх от незабранено подмножество. r_1 е избрано и фиксирано в началото на алгоритъма.
- 5) Нека $r_1 \in [\frac{1}{2}, 1)$ и $r_2 \in [0, 1]$ са случайни числа. Ако $r_2 > r_1$ избираме случаен връх от подмножество $\{j \mid D_j(i) > D\}$, в противен случай се избира връх от незабранено подмножество. r_1 се избира в началото на алгоритъма и нараства с r_3 на всяка итерация.

$K_1, K_1 \in [0, \text{брой итерации}]$ е параметър.

Прилагаме интеркритериален анализ към резултатите, постигнати от АСО с прилагането на разнообразни стартови стратегии [39]. Приложен е интеркритериален анализ, който показва връзката между стратегиите. От него можем да заключим, че когато изборът е със забраняване на подмножества от върхове, алгоритъмът работи доста по-различно от варианта на случаен избор (контролиран или не).

4 Инспектиране на GPS мрежа

Глобалната система за позициониране (GPS) има нужда от периодично проследяване, състоящо се от поставяне на GPS приемници последователно на определени точки. Резултатите от тази глава са публикувани в [63]. GPS мрежата може да бъде определена като набор от станции (a_1, a_2, \dots, a_n) , които се координират чрез поставяне на приемници (X_1, X_2, \dots) върху тях, за да определят сесиите $(a_1a_2, a_1a_3, a_2a_3, \dots)$ между тях. Задачата е да се намери най-добрият ред, в който тези сесии могат да бъдат организирани, за да се даде най-добрият график. По този начин графикът може да се определи като редица от сесии, които да се спазват последователно. Решението е представено чрез линеен граф с претеглени ребра. Възлите представляват станциите, а ребрата представляват разходите за преместване. Целта на задачата е намаляване на цената на решението, която е сумата от разходите (времето) за преминаване от една точка в друга. Приложени са два варианта на АСО алгоритъма за решаване на задачата, ММАС и АС. Използваните тестовите примери варират от 100 до 443 сесии.

Направено е сравнение между двата алгоритъма. Получените резултати показват, че ММАС постига по-добри резултати от АС. Направено е и сравнение с алгоритмите използвани от други автори за решаване на тази задача [110]. Резултатите показват, че и двата предложени АСО алгоритъма превъзхождат алгоритмите на другите автори. За подобряване поведението на алгоритъма и постигнатите резултати са предложени 6 процедури за локално търсене: последователна размяна на възли; размяна на в да случайно избрани възела; изтриване на случайно ребро; изтриване на най-дългото ребро; изтриване на 2 произволни ребра; изтриване на двете най-дълги ребра. Процедурата за локално търсене е приложена само към най-доброто решение на текущата итерация. По този начин има подобряване на намерените решения, без съществено увеличаване на времето за изпълнение на алгоритъма. След направените тестове е установено, че петият вариант на процедура за локално търсене с премахване на две случайно избрани ребра дава най-добри резултати.

Предложен е и метод на мравките с промяна в средата. Добавено е допълнителна промяна в средата на мравките, чрез добавяне на допълнително разбъркване в обмяната на феромона. Показано е, че промяната в средата подобрява получените резултати.

Приложен е интеркритериален анализ към АСО алгоритъма прило-

жен за средните резултати от 5, 10, 20 и 30 пускания. Чрез интеркри- териалния анализ може да се изследва коректността на алгоритъма и сходствата в структурата на отделните GPS мрежи.

5 Построяване на безжична сензорна мрежа

Пространствено разпределени сензори, които комуникират безжично, образува безжична сензорна мрежа (WSN). Всеки сензорен възел събира данни от област около себе си, наречена област на наблюдение. Радиусът на наблюдение определя големината на областта, наблюдавана от сензора. Радиусът на комуникация определя колко далече възелът може да изпрати събраните данни. Специален, по-мошен възел, наречен високо енергиен комуникационен възел (HECN) събира данните от всички сензори и ги изпраща до централния компютър, където се обработват. Трябва да се използват възможно по-малко сензори и енергия, при условие, че наблюдаваният терен има пълно покритие. Задачата е многоцелева. Предложен е алгоритъм, на основата на метода на мравките, за решаване на задачата като многоцелева и два АСО алгоритъма за решаването ѝ като едноцелева. Резултатите от тази глава са публикувани в [50, 53, 57, 107, 63].

Един от най-важните моменти на АСО алгоритмите е изграждането на графа на задачата. Трябва да изберем кои елементи от задачата ще отговарят на възлите и значението на дъгите, къде е по-подходящо да депозираме феромона - върху възлите или върху дъгите. В нашата реализация WSN задачата е представена с два графа, което е един от приносите ни. Теренът е моделиран чрез правоъгълна решетка $G = \{g_{ij}\}_{N \times M}$, където M и N са размерите на наблюдаваната област. Чрез граф G се изчислява покритието на областта. Използваме друг граф $G1_{N1 \times M1}$, във върховете на който поставяме сензорите, $N1 \leq N$ и $M1 \leq M$. Параметрите $N1 \leq N$ и $M1 \leq M$ зависят от радиусите на наблюдение и комуникация. По този начин намаляваме броя на изчисленията, които алгоритъмът извършва, съответно се намалява времето за изпълнение. Феромонът се свързва с мястото на поставяне $Ph = \{ph_{ij}\}_{N1 \times M1}$, началният феромон има малка стойност, например $1/n_{ants}$. Мястото, където се намира HECN, е първата позиция в решението (нулева позиция).

Предложената от нас евристична информация е произведение от три параметъра както следва:

$$\eta_{ij}(t) = s_{ij}l_{ij}(1 - b_{ij}), \quad (6)$$

където s_{ij} е броят на непокритите точки, които новият сензор ще покрие,

$$l_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ако има комуникация} \\ 0 & \text{ако няма комуникация} \end{cases} \quad (7)$$

b е матрицата на решенията а матричният елемент $b_{ij} = 1$, когато има поставен сензор на възел (i, j) от граф $G1$, в противен случай $b_{ij} = 0$. Чрез s_{ij} се опитваме да увеличим локално покритите точки, повече новопокрити точки може да доведе до по-малък брой сензори. С l_{ij} гарантираме свързаността на мрежата. Поставянето на сензори започва от НЕСН към периферията. Всеки нов сензор се поставя така, че да може да предаде събраната информация до НЕСН. Чрез изразът $(1 - b_{ij})$ се гарантира, че на един възел от граф $G1$ ще се постави най-много един сензор, т.е. в една и съща позиция няма да има два или повече сензора. Когато вероятността за преход $p_{ij} = 0$ за всички стойности на i и j , търсенето на нови позиции за поставяне на сензори спира. Така изграждането на решението спира, ако няма повече свободни позиции, или всички точки са покрити или нова комуникация е невъзможна.

Използвани са два подхода за преобразуване на задачата от многоцелева в едноцелева. При единия подход целевата функция представлява произведение от двете целеви функции на задачата. При другия подход двете целеви функции се сумират, като преди това са нормирани, като са разделени на най-добрата стойност от първата итерация. Тук има два под-варианта: обикновена сума и претеглена сума.

Направено е сравнение между различните подходи и резултатите получени от други автори. За целта е въведено понятието разширен Парето фронт. Изследвано е влиянието на параметрите на алгоритъма.

Приложени са различни варианти на интеркритериален анализ. С помощта на интеркритериалния анализ е направена оценка на влиянието на броя на мравките върху поведението на алгоритъма. Отново с помощта на интеркритериалния анализ е изследвано сходството между отделните варианти на приложения алгоритъм. Има по-голямо сходство между поведението на двата едноцелеви варианта, отколкото между някои от едноцелевите и многоцелевите варианти.

6 Наемане на работна сила

Управлението на човешките ресурси е една от основните части при организацията на производството. Дадено е множество от задания $J = \{1, \dots, m\}$, които трябва да бъдат изпълнени за фиксиран период от време. Всяко задание j изисква d_j часа за да бъде завършено. $I = \{1, \dots, n\}$ е множеството от налични работници. Всеки работник трябва да работи върху всяко едно от назначените му задания минимум h_{min} часа, за да работи ефективно. Работник i е наличен s_i часа. Максималният брой задания, назначени на един работник е s_i часа. Работниците имат различни умения, множеството A_i показва за кои задания работник i е квалифициран. Максималният брой работници, който може да бъде назначен за планирания период е t или най-много t работника могат да бъдат избрани от множеството I на наличните работници и назначените работници трябва да бъдат способни да приключат всички задания. Целта е да се намери валидно решение, което да има минимална цена за назначаване. В тази работа е предложен алгоритъм на базата на метода на мравките за решаване на задачата за наемане на работна сила [46, 106, 63, 108].

