

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Снігур Ольга Олексіївна

УДК 004.891.2:550.8.052

ДИСЕРТАЦІЯ
НЕЧІТКІ МОДЕЛІ РОДОВИЩ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА МЕТОДИ
ОЦІНЮВАННЯ ЇХНЬОГО СТАНУ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. О. Снігур

Науковий керівник Кондратенко Наталія Романівна, кандидат технічних наук,
доцент

Вінниця – 2018

АНОТАЦІЯ

Снігур О. О. Нечіткі моделі родовищ підземних вод та методи оцінювання їхнього стану за умов невизначеності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення обґрунтованості оцінок стану родовищ підземних вод шляхом розробки агрегованої моделі родовища підземних вод та методу оцінювання його стану за умов невизначеності на основі інтервальних нечітких множин типу 2.

Родовище підземних вод як об'єкт спостережень має низку особливостей, які породжують невизначеність та ускладнюють будь-які точні оцінки під час аналізу гідрогеологічних даних. Для математичного опису таких складних природних систем, як правило, недостатньо сформулювати один аналітичний закон, і про характер їхньої роботи можна судити лише за вибіркою експериментальних даних, або ж на основі емпіричних знань експерта. Щодо моделей родовищ ставиться вимога адекватного відображення об'єкта на будь-якому етапі його дослідження, навіть за умов недостатньої поінформованості особи, що приймає рішення, про значення вхідних змінних. Це зумовлює актуальність розробки нових математичних моделей родовищ підземних вод та методів оцінювання їхнього стану, які дадуть змогу враховувати та моделювати невизначеності, присутні у вхідних даних, та отримувати змістовні результати на ранніх етапах дослідження родовища.

Запропоновано агреговану нечітку модель родовища підземних вод за умов невизначеності на основі інтервальних нечітких множин типу 2, яка володіє властивістю відображати та моделювати невизначеності, в тому числі й ті, що зумовлені недостатньою поінформованістю особи, що приймає рішення, про значення вхідних змінних. Її основною функціональною частиною є інтервальна

нечітка логічна система з m вхідними змінними x_1^z, \dots, x_m^z та однією вихідною змінною Y . Вхідний вектор може містити лише частину даних про артезіанську свердловину через недостатню поінформованість особи, що приймає рішення, про значення вхідних змінних: $x_i^z \in \emptyset, i = 1, \dots, k, k < m$. У гідрогеологічних дослідженнях це досить поширена ситуація, оскільки деякі параметри можуть бути недоступними для безпосередніх спостережень, особливо на ранніх етапах дослідження.

Вхідний вектор подається на вхід моделі без змін, а також пройшовши через процедуру виділення інформативних ознак. Ця процедура може виконуватись одним або кількома експертами з предметної галузі. В разі, коли експертів декілька, кожен із них генерує свій набір ознак, та як наслідок окрему модель. Інтервальний вихід нечіткої моделі за повним вхідним вектором та виходить з результатуючих моделей після відкидання неінформативних ознак об'єднуються за агрегуючим критерієм, який дає інтервальну оцінку значення вихідної змінної на основі множини моделей.

У ролі джерела вхідних ознак для однієї з підмоделей запропоновано метод автоматичного вибору інформативних ознак як альтернативу експерту. В його основі лежить генетичний алгоритм пошуку інформативних ознак із кластеризацією.

Розроблена математична модель допускає існування альтернативних підмоделей на основі інших методів прийняття рішень або формальних процедур, що вже існують для розв'язання поставленої задачі. У випадку її використання в задачі оцінювання стану артезіанської свердловини альтернативна модель слугує для спостереження за змінами стану свердловини з плином часу шляхом контролю зміни положення об'єкта-свердловини відносно компактних груп свердловин навчальної вибірки. Модель застосовується на завершальному етапі проведення геологорозвідувальних робіт та в подальшому процесі спостереження за свердловиною, та має за основу процедуру прийняття рішень на основі методу кластерного аналізу, а саме модифікованого методу кластеризації Possibilistic C-Means (PCM) з інтервальним виходом. Удосконалення методу PCM полягає в

розширенні його можливостей шляхом введення інтервальних ступенів належності, що дає змогу враховувати та моделювати невизначеності, пов'язані з браком експертних знань.

Математичний опис цих невизначеностей стає можливим завдяки поданню рівня нечіткості в інтервальній формі шляхом виявлення його граничних значень за низкою критеріїв якості кластеризації. Інтервальні ступені належності дають змогу враховувати та моделювати невизначеності, пов'язані з браком експертних знань, характерним для моделей на основі навчання без учителя. Врахування та моделювання невизначеностей, закладених у вихідному наборі даних, у підмножині випадків дає змогу помітити тенденції та зміни в характері процесів, що протікають у родовищі підземних вод, на стадії їхнього формування.

Крім того, перевагою цього підходу є можливість працювати з кількома вхідними векторами одночасно. Одночасне подання на вхід моделі даних кількох свердловин може дати змогу оцінити не лише їхнє розташування щодо стандартних компактних класів, але й взаємне розташування.

Експериментальні дослідження функціональних можливостей запропонованих моделей та методів у задачі оцінювання стану артезіанської свердловини на різних етапах гідрогеологічної розвідки показали, що агрегована нечітка модель родовища підземних вод дає можливість отримати змістовні результати як на завершальному, так і на проміжних етапах геологорозвідувальних робіт. У деяких випадках результати дають змогу вже на початку геологорозвідувальних робіт зрозуміти, що подальша робота на вибраній ділянці пов'язана з певними труднощами. На основі цієї інформації можуть бути проведені додаткові дослідження та прийняте рішення про припинення робіт, що дозволить зберегти суттєві матеріальні та людські ресурси.

На основі запропонованих моделей та методів створено програмне забезпечення для оцінювання перспективності артезіанської свердловини.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше запропоновано математичну модель родовища підземних вод на основі інтервальних нечітких множин типу 2, яка, на відміну від відомих,

передбачає агрегацію множини моделей, які формуються на основі знань експертів, за агрегуючим критерієм, що забезпечує підвищення обґрунтованості отриманих оцінок за умов невизначеності.

2. Вперше запропоновано метод виділення інформативних ознак набору експериментальних даних стану родовища підземних вод, який, на відміну від відомих, передбачає скорочення кількості ознак цього стану по завершенні оптимізаційної процедури, що дає змогу посилити контроль експерта за ознаками, які відкидаються, і тим самим забезпечити підвищення обґрунтованості отриманих оцінок стану родовища підземних вод.

3. Вдосконалено метод кластеризації Possibilistic C-Means шляхом введення узагальненої інтервальної оцінки за трьома критеріями якості, що забезпечує підвищення обґрунтованості оцінок перспективності родовищ підземних вод.

Безпосереднє практичне значення результатів, отриманих у ході дисертаційного дослідження, полягає в тому, що:

1. Створено нечітку базу знань на основі експериментальних даних артезіанських свердловин.

2. Розроблено нечітку логічну систему типу 1, яка може використовуватись не лише для оцінювання стану родовищ підземних вод, але й у низці інших задач, зокрема для оцінювання якості зображень.

3. Розроблено алгоритм отримання виходу агрегованої моделі родовища підземних вод за умов невизначеності.

4. Розроблено алгоритм автоматизованого виділення інформативних ознак набору експериментальних даних з урахуванням експертних знань.

5. Модифіковано алгоритм кластеризації Possibilistic C-Means з інтервальними ступенями належності.

6. Створено програмне забезпечення для оцінювання перспективності артезіанської свердловини за умов невизначеності.

Отримані наукові результати доповнюють та розширюють відомі нечіткі моделі родовищ підземних вод і методи оцінювання їхнього стану. Розроблена модель та методи надають можливості для більш адекватного опису родовища на

ранніх етапах роботи з ним, коли дослідник не володіє повним вектором даних. Вони дають змогу оцінити перспективи подальшої роботи зі свердловиною та виявити випадки, коли її експлуатація пов'язана з різного роду труднощами. Запропоновані моделі артезіанських свердловин для оцінювання їхньої перспективності, поточного стану та періодичного спостереження можуть використовуватись у довготривалих програмах вивчення родовищ підземних вод задля скорочення терміну прийняття рішень про доцільність їхньої подальшої експлуатації та заощадження необхідних для цього ресурсів. Зокрема, в роботі показано застосування отриманих результатів на проміжних етапах геологічної розвідки для наближеного оцінювання перспективності видобутку підземних вод.