В разглеждания случай задачата е представена чрез тримерен граф, където връх (i, j, z) означава работник i да бъде нает да работи по задание j за време z . В началото на всяка итерация, всяка мравка започва да строи решение от случаен връх на графа на задачата. За всяка една от мравките се генерират три случайни числа. Първото случайно число е в интервала $[0, \dots, n]$ и съответства на работника, който се наема. Второто случайно число е в интервала $[0, \dots, m]$ и съответства на заданието, върху което този работник трябва да работи. Третото случайно число е в интервала $[h_{min}, \dots, \min\{d_j, s_i\}]$ и съответства на броя часове, които работник i е нает да работи върху задание j . Евристичната информация се изчислява по следната формула:

$$\eta_{ijl} = \begin{cases} l/c_{ij} & l = z_{ij} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

С тази евристична информация насърчаваме назначаването на поевтините работници за възможно по-дълго време. Множеството от тестови примери включва десет структурирани и десет неструктурирани задачи. Една задача е структурирана, когато времето за изпълнение на заданието е пропорционално на минималното време, което трябва да се работи върху това задание. Направено е сравнение на предложения АСО

алгоритъм с алгоритми предложени от други автори и е показано, че АСО алгоритъмът превъзхожда другите за тази задача.

Задачата е със строги ограничения и част от мравките не успяват да намерят валидно решение. За подобряване на алгоритъма е предложена процедура за локално търсене. Тя се прилага върху намерените невалидни решения в итерацията. Процедурата е еднократна, независимо дали решението след локално търсене е валидно или не. По този начин времето за изпълнение на алгоритъма не се увеличава съществено. Наблюдава се намаляване на броя на намерените от мравките невалидни решения още след първата итерация. По този начин времето (броят итерации) за намиране на най-доброто решение намалява. Предложени са три варианта на процедура за локално търсене: с премахване на 25% от назначените работници и добавяне на нови с прилагане на метода на мравките. Премахване на половината назначени работници и добавяне на нови с прилагане на метода на мравките и заличаване на невалидното решение и построяване на ново решение на негово място. Най-ефективна се оказва процедурата при която се премахват половината от назначените работници. Премахнатите работници се избират по случаен начин.

Изследвано е влиянието на параметрите на АСО алгоритъма върху качеството на намерените решения. Използван е разнообразен брой мравки (5, 10, 20 и 40), и е установено, че най-добри резултати се получават когато броят на мравките е 5.

Приложен е интеркритериален анализ за да получим някои допълнителни познания за разглежданите четири варианта на АСО алгоритъма. Той показва, че при 5 и 10 мравки имаме сходно поведение на алгоритъма, както и при 20 и 40. От друга страна, ІСгА потвърждава заключението, че за тази задача най-добрата производителност на алгоритъма, т.е., използвайки по-малко изчислителни ресурси, е с използването на пет мравки.

7 Моделиране на пътничкопоток

Железопътният транспорт е най-старият обществен транспорт, който се използва и до днес. В днешно време автобусният транспорт конкурира железопътният, особено там където има магистрали. За това аналитичните модели са много важни за по-нататъшното планиране и вземане на решения при развитието на транспорта. Резултатите от тази глава са

публикувани в [42, 58, 64].

В нашия случай има дестинация от спирка A до спирка B . Има няколко вида превозни средства, разнообразни влакове и автобуси, които пътуват между спирка A и спирка B . Всяко превозно средство има множество от междинни спирки, на които спира, между двете крайни спирки. Някои от междинните спирки могат да са общи за някои от превозните средства. Нека множеството от всички спирки да бъде $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ и на всяка спирка s_i , $i = 1, \dots, n - 1$, n е броят на спирките, във всеки времеви слот има брой пътници, които искат да пътуват до гара s_j , $j = i + 1, \dots, n$. Всяко превозно средство може да има различна скорост и цена за придвижване от спирка s_i до спирка s_j . Дефинирали сме две целеви функции, сумата от цените на всички продадени билети и общото време за превозване на пътниците. Ако някое от превозните средства не спира на някоя от спирките, то поставяме времето за пътуване и цената до тази спирка да бъдат 0.

При прилагане на метода на мравките за задачата за моделиране на пътничопоток времето се разделя на времеви интервали/слотове ($N \times 24$ времеви интервали, съответстващи на 60/N минути). Мравките започват да строят решението от първата спирка. Те избират по случаен начин колко пътника ще се качат във всяко от превозните средства. Горната граница на пътниците, които могат да се качат в превозното средство е минимумът от разликата между капацитетът на превозното средство и пътниците, които вече са в него и броя на пътниците, които искат да пътуват. Ако на дадена спирка в даден момент време има само едно превозно средство, то в него се качват максимално възможно пътници.

Разработеният алгоритъм първо е приложен към малък пример, а след това към реален пример. Началната спирка е София, столицата на България, а крайната е Варна, морската столица на България. Това е едно от най-дългите железопътни направления в България, с дължина около 450 километра. По това направление има 5 влака и 23 автобуса за едно денонощие. Те се движат с различна скорост, цените за придвижване от една спирка до друга са различни и имат разлики в междинните спирки. Нямаме точни данни за броя на пътниците, които пътуват от една спирка до друга по линията София Варна. По тази причина сме направили оценка на броя на пътниците, имайки в предвид броя на жителите на населените места в които спират превозните средства.

8 Заключение

Комбинаторната оптимизация е изключително трудна от изчислителна гледна точка. Не съществува универсален метод за тяхното решаване. Обикновено прилагането на даден метод за решаването на такъв тип задачи зависи от самата задача и може да е различен за различни варианти на една и съща задача.

Фокусът в тази дисертация е към прилагането на метода на мравките. Този метод е измежду най-добрите за решаване на комбинаторни оптимизационни задачи. Методът на мравките се различава от останалите методи по това, че е конструктивен метод и превъзхожда повечето от останалите методи в голяма част от приложенията.

В настоящата дисертация са събрани резултатите на автора, в областта на метода на мравките и неговите приложения, постигнати през последните 7 години. В началото е дадено описание на метода и неговите разновидности.

Отделните глави представляват приложението на метода на мравките към различни задачи. Това са задачата за раницата, задачата за инспектиране на GPS мрежа, построяване на безжична сензорна мрежа, задачата за наемане на работна сила, моделиране на пътничкопоток. Всичките са сложни комбинаторни оптимизационни задачи изискващи неполиномиален брой изчисления. Изследвано е влиянието на параметрите на разработените алгоритми. Приложен е интеркритериален анализ. Направена е програмна реализация на разработените алгоритми.

8.1 Списък на публикациите

Монографии

- 1 Fidanova S.. Ant Colony Optimization and Applications. Studies in Computational Intelligence, 947, Springer, 2021, ISBN:978-3-030-67380-2, DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-67380-2>, 142 pages.

Списания с импакт фактор

- 2 Fidanova S., Atanasov K.. ACO with Intuitionistic Fuzzy Pheromone Updating Applied on Multiple Knapsack Problem. Mathematics, 9, 13, MDPI, 2021, ISSN:2227-7390, DOI:10.3390/math9131456, 1-7. IF 2.9,Q1.

Издания с импакт ранг

- 3 Fidanova S., Metaheuristic Method for Transport Modelling and Optimization Studies in Computational Intelligence, 648, Springer, 2016, 295 - 302. SJR 0.235
- 4 Roeva O., Fidanova S., Paprzycki M.. Comparison of Different ACO Start Strategies Based on InterCriteria Analysis. Recent Advances in Computational Optimization, Studies in Computational Intelligence, 717, Springer, 2018, ISBN:978-3-319-59860-4, 53-72. SJR 0.235
- 5 Fidanova S., Shindarov M., Marinov P.. Wireless Sensor Positioning Using ACO Algorithm. Studies in Computational Intelligence, 657, Springer, 2017, ISBN:978-3-319-41437-9, ISSN:1860-949X, 33-44. SJR 0.235
- 6 Fidanova S., Roeva O.. InterCriteria Analyzis of Differen Variants of ACO algorithm for Wireless Sensor Network Positioning. Lecture Notes in Computer Science, 11189, Springer, 2019, 88-96. SJR 0.407
- 7 Fidanova S., Roeva O.. Multi-Objective ACO Algorithm for WSN Layout: InterCriteria Analisys. Lecture Notice in Computer Science, 11958, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-410315, 474-481. SJR 0.407

- 8 Roeva O., Fidanova S.. Different InterCriteria Analysis of Variants of ACO algorithm for Wireless Sensor Network Positioning. *Studies in Computational Intelligence*, 838, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-22723-4, 83-103. SJR 0.237
- 9 Roeva O., Fidanova S., Luque G., Paprzycki M., InterCriteria Analysis of ACO Performance for Workforce Planing Problem, *Studiec in Computational Intelligence* 795, 2019, 47-68. SJR 0.235
- 10 Fidanova S., Luque G., New Local Search Procedure for Workforce Planning Problem, *Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 20(6), 2020, 40-48. SJR 0.420
- 11 Roeva O., Fidanova S., Ganzha M., InterCriteria Analysis of the Evaporation Parameter Influence on Ant Colony Optimization Algorithm: A Workforce Planing Problem, *Studies in Computational Intelligence* 920, 2021, 89-110. SJR 0.237
- 12 Fidanova S., Roeva O., Influence of ACO Evaporation Parameter for Unstructured Workforce Planning Problem, *Large Scale Scientific Computing, Lecture Notes in Computer Science* 13127, 2022, 234-241. SJR 0.407
- 13 Fidanova S., Roeva O., Ganzha M., Ant Colony Algorithm for Fuzzy Transport Modelling: InterCriteriaAnalysis, *Studies in Computational Intelligence* 986, 2022, 123-138. SJR o.237