Наукові результати дисертаційного дослідження впроваджено в практичну діяльність Правобережної геологічної експедиції ДП «Українська геологічна компанія», а також у навчальний процес кафедри захисту інформації Вінницького національного технічного університету.

Ключові слова: інтервальні нечіткі множини типу 2, нечітка модель, підземні води, невизначеність, кластерний аналіз, інтервальні ступені належності.

ABSTRACT

Snihur O. O. Fuzzy models of groundwater deposits and methods of evaluating their state under conditions of uncertainty. – Qualification scientific work published as a manuscript.

Thesis applying for the Ph.D. degree in specialty 01.05.02 – Mathematical Modeling and Computation Methods. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018.

The purpose of the thesis research is improving validity of groundwater deposits state evaluations by developing an aggregated groundwater deposit model and a method for deposit state evaluation under conditions of uncertainty based on interval type-2 fuzzy sets.

A groundwater deposit as an observation object has a number of special features creating uncertainty and making any precise estimations during hydrogeological data analysis impossible. For a mathematical description of natural systems of such complexity it does not usually suffice to state a single analytical function, and it is only possible to judge the way they work based on a data set of experimental data, or on an expert's empirical knowledge. Deposit models are presented with the requirement to adequately reflect the object on every stage of the research, even under a condition of the decision maker being not sufficiently informed about the values of input variables. This causes the importance of developing new mathematical models of groundwater deposits and methods of evaluating their state using interval type-2 fuzzy sets that allow to account for and model the uncertainties present in the input data, and to obtain meaningful results on earlier stages of deposit research.

An aggregated fuzzy groundwater deposit model under conditions of uncertainty based on interval type-2 fuzzy sets is proposed, which has a capability to reflect and model uncertainties, including those caused by the decision maker being not sufficiently informed about part of the input variables' values. Its main functional component is an interval fuzzy logic system with m input variables x_1^z, \dots, x_m^z and one output variable Y .

The input vector may contain only partial data about an artesian well, resulting from the decision maker being not sufficiently informed about the values of input variables: $x_i^z \in \emptyset, i = 1, \dots, k, k < m$. This is a frequently occurring situation in hydrogeological research, since some of the parameters may not be accessible for direct observation, especially on early stages of the research.

An input vector is presented to the interval fuzzy logic system unmodified, as well as after passing through an informative feature selection procedure. This procedure may be performed by one or more experts in the subject area. In case more than one expert is available, each of them generates their own feature subset, and as a result a separate model. The interval output of the fuzzy logic system obtained on the complete input vector and the outputs of models resulting from discarding uninformative features are combined according to an aggregating criterion, which provides an interval estimation of the output variable value based on a set of models.

As a source of input features for one of the submodels a method of automatic informative feature selection is proposed as an alternative to an expert. It is based on a informative feature search genetic algorithm with clustering.

The developed mathematical model allows for integration of alternative submodels based on other decision making technologies or formal procedures that may already exist for solving the given task. In case of its use for the task of artesian well state evaluation the alternative model serves for monitoring changes in a well's state in time by controlling changes in well object position relative to compact groups of training set wells. The model is utilized on the final stage of hydrogeological research and in further monitoring process, and is based on a decision making procedure with a cluster analysis method, namely the modified Possibilistic C-Means (PCM) clustering method with an interval output. The improvement of the PCM method lies in expanding its capabilities by introducing interval membership grades. This allows to account for and model uncertainties related to missing expert knowledge.

Mathematical description of these uncertainties becomes possible due to presenting the degree of fuzziness in interval form by detecting its margin values according to a number of clustering validity indices. Interval membership grades allow to account for

and model uncertainties related to missing expert knowledge, which are characteristic for models based on unsupervised learning. Accounting for and modeling uncertainties inherent in the source data set allows in a number of cases to spot trends and changes in the processes taking place in a groundwater deposit as they originate.

Another advantage of this approach is the ability to work with several input vector simultaneously. Presenting data of several wells to the system's input may not only allow to estimate their position relative to standard compact classes, but also to evaluate their mutual positions, and eventually point to a previously undiscovered pattern.