Издания реферирани в Scopus

- 14 Fidanova S., Roeva O., Paprzycki M., Gepner P.. InterCriteria Analysis of ACO Start Startegies. *IEEE Xplorer*, 2016, ISBN:ISBN 978-83-60810-90, DOI:ISBN 978-83-60810-90-3, 547-550
- 15 Fidanova S.. Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Knapsack Problem. 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), IEEE, 2020, DOI:10.1109/ICRAIE51050.2020.93581-5
- 16 Fidanova S., Roeva O., Ganzha M.. InterCriteria Analyzis of Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Knapsack Problem. *Annals of Computer Science and Information Systems*, 25, IEEE, 2021, ISBN:978-83-959183-6-0, ISSN:2300-5963, DOI:10.15439/2021F22, 173-180

- 17 Fidanova, S., Luquq, G., Roeva, O., Paprzycki, M., Gepner, P.: Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planning. FedCSIS'2017, pp. 415–419. IEEE Xplorer (2017)
- 18 Fidanova S., Roeva O., Ganzha M., Ant Colony Algorithm for Fuzzy Transport Modelling, In proc of FedCSIS, ACSIS Vol. 21, IEEEExplorer, 2020, 237-240.

Други издания

- 19 Fidanova S., Atanassov K.. Flying Ant Colony Optimization Algorithm for Combinatorial Optimization. Studia Informatica, 38, 4, Polish Information Society, 2017, ISSN:1642-0489, 31-40

8.2 Списък на цитиранията

Fidanova S.. Ant Colony Optimization and Applications. Studies in Computational Intelligence, 947, Springer, 2021, ISBN:978-3-030-67380-2, DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-67380-2>, 142 pages.

Е цитирана в:

1. Adamuthe, A.C., Kagwade, S.M., Hybrid and adaptive harmony search algorithm for optimizing energy efficiency in VMP problem in cloud environment (2022) Decision Science Letters, 11 (2), pp. 113-126. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85122887825&doi=10.5267%2fj.dsl.2022.1.001&partnerID=40&md5=05f414055439af43fe3ef889b601cdb6>
2. Ali M.A., Balamurugan B., Sharma V., IoT and Blockchain Based Intelligence Security System for Human Detection using an Improved ACO and Heap Algorithm (2022) 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering, ICACITE 2022, pp. 1792 - 1795, DOI: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823827 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135471099&doi=10.1109%2fICACITE53722.2022.9823827&partnerID=40&md5=fd8ed18b46bf70a9e986>
3. Alobaedy M.M., Khalaf A.A., Fazea Y., Distributed Multi-Ant Colony System Algorithm using Raspberry Pi Cluster for Travelling Salesman Problem (2022) Iraqi Journal of Science, 63 (9), pp. 4067 - 4078, DOI: 10.24996/ijs.2022.63.9.35 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85139562253&doi=10.24996%2fijs.2022.63.9.35&partnerID=40&md5=354de00a4bd89e50b4645da024b2bb12>
4. Belkhadir A., Belkhayat D., Zidani Y., Pusca R., Romary R., Torque Ripple Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor using Adaptive Ant Colony Optimization (2022) 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2022, pp. 629 - 635, DOI: 10.1109/CoDIT55151.2022.9804127 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85134345047&doi=10.1109%2fCoDIT55151.2022.9804127&partnerID=40&md5=6fdf53f5970034691d53c077b8>
5. Guvenc M.A., Bilgic H.H., Cakir M., Mistikoglu S., The prediction of surface roughness and tool vibration by using metaheuristic-based ANFIS during dry turning of Al alloy (AA6013) (2022) Journal of

the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 44 (10), art. no. 474, DOI: 10.1007/s40430-022-03798-z, IF 2.361 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85138621510&doi=10.1007%2fs40430-022-03798-z&partnerID=40&md5=73514312166ea6828adc02f389fb6068>

6. Kaidi, W., Khishe, M., Mohammadi, M. (2022). Dynamic levy flight chimp optimization. Knowledge-Based Systems, 235, 107625. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.107625>. IF 8.139 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095070512100887X?casa_token=tgWguv8sDt4AAAAA:7Fz4WEDDf6CAQpahCIbnxJ_QVQrKRTqGh3d_ckBs-xz2XDc09DgzusSFikRwc-4H-AAGKsA
7. Kim G., S. Kim, I. G. Jang, "Loopwise Route Representation-Based Topology Optimization for the Shortest Path Problems," in IEEE Access, vol. 10, pp. 128835-128846, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3227388. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85144789774&doi=10.1109%2fACCESS.2022.3227388&partnerID=40&md5=c210a08c695436a0e44e457414>
8. Kumar, N., Kaswan, K. S. (2022). Soft Hunting Algorithm for Auto-Tuning Software Reliability Growth Models. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022. Article ID 3752264. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137127959&doi=10.1155%2f2022%2f3752264&partnerID=40&md5=11cee5115550595d36a5bb7b730ec03d>
9. Mirrashid N., Alibeiki E., Rakhtala S.M., Development and Control of an upper Limb Rehabilitation Robot via Ant Colony Optimization - PID and Fuzzy-PID Controllers (2022) International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, 35 (8), DOI: 10.5829/IJE.2022.35.08B.04 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85130637106&doi=10.5829%2fIJE.2022.35.08B.04&partnerID=40&md5=cd3fbb9b5ab295a6ef24941b2ee>
10. Murinto, P.A., Ujianto E.I.H., Multilevel Thresholding Image Segmentation Based-Logarithm Decreasing Inertia Weight Particle Swarm Optimization (2022) International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications, 14 (3), pp. 64 - 77, DOI: 10.15849/IJASCA.221128.05 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85142303135&doi=10.15849%2fIJASCA.221128.05&partnerID=40&md5=b2ce41ddae161ca9c8b2744cfaf8>
11. Qian Q., Yu K., Yadav P.K., Dhal S., Kalafatis S., Thomasson J.A., Hardin R.G., Cotton Crop Disease Detection on Remotely Collected Aerial Images with Deep Learning, (2022) Proceedings of SPIE - The

International Society for Optical Engineering, 12114, art. no. 1211405, DOI: 10.1117/12.2623039 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135802427&doi=10.1117%2f12.2623039&partnerID=40&md5=c52283acee4ad46d54cffbf4fd6d79a9>

12. Rajani, Kumar N., Kaswan K.S., Soft Hunting Algorithm for Auto-Tuning Software Reliability Growth Models (2022) *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, art. no. 3752264, DOI: 10.1155/2022/3752264 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137127959&doi=10.1155%2f2022%2f3752264&partnerID=40&md5=11cee5115550595d36a5bb7b730ec03>
13. Varol Altay E., Hybrid Archimedes optimization algorithm enhanced with mutualism scheme for global optimization problems (2022) *Artificial Intelligence Review*, DOI: 10.1007/s10462-022-10340-z, IF 9,588 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85143290279&doi=10.1007%2fs10462-022-10340-z&partnerID=40&md5=dbda36ef0755e71f685838666ca02a5>
14. Kaur G., Chanak P., Bhattacharya M., Obstacle-Aware Intelligent Fault Detection Scheme for Industrial Wireless Sensor Networks (2022) *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18 (10), pp. 6876 - 6886, DOI: 10.1109/TII.2021.3133347 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85121387038&doi=10.1109%2fTII.2021.3133347&partnerID=40&md5=4945cb61fda4fbc7189a4d943ed4aa7b>
15. Safaeian Hamzehkolaei, N., MiarNaeimi, F., A new hybrid multi-level cross-entropy-based moth-flame optimization algorithm (2021) *Soft Computing*, Vol. 23(18),pp. 14701-14718, IF 3.643 . <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85115987838&doi=10.1007%2fs00500-021-06109-1&partnerID=40&md5=9ff8d4cee4775ac185a532df27ef9364>

Fidanova S., Metaheuristic Method for Transport Modelling and Optimization Studies in Computational Intelligence, 648, Springer, 2016, 295 - 302.

Е цитирана в:

16. Ribagin S., Lyubenova V. (2021) Metaheuristic Algorithms: Theory and Applications. In: Atanassov K.T. (eds) *Research in Computer Science in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence*, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_18 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72284-5_18

Roeva O., Fidanova S., Paprzycki M.. Comparison of Different ACO Start Strategies Based on InterCriteria Analysis. Recent Advances in Computational Optimization, Studies of Computational optimization, 717, Springer, 2018, ISBN:978-3-319-59860-4, 53-72.