Experimental testing of the proposed models and methods' functional capabilities in evaluating artesian wells on various stages of hydrogeological research has displayed that the aggregated groundwater deposit fuzzy model allows to receive meaningful results on the final stage, as well as on intermediate stages of geological exploration. In a number of cases the results allow to understand that further operation at the selected site may face certain challenges, and this conclusion may already be reached at the beginning of hydrogeological research. Based on this information, additional research may be conducted and a decision to halt the operations taken, which would allow to spare significant cost on materials and human resources.

Based on the proposed models and methods artesian well prospect evaluation software was developed. Scientific novelty of obtained results is as follows.

1. A groundwater deposit mathematical model based on interval type-2 fuzzy sets is first proposed, which, unlike the existing ones, provides aggregation of a set of models formed based on expert knowledge according to an aggregating criterion, that ensures increased validity of obtained estimations under conditions of uncertainty.

2. A method of informative feature selection in an experimental data set is first proposed, which, unlike the existing ones, involves reducing the number of features at the end of the optimization procedure, that allows to increase an expert's control over features being rejected, and thus improve validity of obtained groundwater deposit state estimations.

3. The Possibilistic C-Means (PCM) clustering method is improved by introducing a generalized interval estimation according to three validity indices, which ensures

improved validity of obtained groundwater deposits state monitoring results.

Direct practical value of the results received within the scope of this research is as follows.

1. A fuzzy knowledge base obtained from experimental data of artesian wells was created.

2. A type-1 fuzzy logic system was developed, which, along with estimating groundwater deposits states, may also be utilized in a number of other applications, including image quality evaluation.

3. An algorithm of obtaining the output value of an artesian well model under conditions of uncertainty was developed.

4. An algorithm of automated informative feature selection on an experimental data set with taking expert knowledge into account was developed.

5. Possibilistic C-Means clustering algorithm was modified to produce interval membership grades.

6. Software for artesian well prospect evaluation under conditions of uncertainty was created.

The obtained scientific results extend and improve known fuzzy models of groundwater deposits and methods of evaluating their state by providing more complete information on the output value's nature by accounting for the level of uncertainty inherent in the received values. The developed model and methods provide the capabilities for a more adequate description of a deposit on earlier stages of its evaluation, when an explorer does not possess a full input vector. They allow to estimate the prospect of further research of a well and detect cases when its operation may be hindered by various factors. The proposed models for evaluating prospects, current state and periodical monitoring of artesian wells may be utilized in long-term studies of natural processes in order to shorten the decision making timelines and to spare resources required for it. In particular, a use case of obtained results on intermediate stages of hydrogeological research for evaluating groundwater mining prospects is shown in the thesis.

Scientific results of the thesis research are implemented at the Pravoberezhna

heolohichna ekspeditsiya, “Ukrayinska Heolohichna Kompaniya” SE and the learning process of the Information Security Department, Vinnytsia National Technical University.

Keywords: interval type-2 fuzzy sets, fuzzy model, groundwater, uncertainty, cluster analysis, interval membership grades.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСУ РОДОВИЩ ПІДЗЕМНИХ ВОД	Error! Bookmark not defined.
1.1 Особливості родовища підземних вод як об'єкта моделювання	Error! Bookmark not defined.
1.2 Аналіз сучасних моделей для опису родовищ підземних вод.....	Error! Bookmark not defined.
1.3 Моделі для опису родовищ підземних вод на основі нечітких множин ...	Error! Bookmark not defined.
1.3.1 Нечіткі множини як засіб урахування експертних знань ..	Error! Bookmark not defined.
1.3.2 Нечіткі моделі для опису родовищ підземних вод.....	Error! Bookmark not defined.
1.3.3 Моделі для опису родовищ підземних вод за умов невизначеності....	Error! Bookmark not defined.
1.3.4 Інтервальні нечіткі множини типу 2 як засіб урахування невизначеностей	Error! Bookmark not defined.
1.4 Моделі та методи для опису родовищ підземних вод на основі кластерного аналізу.....	Error! Bookmark not defined.
1.5 Вибір напряму і постановка задач дослідження .	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 2 НЕЧІТКІ МОДЕЛІ РОДОВИЩ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ	Error! Bookmark not defined.
2.1. Нечітка модель родовища підземних вод типу 1 на основі нечіткого логічного висновку	Error! Bookmark not defined.
2.2 Нечітка модель родовища підземних вод типу 2 на основі нечіткого логічного висновку	Error! Bookmark not defined.
2.2.1 Інтервальна нечітка модель родовища підземних вод	Error! Bookmark not defined.