Е цитирана в:

17. Chorukova E., Marinov P., Umlenski I. (2021) Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach. In: Atanassov K.T. (eds) Research in Computer Science in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_20 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72284-5_20
18. Ribagin S., Lyubenova V. (2021) Metaheuristic Algorithms: Theory and Applications. In: Atanassov K.T. (eds) Research in Computer Science in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_18 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72284-5_18
19. Atanassov, Krassimir T. "Applications of IVIFSs." Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets. Springer, Cham, 2020. 131-194. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-32090-4_6
20. Mello-Roman, J.D., Hernandez, A., KPLS optimization with nature-inspired metaheuristic algorithms (2020) IEEE Access, 8, art. no. 9178802, pp. 157482-157492. IF 3.74 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091217211&doi=10.1109%2fACCESS.2020.3019771&partnerID=40&md5=cf86a1c4e4a2bec5d81e077d070903b4>
21. Atanassov K, Marinov P, Atanassova V. InterCriteria Analysis with Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Evaluations, Flexible Query Answering Systems, Lecture Notes in Computer Science 11529, 2019 (pp. 329-338). Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27629-4_30
22. Mansour, Imen Ben, Ines Alaya, and Moncef Tagina. "A gradual weight-based ant colony approach for solving the multiobjective multidimensional knapsack problem." Evolutionary Intelligence 12.2 (2019): 253-272. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12065-019-00222-9>

Fidanova S.. Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Knapsack Problem. 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), IEEE, 2020, DOI:10.1109/ICRAIE51050.2020.9358351, 1-5

Е цитирана в:

23. Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Abouhawwash, M., Chang, V., Askar, S.S., A local search-based generalized normal distribution algorithm for permutation flow shop scheduling (2021) Applied Sciences (Switzerland), 11 (11), art. no. 4837, .IF 2.679 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107451707&doi=10.3390%2fapp11114837&partnerID=40&md5=b5a465074032557746a4e7744eef634b>
24. Kostyikova, M., Kozachok, L., Levterov, A., Plekhova, A., Shevchenko, V., Okun, A., The use of the heuristic method for solving the knapsack problem (2021) 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedings, pp. 177-180. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118916396&doi=10.1109%2fKhPIWeek53812.2021.9570025&partnerID=40&md5=f326e577eedec696e16bd71d58>
25. Yang Q., Haomiao L., Xiao W., Omar D., On the adoption of Metaheuristics for Solving 0-1 Knapsack Problems, Proceedings - International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming, PAAPVolume 2021, ISBN 978-166549639-1, Pages 56 - 61. DOI 10.1109/PAAP54281.2021.9720471 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85126875329&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Fidanova&sid=409193dd157582b11c8c4ab6sot=b&sdt=b&rr=7&sl=13&s=REF%28Fidanova%29&relpos=2&citeCnt=0&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_NE

Fidanova S., Shindarov M., Marinov P.. Wireless Sensor Positioning Using ACO Algorithm. Studies in Computational Intelligence, 657, Springer, 2017, ISBN:978-3-319-41437-9, ISSN:1860-949X, 33-44.

Е цитирана в:

26. Jackman, P. (2022). You Got Data, Now What: Building the Right Solution for the Problem. In: Bochtis, D.D., Moshou, D.E., Vasileiadis, G., Balafoutis, A., Pardalos, P.M. (eds) Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme II: Data. Springer Optimization and Its Applications, vol 183. Springer, Cham.<https://doi.org/10.>

1007/978-3-030-84148-5_1 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85127162881&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Fidanova&sid=c88732e8149c133647c7354b6579723f&sot=b&sdt=b&rr=7&sl=13&s=REF%28Fidanova%29&relpos=4&citeCnt=0&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_NE

27. Ribagin S., Lyubenova V. (2021) Metaheuristic Algorithms: Theory and Applications. In: Atanassov K.T. (eds) Research in Computer Science in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_18, ISSN: 1860949X https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111092796&doi=10.1007%2f978-3-030-72284-5_18&partnerID=40&md5=8a0ceb89b608f04773d4365d662028d8
28. Bureva, V., Traneva, V., Sotirova, E., Atanassov, K. Index matrices and olap-cube part 5: Index matrix operations over olap-cube (2020) Advanced Studies in Contemporary Mathematics (Kyungshang), 30 (1), pp. 69-88. DOI: 10.17777/ascm2020.30.1.69, ISSN: 12293067 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096143035&doi=10.17777%2fascm2020.30.1.69&partnerID=40&md5=38a6393e4603881b8c6385f4f2493c18>

Fidanova S., Roeva O.. InterCriteria Analyzis of Differen Variants of ACO algorithm for Wireless Sensor Network Positioning. Lecture Notes in Computer Science, 11189, Springer, 2019, 88-96.

Е цитирана в:

29. Chorukova, E., Marinov, P., Umlenski, I., Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach, (2021) Studies in Computational Intelligence, 934, pp. 453-469. DOI:10.1007/978-3-030-72284-5_20 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111122908&doi=10.1007%2f978-3-030-72284-5_20&partnerID=40&md5=9426c54440afaebae760a84cbb
30. Videv, T., Sotirov, S., Bozveliev, B., Generalized Net Model of the Network for Automatic Turning and Setting the Lighting in the Room with Intuitionistic Fuzzy Estimations, (2020) Studies in Computational Intelligence, 862, pp. 83-90. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85080931227&doi=10.1007%2f978-3-030-35445-9_7&partnerID=40&md5=fce77b43f5c151766ec7582417a2f9db

Fidanova S., Roeva O.. Multi-Objective ACO Algorithm for WSN Layout: InterCriteria Analysis. Lecture Notice in Computer Science, 11958, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-410315, 474-481.

Е цитирана в:

31. Todorov T., Dimov D., Ostromski Tz., Zlatev Z. Georgieva R., Poryazov S., Sensitivity Study of a Large-Scale Air Pollution Model by Using Optimized Latin Hyprecube Sampling, Recent Advances in Computational Optimization, Studies in Computational Intelligence 986, 2022, 371-387. SJR 185 https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-82397-9_19
32. Chorukova, E., Marinov, P., Umlenski, I., Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach, (2021) Studies in Computational Intelligence, 934, pp. 453-469. DOI:10.1007/978-3-030-72284-5_20 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111122908&doi=10.1007%2f978-3-030-72284-5_20&partnerID=40&md5=9426c5440afaebae760a84cb

Roeva O., Fidanova S.. Different InterCriteria Analysis of Variants of ACO algorithm for Wireless Sensor Network Positioning. Studies in Computational Intelligence, 838, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-22723-4, 83-103.

Е цитирана в:

33. Chorukova, E., Marinov, P., Umlenski, I., Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach, (2021) Studies in Computational Intelligence, 934, pp. 453-469. DOI:10.1007/978-3-030-72284-5_20 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111122908&doi=10.1007%2f978-3-030-72284-5_20&partnerID=40&md5=9426c5440afaebae760a84cb
34. Afradi, A., Ebrahimabadi, A., Hallajian, T. Prediction of tunnel boring machine penetration rate using ant colony optimization, bee colony optimization and the particle swarm optimization, case study: Sabzkooh water conveyance tunnel (2020) Mining of Mineral Deposits, 14 (2), pp. 75-84. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084131408&doi=10.33271%2fmining14.02.075&partnerID=40&md5=3aa4f6f6813f26f8a58f3e7ed39ef>

Roeva O., Fidanova S., Luque G., Paprzycki M., InterCriteria Analysis of ACO Performance for Workforce Planing Problem, Studiec in Computational Intelligence 795, 2019, 47-68.

Е цитирана в:

35. Chorukova, E., Marinov, P., Umlenski, I., Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach, (2021) *Studies in Computational Intelligence*, 934, pp. 453-469. DOI:10.1007/978-3-030-72284-5_20 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111122908&doi=10.1007%2f978-3-030-72284-5_20&partnerID=40&md5=9426c5440afaebae760a84cb
36. Sallam, K.M.aEmail Author, Turan, H.H.bEmail Author, Chakraborty, R.K.bEmail Author, Elsayah, S.bEmail Author, Ryan, M.J.b, A Differential Evolution Algorithm for Military Workforce Planning Problems: A Simulation-Optimization Approach, *EEE Symposium Series on Computational Intelligence*, SSCI 20201 December 2020, Article number 9308566, Pages 2504-2509 <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85099715211&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=&st2=&sid=031beda27901ae541dd219a145b1bcc3&sot=b&sdt=b&rr=30&sl=14&s=REF+%28Fidanova%29&relpos=5&citeCnt=0&searchTerm=>
37. Dezert, Jean, Albena Tchamova, Deqiang Han, and Jean-Marc Tacnet. "Simplification of Multi-Criteria Decision-Making Using Inter-Criteria Analysis and Belief Functions." In 2019 22th International Conference on Information Fusion (FUSION), pp. 1-8. IEEE, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9011326>

Fidanova S., Roeva O., Paprzycki M., Gepner P.. InterCriteria Analysis of ACO Start Strategies. IEEE Xplorer, 2016, ISBN:ISBN 978-83-60810-90, DOI:ISBN 978-83-60810-90-3, 547-550

Е цитирана в:

38. Ignatova V., Todorova L. (2022) Computer-Based Rehabilitation of Cognitive Impairments in Patients with Multiple Sclerosis. In: Sotirov S.S., Pencheva T., Kacprzyk J., Atanassov K.T., Sotirova E., Staneva G. (eds) *Contemporary Methods in Bioinformatics and Biomedicine and Their Applications*. BioInfoMed 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 374. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96638-6_4 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85127061211&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Fidanova&sid=409193dd157582b11c8c4ab6af886ca4&sot=b&sdt=b&rr=7&sl=13&s=REF%28Fidanova%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_NE

39. Chorukova, E., Marinov, P., Umlenski, I., Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach, (2021) Studies in Computational Intelligence, 934, pp. 453-469. DOI:10.1007/978-3-030-72284-5_20 https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111122908&doi=10.1007%2f978-3-030-72284-5_20&partnerID=40&md5=9426c5440afaebae760a84cb
40. Ribagin S., Lyubenova V. (2021) Metaheuristic Algorithms: Theory and Applications. In: Atanassov K.T. (eds) Research in Computer Science in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_18 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72284-5_18
41. Antonov, A., Analysis and detection of the degrees and direction of correlations between key indicators of physical fitness of 10-12-year-old hockey players (2019) International Journal Bioautomation, 23 (3), pp. 303-314. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074957141&doi=10.7546%2fijba.2019.23.3.000709&partnerID=40&md5=8e7ddc65c910092393247111>
42. Sotirova, E., Vasilev, V., Bozova, G., Bozov, H., Sotirov, S., Application of the InterCriteria Analysis Method to a Dataset of Malignant Neoplasms of the Digestive Organs for the Burgas Region for 2014-2018 (2019) 2019 Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering, BdkCSE 2019, art. no. 9010609, . <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082306089&doi=10.1109%2fBdkCSE48644.2019.9010609&partnerID=40&md5=596e7a002f5f80aa64797b074ed8d8e9>
43. Sotirova E, Bureva V, Markovska I, Sotirov S, Vankova D. Application of the InterCriteria Analysis Over Air Quality Data. In International Conference on Flexible Query Answering Systems, LNCS 10333, Springer, SJR 0.323, 2017, pp. 226-235.(SCOPUS) https://rd.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-59692-1_20

Fidanova, S., Luquq, G., Roeva, O., Paprzycki, M., Gepner, P.: Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planning. FedCSIS'2017, pp. 415–419. IEEE Xplorer (2017)

Е цитирана в:

44. Ribagin S., Lyubenova V. (2021) Metaheuristic Algorithms: Theory and Applications. In: Atanassov K.T. (eds) Research in Computer Science

in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_18 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72284-5_18

Fidanova S., Roeva O., Ganzha M., Ant Colony Algorithm for Fuzzy Transport Modelling, In proc of FedCSIS, ACSIS Vol. 21, IEEE Explorer, 2020, 237-240.

Е цитирана в:

45. Akanskha, E., Sahoo, A., Gulati, K., Jyoti, Sharma, N., Hybrid Classifier Based on Binary Neural Network and Fuzzy Ant Colony Optimization Algorithm (2021) Proceedings of the 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2021, art. no. 9453013, pp. 1613-1619. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85113465293&doi=10.1109%2fIC0EI51242.2021.9453013&partnerID=40&md5=a8144c3d5061cc89d25ae61549353f55>
46. Baiou, M., Mombelli, A., Quilliot, A., Adouane, L., Zhu, Z., Algorithms for the Safe Management of Autonomous Vehicles (2021) Proceedings of the 16th Conference on Computer Science and Intelligence Systems, FedCSIS 2021, pp. 153-162. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85117767486&doi=10.15439%2f2021F18&partnerID=40&md5=d61f582a1a1c96896611254cbb55e026>
47. Hou F., Information Flow Optimization for Practice of University Mathematics Interaction Platform Construction, Proceedings of the 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2021 Pages 1149 - 1152 2021 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2021 Coimbatore 2 December 2021 through 4 December 2021 Code 176530, DOI https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85125370862&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Fidanova&sid=d3c94b946ef339479699dce872f083d&sot=b&sdt=b&rr=14&sl=13&s=REF%28Fidanova%29&relpos=1&citeCnt=0&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_N

Fidanova S., Atanassov K.. Flying Ant Colony Optimization Algorithm for Combinatorial Optimization. Studia Informatica, 38, 4, Polish Information Society, 2017, ISSN:1642-0489, 31-40

Е цитирана в:

48. Cheriguene Y., Bousbaa F.Z., Kerrache C.A., Djellikh S., Lagraa N., Lahby M., Lakas A., COCOMA: a resource-optimized cooperative UAVs communication protocol for surveillance and monitoring applications (2022) *Wireless Networks*, DOI: 10.1007/s11276-022-03031-8, IF 2.701 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85133245052&doi=10.1007%2fs11276-022-03031-8&partnerID=40&md5=212fe930e04d910c7cf4e39328a>
49. Dafina Zoteva, N. Angelova, *Generalized Nets. An Overview of the Main Results and Applications*, *Studies in Computational Intelligence* 943, 2021, 177-126. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-72284-5>
50. Ribagin S., Lyubenova V. (2021) *Metaheuristic Algorithms: Theory and Applications*. In: Atanassov K.T. (eds) *Research in Computer Science in the Bulgarian Academy of Sciences. Studies in Computational Intelligence*, vol 934. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_18 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72284-5_18
51. Bousbaa, F.Z., Kerrache, C.A., Mahi, Z., Tahari, A.E.K., Lagraa, N., Yagoubi, M.B. 56224001600;56405671800;57211499642;57211254405;10241447900;5709034750 *GeoUAVs: A new geocast routing protocol for fleet of UAVs* (2020) *Computer Communications*, 149, pp. 259-269. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074193722&doi=10.1016%2fj.comcom.2019.10.026&partnerID=40&md5=325769433aacc18dce1fa7cf9ad60a65>
52. Cheriguene, Y., Djellikh, S., Bousbaa, F.Z., Lagraa, N., Lakas, A., Kerrache, C.A. and Tahari, A.E.K., 2020, September. SEMRP: an Energy-efficient Multicast Routing Protocol for UAV Swarms. In *2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)* art. no. 9213700. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85094813992&doi=10.1109%2fDS-RT50469.2020.9213700&partnerID=40&md5=1b5e43d3a51deece772e60ce0fcdf>

8.3 Приноси

Приносите в тази дисертация могат да бъдат разделени на научни и научноприложни. Научните приноси касаят разработването на алгоритми на базата на метода на мравките. Научно-приложните приноси се отнасят към програмната реализация на разработените алгоритми.

Научните приноси са:

- Разработен е хибриден алгоритъм за решаване на задачата за раницата като комбинация между прилагане на метода на мравките и подходяща процедура за локално търсене. Въведено е използването на два варианта на интуиционистки размит феромон. С помощта на интеркритериален анализ е направено сравнение между вариантите на използваните алгоритми, както и на използването на стартови стратегии.
- Разработен е алгоритъм за инспектиране на GPS мрежа на основата на метода на мравките. Добавени са промени в средата на търсене. Изследвани са коректността на алгоритъма и сходството между мрежите с помощта на интеркритериален анализ.
- Разработени са алгоритми за решаване на задачата за построяване на безжична сензорна мрежа на основата на метода на мравките. Направен е анализ на чувствителността спрямо броя на използваните мравки. Анализирани са сходствата и различията на отделните алгоритми с помощта на интеркритериален анализ.
- Разработен е алгоритъм за решаване на задачата за наемане на работна сила на основата на метода на мравките. Разработени са няколко варианта на процедури за локално търсене с цел подобряване работата на алгоритъма. Направен е анализ на чувствителността на алгоритъма спрямо неговите параметри. Приложен е интеркритериален анализ.
- Разработен е алгоритъм за моделиране на пътничкопоток при наличие на разнообразни видове транспорт в едно направление. Алгоритъмът е основан на метода на мравките.

Научно-приложните приноси са:

- Направена е софтуерна реализация на хибридният алгоритъм за решаване на задачата за раницата;
- Направена е софтуерна реализация на алгоритъма за инспектиране на GPS мрежа с промени в средата на търсене;
- Направена е софтуерна реализация на алгоритъма за решаване на задачата за наемане на работна сила;
- Направена е софтуерна реализация на алгоритъм за моделиране на пътникопоток.

Резултатите от настоящата дисертация могат да се използват в най-различни области на науката, индустрията и практиката. Разработените алгоритми и тяхната програмна реализация се отнасят за практически задачи и могат да бъдат внедрени в различни отрасли на икономиката.

8.4 Декларация за оригиналност

Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:

8.5 Благодарности

Искам да изкажа моите най-искрени благодарност на всички мои колеги от Института по Информационни и Комуникационни Технологии както и на акад. Красимир Атанасов, проф. Олимпия Роева и доц. Вася Атанасова от Института по Биофизика и Биомедицинско Инженерство с които съм работила и заедно сме постигнали тези резултати.