2.2.2. Інтервальна нечітка модель родовища підземних вод з використанням методу виділення інформативних ознак..... **Error! Bookmark not defined.**

2.2.3. Оцінка обчислювальної складності методу виділення інформативних ознак **Error! Bookmark not defined.**

2.3 Агрегована нечітка модель родовища підземних вод на основі інтервальних нечітких множин **Error! Bookmark not defined.**

2.4 Висновки **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 3 НЕЧІТКА МОДЕЛЬ РОДОВИЩА ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ **Error! Bookmark not defined.**

3.1 Метод інтервального нечіткого кластерного аналізу для оцінювання стану родовищ підземних вод за умов невизначеності **Error! Bookmark not defined.**

3.2 Модель на основі інтервального нечіткого кластерного аналізу для оцінювання перспективності стану родовища підземних вод **Error! Bookmark not defined.**

3.3 Висновки **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ РОДОВИЩ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЇХНЬОГО СТАНУ **Error!**

4.1 Експериментальне дослідження нечіткої моделі родовища підземних вод типу 1 на основі нечіткого логічного висновку **Error! Bookmark not defined.**

4.1.1 Експериментальне дослідження нечіткої моделі родовища підземних вод типу 1 за умов невизначеності **Error! Bookmark not defined.**

4.2 Експериментальне дослідження нечіткої моделі родовища підземних вод типу 2 **Error! Bookmark not defined.**

4.3 Експериментальне дослідження моделі родовища підземних вод типу 2 на основі нечіткого логічного висновку з виділенням інформативних ознак **Error! Bookmark not defined.**

4.3.1 Експериментальне дослідження методу виділення інформативних ознак **Error! Bookmark not defined.**

4.3.2 Оцінювання якості отриманих моделей за умов невизначеності **Error! Bookmark not defined.**

4.4 Експериментальне дослідження моделі артезіанської свердловини на основі методу інтервального нечіткого кластерного аналізу	Error! Bookmark not defined.
4.5 Програмний засіб для підтримки оцінювання перспективності артезіанської свердловини	Error! Bookmark not defined.
4.6 Висновки	Error! Bookmark not defined.
ВИСНОВКИ	Error! Bookmark not defined.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	22
ДОДАТКИ	Error! Bookmark not defined.
Додаток А Параметри гідрогеологічного дослідження	Error! Bookmark not defined.
Додаток Б Навчальний набір даних	Error! Bookmark not defined.
Додаток В Параметри нечіткої моделі типу 1	Error! Bookmark not defined.
Додаток Г Результати роботи нечіткої моделі типу 1	Error! Bookmark not defined.
Додаток Д Тестовий набір даних	Error! Bookmark not defined.
Додаток Е Результати роботи нечіткої моделі типу 1 за умов недостатньої поінформованості особи, що приймає рішення, про значення вхідних змінних	Error! Bookmark not defined.
Додаток Ж Інтервальні функції належності	Error! Bookmark not defined.
Додаток К Результати роботи нечіткої моделі типу 2 за умов недостатньої поінформованості особи, що приймає рішення, про значення вхідних змінних	Error! Bookmark not defined.
Додаток Л Дослідження методів виділення інформативних ознак	Error! Bookmark not defined.
Додаток М Результати роботи агрегованої нечіткої моделі родовища підземних вод	Error! Bookmark not defined.
Додаток Н Результати інтервального нечіткого кластерного аналізу	Error! Bookmark not defined.
Додаток П Лістинги програм	Error! Bookmark not defined.

- Лістинг реалізації генерування правил нечіткої бази знань з експериментальних даних..... **Error! Bookmark not defined.**
- Лістинг реалізації перетворення функцій належності в інтервальну форму **Error! Bookmark not defined.**
- Лістинг реалізації побудови нечіткого логічного висновку на основі інтервальних нечітких множин **Error! Bookmark not defined.**
- Лістинг реалізації автоматизованого методу виділення інформативних ознак **Error! Bookmark not defined.**
- Лістинг реалізації отримання виходу агрегованої нечіткої моделі родовища **Error! Bookmark not defined.**
- Лістинг реалізації методу інтервального нечіткого кластерного аналізу **Error! Bookmark not defined.**
- Додаток Р Список публікацій за темою дисертації .. **Error! Bookmark not defined.**
- Додаток С Впровадження результатів дисертаційного дослідження..... **Error! Bookmark not defined.**