Благодаря на колегите от секция Паралелни Алгоритми за добрата работна атмосфера, за проектите които работихме заедно, за ценните дискусии в които се родиха оригинални идеи, за постигнатите резултати в следствие на колективната ни работа.

Благодаря и на чуждестранните учени, с които съм работила. Ще спомена Енрике Алба и Габриел Люк от Испания; Марчин Папржицки и Мария Ганжа от Полша; Марко Дориго от Белгия, Антонио Мучерино от Франция.

И накрая, но не на последно място искам да благодаря на моето семейство, които винаги са ме подкрепяли, и специално на съпруга ми, който винаги е насърчавал и стимулирал всичките ми научни изследвания.

Литература

- [1] Akuidiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayrci E.: Wireless Sensor Networks: A Survey, *Computer Networks*, **38(4)**, Elsevier, 393–422, (2001)
- [2] A. EL AMARAOUI A.,K. MESGHOUNI, *Train Scheduling Networks under Time Duration Uncertainty*, In proc. of the 19th World Congress of the Int. Federation of Automatic Control, 2014, 8762 - 8767.
- [3] Alba, E., Luque, G., Luna, F.: Parallel Metaheuristics for Workforce Planning. *J. Mathematical Modelling and Algorithms* **6(3)**, Springer, 509-528.(2007)
- [4] Alba E., Molina G.: Optimal Wireless Sensor Layout with Metaheuristics: Solving a Large Scale Instance, *Large-Scale Scientific Computing, Lecture Notes in Computer Science*, **4818**, Springer, 527–535, (2008)

- [5] A. A. ASSAD, *Models for Rail Transportation*, Transportation Research Part A General, **143**, 1980, 205 - 220.
- [6] Atanassov, K.: On Index Matrices, Part 1: Standard Cases. *Advanced Studies in Contemporary Mathematics* 20(2), 291–302 (2010)
- [7] Atanassov, K.: *On Intuitionistic Fuzzy Sets Theory*. Springer, Berlin (2012)
- [8] Atanassov, K., Szmidt, E., Kacprzyk, J.: On Intuitionistic Fuzzy Pairs. *Notes on IFS* 19(3), 1–13 (2013)
- [9] Atanassov, K., Mavrov, D., Atanassova, V.: Intercriteria Decision Making: A New Approach for Multicriteria Decision Making, Based on Index Matrices and Intuitionistic Fuzzy Sets. *Issues in IFSs and GNs* **11**, 1–8 (2014)
- [10] Atanassov, K., Atanassova, V., Gluhchev, G.: InterCriteria Analysis: Ideas and Problems. *Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets* 21(1), 81–88 (2015)
- [11] Atanassov, K. *Intuitionistic Fuzzy Sets*; Studies in Fuzziness and Soft Computing, 123; Springer: Heidelberg, Germany, 1999.
- [12] Atanassov, K. *Intuitionistic Fuzzy Logics*; Studies in Fuzziness and Soft Computing, 351; Springer: Heidelberg, Germany, 2017.
- [13] T. BENZAO AND Z. SHAORONG, *Optimal Design of Monitoring Networks with Prior Deformation Information*, *Surv. Rev.* **33**, (1995), pp. 231–246.
- [14] E. BONABEAU, M. DORIGO, G. THERAULAZ, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.
- [15] Campbell, G.: A two-stage stochastic program for scheduling and allocating cross-trained workers. *J. Operational Research Society* **62(6)**, 1038–1047. (2011)
- [16] P. CROSS AND K. THAPA, *The Optimal Design of Leveling Networks*, *Surv. Rev.* **25**, (1979) pp. 68–79.

- [17] C. CHU, F. NING, P. HUNG AND S. CHU, *The Study of Orthometric Heighting Using GPS*, Geomat. Res. Aus. 66, (1997) pp. 55–76.
- [18] P.J. DARE AND H.A. SALEH, *GPS Network Design: Logistics Solution Using Optimal and Near-Optimal Methods*, J. of Geodesy, Vol 74, (2000) pp. 467–478.
- [19] Deb K., Pratap A., Agrawal S., Meyarivan T.: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: Nsga-ii, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, **6(2)**, 182–197, (2002).
- [20] Deneubourg J.L., Aron S., Goss S., Pasteels J.M.: The Self-Organising Exploatory Pattern of the Argentine Ant, J. of Insect Behavior 3, 159–168 (1990).
- [21] Dorigo, M., Di Caro, G.: The Ant Colony Optimization Meta-heuristic, In: Corne, D, Dorigo, M., Glover, F. (eds): New Idea in Optimization, McGraw-Hill, pp. 11–32 (1999).
- [22] O. DIAZ-PARRA, J. A. RUIZ-VANOYE, B. B. LORANCA, A. FUENTES-PENNA, R.A. BARRERA-CAMARA, *A Survey of Transportation Problems* Journal of Applied Mathematics Volume 2014 (2014), Article ID 848129, 17 pages.
- [23] Diffe W., Hellman M. E. : New direction in cryptography. IEEE Trans, Inf. Theory, IT - 36,(1976), 644–654.
- [24] *Dorigo, M.* Optimization, Learning and Natural Algorithms. Ph.D.Thesis. Politecnico di Milano, Italy, 1992 (in Italian).
- [25] *Dorigo, M., L. M. Gambardella.* Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. – IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 1, 1997, 53-66.
- [26] *Dorigo, M., V. Maniezzo, A. Colomi.* The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperative Agents. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics–Part B, Vol. 26, 1996, No 1, 29-41.
- [27] *Dorigo, M., T. Stutzle.* Ant Colony Optimization. MIT Press, 2004.

- [28] Easton, F.: Service completion estimates for cross-trained workforce schedules under uncertain attendance and demand. *Production and Operational Management* **23(4)**, 660–675. (2014)
- [29] *Fidanova, S.* Evolutionary Algorithm for Multiple Knapsack Problem. – In: *Int. Conference Parallel Problems Solving from Nature, Real World Optimization Using Evolutionary Computing*, ISBN No 0-9543481-0-9, Granada, Spain, 2002.
- [30] *Fidanova, S.* ACO Algorithm with Additional Reinforcement. M. Dorigo, G. Di Caro, M. Sampels (Eds). – In: *From Ant Colonies to Artificial Ants, Lecture Notes in Computer Science*. No 2463. ISSN 0302-9743. Germany, Springer, 2002, 292-293.
- [31] Fidanova, S. (2003). ACO algorithm for MKP using various heuristic information. In I, Dimov, I. Lirkov, S. Margenov, Z. Zlatev (Eds.), *Numerical methods and applications* (pp. 434-330) (LNCS 2542). Berlin: Springer-Verlag.
- [32] Fidanova S.. *Ant Colony Optimization and Pheromone Importance*. Computer Science, Engineering and Applications, 2003, 408-413
- [33] Fidanova S.. *Ant Colony Optimization for Multiple Knapsack Problem and Model Bias*. *Lecture Notes in Computer Science*, 3401, Springer, 2005, ISSN:0377-0427, 280-287. SJR:0.339
- [34] Fidanova, S.: *Hybrid Heuristics Algorithm for GPS Surveying Problem*. *Numerical Methods and Applications, Lecture Notes in Computer Science* **4310**, 239–248. Springer (2007)
- [35] Fidanova S.. *Probabilistic Model of Ant Colony optimization for Multiple Knapsack Problem*. *Lecture Notes in Computer Science*, 4818, Springer, 2008, 545-552. SJR:0.339
- [36] S. FIDANOVA, K. ATANASOV *Generalized Net Model for the Process of Hibride Ant Colony Optimization* *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, **62(3)**, 2009, 315 - 322.
- [37] Fidanova, S., Alba, E., Molina, G.: *Hybrid ACO Algorithm for the GPS Surveying Problem*. *Large Scale Scientific Computing, Lecture Notes in Computer Science* **5910**, 318–325. Springer (2010)

- [38] Fidanova S., Marinov P., Alba E.: ACO for Optimal Sensor Layout, In Proc. of Int. Conf. on Evolutionary Computing, Valencia, Spain, Joaquim Filipe and Janus Kacprzyk eds., SciTePress-Science and Technology Publications portugal, ISBN 978-989-8425-31-7, 5–9, (2010)
- [39] S. Fidanova, K. Atanassov, P. Marinov, Generalized Nets and Ant Colony Optimization, Academic Publishing House, Bulgarian Academy of Sciences, 2011.
- [40] Fidanova, S., Paprzycki, M., Roeva, O.: Hybrid GA-ACO Algorithm for a Model Parameter Identification Problem: In proc. of FedCSIS 2014 conference, pp. 413–420. IEEE Xplorer (2014)
- [41] Fidanova, S., Ilcheva, Z.: Application of Ants Ideas on Image Edge Detection. Large Scale Scientific Computing, Lecture Notes in Computer Science **9374**, pp. 200–207. Springer, (2016)
- [42] Fidanova S., Metaheuristic Method for Transport Modelling and Optimization Studies in Computational Intelligence, 648, Springer, 2016, 295 - 302.
- [43] Fidanova, S., Roeva, O., Paprzycki, M., Gepner, P.: InterCriteria Analysis of ACO Start Strategies. Proceedings of the 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 547–550. (2016)
- [44] Fidanova, S., Roeva, O.: InterCriteria Analysis of Ant Colony Optimization Application to GPS Surveying Problems. Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets **12**, 20–38. (2016)
- [45] Fidanova S., Roeva O., Paprzycki M., Gepner P.. InterCriteria Analysis of ACO Start Startegies. IEEE Xplorer, 2016, ISBN:ISBN 978-83-60810-90, DOI:ISBN 978-83-60810-90-3, 547-550
- [46] Fidanova, S., Luquq, G., Roeva, O., Paprzycki, M., Gepner, P.: Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planning. FedCSIS'2017, pp. 415–419. IEEE Xplorer (2017)
- [47] Fidanova, S., Roeva, O., Mucherino, A., Kapanova, K.: InterCriteria Analysis of ANT Algorithm with Enviroment Change for GPS

- Surveying Problem. Artificial Intelligence:Methodology, Systems and Applications, Ch. Dachev, G. Agre eds., Lecture Notes in Artificial Intelligence **9883**, pp. 271–278. Springer (2016)
- [48] Fidanova S., Atanassov K.. Flying Ant Colony Optimization Algorithm for Combinatorial Optimization. *Studia Informatica*, 38, 4, Polish Information Society, 2017, ISSN:1642-0489, 31-40
- [49] Fidanova, S., Roeva, O., Atanasova, V.: Ant Colony Optimization Application to GPS Surveying Problems: InterCriteria Analysis. *Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets, Advances in Intelligent Systems and Computing* (559), pp. 251–264. Springer (2018)
- [50] Fidanova S., Shindarov M., Marinov P.. Wireless Sensor Positioning Using ACO Algorithm. *Studies in Computational Intelligence*, 657, Springer, 2017, ISBN:978-3-319-41437-9, ISSN:1860-949X, 33-44.
- [51] Roeva O., Fidanova S., Paprzycki M.. Comparison of Different ACO Start Strategies Based on InterCriteria Analysis. *Recent Advances in Computational Optimization, Results of the Workshop on Computational Optimization WCO 2016, Studies of Computational optimization*, 717, Springer, 2018, ISBN:978-3-319-59860-4, 53-72.
- [52] Fidanova, S., Luquq, G., Roeva, O., Paprzycki, M., Gepner, P.: Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planning. *FedCSIS'2018, IEEE Xplorer, ACSIS Vol. 15*, 2018, 233-236.
- [53] Fidanova S., Roeva O.. InterCriteria Analyzis of Differen Variants of ACO algorithm for Wireless Sensor Network Positioning. *Lecture Notes in Computer Science*, 11189, Springer, 2019, 88-96.
- [54] Fidanova S., Luque G., Roeva O., Ganzha M., Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planing: Influence of the Evaporation Parameter, In *Proceedings of FedCSIS, IEEE Xplorer, ACSIS 18*, 2019, 177-181.
- [55] Fidanova S., Roeva O., Luque G., Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planing: Influence of the Algorithm Parameters, *Studies in Computational Intelligence* 793, 2019.

- [56] Fidanova S.. Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Knapsack Problem. 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), IEEE, 2020, DOI:10.1109/ICRAIE51050.2020.9358351, 1-5
- [57] Fidanova S., Roeva O.. Multi-Objective ACO Algorithm for WSN Layout: InterCriteria Analysis. Lecture Notice in Computer Science, 11958, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-410315, 474-481.
- [58] Fidanova S., Roeva O., Ganzha M., Ant Colony Algorithm for Fuzzy Transport Modelling, In proc of FedCSIS, ACSIS Vol. 21, IEEEExplor, 2020, 237-240.
- [59] Fidanova S., Roeva O., Luque G., Paprzycki M., InterCriteria Analysis of Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Workforce Planning, Studies in Computational Intelligence 838, 2020, 61-82.
- [60] Fidanova S., Luque G., New Local Search Procedure for Workforce Planning Problem, Cybernetics and Information Technologies, Vol. 20(6), 2020, 40-48.
- [61] Fidanova S., Atanassov K.. ACO with Intuitionistic Fuzzy Pheromone Updating Applied on Multiple Knapsack Problem. Mathematics, 9, 13, MDPI, 2021, ISSN:2227-7390, DOI:10.3390/math9131456, 1-7.
- [62] Fidanova S., Roeva O., Ganzha M.. InterCriteria Analysis of Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Knapsack Problem. Annals of Computer Science and Information Systems, 25, IEEE, 2021, ISBN:978-83-959183-6-0, ISSN:2300-5963, DOI:10.15439/2021F22, 173-180
- [63] Fidanova S.. Ant Colony Optimization and Applications. Studies in Computational Intelligence, 947, Springer, 2021, ISBN:978-3-030-67380-2, DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-67380-2>, 142
- [64] Fidanova S., Roeva O., Ganzha M., Ant Colony Algorithm for Fuzzy Transport Modelling: InterCriteriaAnalysis, Studies in Computational Intelligence 986, 2022, 123-138.

- [65] Fidanova S., Roeva O., Influence of ACO Evaporation Parameter for Unstructured Workforce Planning Problem, Large Scale Scientific Computing, LNCS 13127, 2022, 234-241.
- [66] J. G. JIN, J. ZHAO, D. H. LEE, *A Column Generation Based Approach for the Train Network Design Optimization Problem*, J. of Transportation Research, **50**(1), 2013, 1 - 17.
- [67] Glover, F., Kochenberger, G., Laguna, M., Wubben, T.: Selection and assignment of a skilled workforce to meet job requirements in a fixed planning period. In:MAEB'04, 636–641. (2004)
- [68] Gonzalez, R. C., Woods, R. E.: Digital Image Processing. Prentice-Hall, Inc. (2002)
- [69] Grzybowska, K., Kovács, G.: Sustainable Supply Chain – Supporting Tools. Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems 2, 1321–1329. (2014)
- [70] F. S. HANSELER, N. MOLYNEAUX, M. BIERLAIRE, AND A. STATHOPOULOS, *Schedule-based estimation of pedestrian demand within a railway station*, Proceedings of the Swiss Transportation Research Conference (STRC) 14-16 May, 2014.
- [71] B. HARVEY, D. ELFORD AND C. TURNER, *Calculation of 3D Control Surveys*, Aus. Surv. 43, (1998) pp. 109–117.
- [72] Hewitt, M., Chacosky, A., Grasman, S., Thomas, B.: Integer programming techniques for solving non-linear workforce planning models with learning. European J of Operational Research **242**(3), 942–950. (2015)
- [73] Hu, K., Zhang, X., Gen, M., Jo, J.: A new model for single machine scheduling with uncertain processing time, J. Intelligent Manufacturing **28**(3), 717–725. (2015)
- [74] Ikonov, N., Vassilev P., Roeva, O.: ICrAData – Software for InterCriteria Analysis. International Journal Bioautomation, **22**(2), (2018)

- [75] Isah, O. R., Usman, A. D., Tekanyi, A. M. S.: A Hybrid Model of PSO Algorithm and Artificial Neural Network for Automatic Follicle Classification. *Int. J. Bioautomation* **21(1)**, 43–58. (2017)
- [76] Jain, A. K.: *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc. (1989)
- [77] Jourdan D.B.: *Wireless Sensor Network Planing with Application to UWB Localization in GPS-denied Environments*, Massachusetts Institute of Technology, PhD thesis, (2000)
- [78] Hernandez H., Blum C.: Minimum Energy Broadcasting in Wireless Sensor Networks: An ant Colony Optimization Approach for a Realistic Antenna Model, *J. of Applied Soft Computing*, **11(8)**, 5684–5694, (2011).
- [79] Kochemberger G., McCarl G., Wymann F.:Heuristic for general inter programming, *J. of Decision Sciences* 5, (1974), 34–44.
- [80] Konstantinidis A., Yang K., Zhang Q., Zainalipour-Yazti D.: A multi-objective Evolutionary Algorithm for the deployment and Power Assignment Problem in Wireless sensor Networks, *J. of Computer networks*, **54(6)**, 960–976, (2010)
- [81] S. KORTESIS AND A. DERMANIS, *An Application of Graph theory to the Optimization of Costs in Trilateration Networks*, *Manuscr. Geod.* 12, (1987) pp. 296–308.
- [82] S. KUANG, *On Optimal Design of Leveling Networks*, *Aus. Surv.* 38, (1993) pp. 257–273.
- [83] S. KUANG, *On Optimal Design of Tree-dimensional Engineering Networks*, *Manuscr. Geod.* 18, (1993) pp. 33–45.
- [84] A. LEICK, *GPS Satellite Surveying*, 2nd. edition,. Wiley, Chichester, England.(1995).
- [85] Leguizamon, G., Michalevich, Z.: *A New Version of Ant System for Subset Problems* In: *Proceedings of Int. Conf. on Evolutionary Computations*, Washington (1999).

- [86] *Lessing, L., I. Dumitrescu, T. Stutzle.* A Comparison between ACO Algorithms for the Set Covering Problem. – In: ANTS Workshop, 2004, 1-12.
- [87] Li, G., Jiang, H., He, T.: A genetic algorithm-based decomposition approach to solve an integrated equipment-workforce-service planning problem. *Omega* **50**, 1–17. (2015)
- [88] Li, R., Liu ,G.: An uncertain goal programming model for machine scheduling problem. *J. Intelligent Manufacturing* **28(3)**, 689–694. 2014
- [89] Martello S., Toth P.: A mixtures of dynamic programming and branch-and-bound for the subset-sum problem, *Management Science*, 30, (1984), 765–771.
- [90] V. K. MATHUR, *How Well do we Know Pareto Optimality?* *J. of Economic Education* **22(2)**, 1991, 172 - 178.
- [91] M. MILLER, H. DRAGERT, E. ENDO, J. FRAYMUELLER, C. GOLDINGER, H. KELSEY, E. HUMPHREYS, D. JOHNSON, R. MCCAFFREY, J. OLDOW, A. QAMAR AND C. RUBIN, *Precise Measurments Help Gauge Pacific Northwest's Earthquake Potential*, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 79, (1998) pp. 267–275.
- [92] Mlsna, Ph. A., Rodriguez, J. J.:Gradient and Laplacian-Type Edge Detection. *Handbook of Image and Video Processing* (Ed. Al Bovik), Academic Press, 415–431. (2000)
- [93] N. MOLYNEAUX, F. HANSELER, M. BIERLAIRE, *Modelling of train-induced pedestrian flows in rail- way stations*, *Proceedings of the Swiss Transportation Research Conference (STRC) 14-16 May, 2014.*
- [94] C. WORONIUK, M. MARINOV, *Simulation Modelling to Analyze the Current Level of Utilization of Sections Along Rail Rout*, *J. of Transport Literature*, textbf7(2), 2013, 235 - 252.
- [95] Molina G., Alba E., Talbi El-G: Optimal Sensor Network Layout Using Multi-Objective Metaheuristics, *Universal Computer Science* **14(15)**, 2549–2565, (2008)

- [96] I. NATIO, Y. HATANAKA, N. MANNOJI, R. ICHIKAWA, S. SHIMADA, T. YABUKI, H. TSJI AND T. TANAKA, *Global Positioning System Project to Improve Japanese Weather Earthkaik Prediction*, EOS Trans. Am. Geophys. Union **79**, (1998) pp. 301–311.
- [97] Ning, Y., Liu, J., Yan, L.: Uncertain aggregate production planning. *Soft Computing* **17(4)**, 617–624. (2013)
- [98] Othman, M., Bhuiyan, N., Gouw, G.: Integrating workers’ differences into workforce planning. *Computers and Industrial Engineering* **63(4)**, 1096–1106. (2012)
- [99] Paek J., Kothari N., Chintalapudi K., Rangwala S., Govindan R.: The Performance of a Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring, In Proc. of 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks, Istanbul, Turkey, Jan 31 – Feb 2, <https://escholarship.org/uc/item/9bf7f3n5>, (2004)
- [100] Mathur V.K.: How Well do we Know Pareto Optimality? *J. of Economic Education* **22(2)**, 172–178, (1991)
- [101] Parisio, A, Jones, CN.: A two-stage stochastic programming approach to employee scheduling in retail outlets with uncertain demand. *Omega* **53**, 97–103. (2015)
- [102] Pottie G.J., Kaiser W.J.: Embedding the Internet: Wireless Integrated Network Sensors, *Communications of the ACM*, **43(5)**, 51–58, (2000)
- [103] Pratt, W. K.: *Digital Image Processing*. Second ed., John Wiley & Sons, (1991)
- [104] *Reiman, M., M. Laumanns*. A Hybrid ACO Algorithm for the Capacitated Minimum Spanning Tree Problem. – In: First Int. Workshop on Hybrid Metaheuristics. Valencia, Spain, 2004, 1-10.
- [105] Roeva, O., Vassilev P., InterCriteria Analysis of Generation Gap Influence on Genetic Algorithms Performance, *Advances in Intelligent Systems and Computing* **401**, 301–313 (2016)
- [106] Roeva O., Fidanova S., Luque G., Paprzycki M., InterCriteria Analysis of ACO Performance for Workforce Planing Problem, *Studiec in Computational Intelligence* **795**, 2019, 47-68.

- [107] Roeva O., Fidanova S.. Different InterCriteria Analysis of Variants of ACO algorithm for Wireless Sensor Network Positioning. *Studies in Computational Intelligence*, 838, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-22723-4, 83-103.
- [108] Roeva O., Fidanova S., Ganzha M., InterCriteria Analysis of the Evaporation Parameter Influence on Ant Colony Optimization Algorithm: A Workforce Planing Problem, *Studies in Computational Intelligence* 920, 2021, 89-110.
- [109] Romer K., Mattern F.: The Design Space of Wireless Sensor Networks, *IEEE Wireless Communications*, **11(6)**, 54–61, (2004)
- [110] Saleh H.A.: Ants Can Successfully Design GPS Surveying Networks, *GPS World* **9**, 48–60 (2002)
- [111] Saleh H. A., and Dare P.: Effective Heuristics for the GPS Survey Network of Malta: Simulated Annealing and Tabu Search Techniques. *Journal of Heuristics* **7(6)**, 533–549 (2001)
- [112] Sinha A., Zoltner A. A. : The multiple-choice knapsack problem, *J. of Operational Research*, 27, (1979), 503–515.
- [113] Soukour, A., Devendeville, L., Lucet, C., Moukrim, A.: A Memetic algorithm for staff scheduling problem in airport security service. *Expert Systems with Applications* **40(18)**, 7504–7512. (2013)
- [114] *Stutzle, T. M. Dorigo.* ACO Algorithm for the Travelling Salesman Problem, – In: K. Miettinen, M. Makela, P. Neittaanmaki, J. Periaux, (Eds), *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*. Wiley, 1999, 163-183.
- [115] *Stutzle, T., H. H. Hoos.* MAX-MIN Ant System. – In: M. Dorigo, T. Stutzle, G. Di Caro (Eds). *Future Generation Computer Systems*. Vol 16. 2000, 889-914.
- [116] Verhulst, P.F.: A Note on the Law of Population Growth. *Correspondence Mathematiques et Physiques*, **10**, 113–121, (1938) (in French).

- [117] D. WELLS, W. LINDLOHR, B. SCHAFFRIN AND E. GRAFAREND, *GPS Design: Undifferenced Carrier Beat Phase Observations and the Fundamental Differencing Theorem*, Tech. Rep. 116, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, (1987).
- [118] Werner-Allen G., Lorinez K., Welsh M., Marcillo O., Jonson J., Ruiz M., J.Lees J.: Deploying a Wireless Sensor Nnetwork on an Active Volcano, *IEEE Internet Computing* **10(2)**, 18–25, , (2006)
- [119] Wolf S., Mezz P.: Evolutionary Local Search for the Minimum Energy Broadcast Problem, in C. Cotta, J. van Hemez (eds.), *VOCOP 2008*, Lecture Notes in Computer Sciences **4972**, Springer, Germany, 61–72, (2008)
- [120] Xu Y., Heidemann J., Estrin D.: Geography Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing, *Proceedings of the 7th ACM/IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Italy, 70–84, (2001)
- [121] Yang, G., Tang, W., Zhao, R.: An uncertain workforce planning problem with job satisfaction. *Int. J. Machine Learning and Cybernetics*, Springer, doi:10.1007/s13042-016-0539-6, (2016)
- [122] Yuce M.R., Ng S.W., Myo N.L., Khan J.Y., Liu W.: Wireless Body Sensor Network Using Medical Implant Band, *Medical Systems* **31(6)**, 467–474, (2007)
- [123] Zadeh, L. Fuzzy Sets. *Inf. Control.* **1968**, *12*, 94–102.
- [124] Zeng, J., Li, Y.: The Use of Adaptive Genetic Algorithm for Detecting Kiwifruit’s Variant Subculture Seedling. *Int. J. Bioautomation* **21(4)**, 349–356. (2017)
- [125] *Zhang, T., S. Wang, W. Tian, Y. Zhang.* ACO-VRPTWRV: A New Algorithm for the Vehicle Routing Problems with Time Windows and Re-Used Vehicles Based on Ant Colony Optimization. – In: *Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. IEEE Press, 2006, 390-395.

- [126] Zhou, P., Ye, W. Q., Wang Q.: An Improved Canny Algorithm for Edge Detection. *Journal of Computational Information Systems*, **7(5)**, 1516–1523 (2011)
- [127] Zhou, C., Tang, W., Zha,o R.: An uncertain search model for recruitment problem with enterprise performance, *J Intelligent Manufacturing*, **28(3)**, Springer, 295–704. (2014)