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У багатьох сучасних дослідницьких програмах та виробничих процесах виникає необхідність побудови багатовимірних моделей складних природних об'єктів, які б із достатньою повнотою та обґрунтованістю характеризували досліджуваний об'єкт або природне явище. Такі моделі вимагають відповідного математичного апарату для роботи за умов невизначеності. Прикладами природних об'єктів такого роду є родовище підземних вод та артезіанська свердловина, яка дає змогу отримати точкові дані про характер гідрогеологічних процесів у родовищі. Для математичного опису таких систем, як правило, недостатньо сформулювати один аналітичний закон, і про характер їхньої роботи можна судити лише за вибіркою експериментальних даних, або ж на основі емпіричних знань експерта.

Родовище підземних вод як об'єкт спостережень має низку особливостей, які породжують невизначеність та унеможливлюють будь-які точні оцінки в процесі аналізу гідрогеологічних даних. Автоматичних чи автоматизованих систем, які б виконували функцію моделювання процесів та явищ, які виникають у свердловині, чи надавали б підтримку в прийнятті рішень, на сьогоднішній день не існує. Але підходи на основі математичного апарату нечітких множин надають потужний інструментарій для опису та моделювання залежностей у системах, що не піддаються повній формалізації. В основі нечітких моделей лежить процес формалізації причинно-наслідкових зв'язків між вхідними та вихідними змінними шляхом їхнього опису природною мовою з застосуванням нечітких множин та лінгвістичних змінних. Це досягається за допомогою функції належності, яка ставить у відповідність кожному елементу універсальної множини число з інтервалу $[0, 1]$, що означає ступінь належності. Поняття функції належності є узагальненням поняття характеристичної функції чіткої множини, яка оперує значеннями $\{0, 1\}$. Тому основні властивості та операції над нечіткими множинами являють собою узагальнення відповідних властивостей та операцій класичної

теорії множин. Подальше узагальнення поняття функції належності привело до появи нечітких множин типу 2 та множин вищих порядків. Узагальнена нечітка множина визначається функціями належності, в ролі значень яких також виступають нечіткі множини. Проте побудова моделей на основі узагальнених нечітких множин пов'язана зі значною обчислювальною складністю, тому на практиці використовується їхнє інтервальне подання. Методи на основі інтервальних нечітких множин типу 2 на сьогоднішній день є поширеним засобом опису та моделювання невизначеностей, у тому числі таких, що пов'язані з недостатньою поінформованістю особи, що приймає рішення, про значення вхідних змінних моделі. Про перспективність цього підходу також свідчить кількість публікацій та різноманітних інтервальних нечітких моделей, запропонованих за останні роки.

Таким чином, існує великий клас дослідницьких та виробничих задач, що вимагають побудови математичних моделей складних природних об'єктів; до таких об'єктів належать родовища підземних вод. Щодо моделей родовищ ставиться вимога адекватного відображення об'єкта на будь-якому етапі його дослідження, навіть за умови наявності невизначеностей у вхідних даних. Це зумовлює актуальність розробки нових моделей родовищ підземних вод та методів оцінювання їхнього стану, які дадуть змогу враховувати та моделювати невизначеності, присутні у вхідних даних, та отримувати змістовні результати на ранніх етапах дослідження родовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри захисту інформації Вінницького національного технічного університету, зокрема дисертаційне дослідження пов'язане з кафедральною науково-дослідною темою № 51 К1 «Комплексна інформаційна безпека соціокомунікаційних систем», а також із науково-дослідною роботою «Розробка системи експертного оцінювання запасів підземних вод» (номер державної реєстрації 0015U007125), автор роботи є відповідальним виконавцем науково-дослідної роботи.

Основні задачі дисертації відповідають державним науково-технічним

програмам, що визначені Законами України № 1977-ХІІ «Про наукову і науково-технічну діяльність», № 74/98-ВР «Про національну програму інформатизації» та державній науково-технічній програмі України за пріоритетним напрямком 6. «Інформатика, автоматизація і приладобудування».

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження є підвищення обґрунтованості оцінок стану родовищ підземних вод шляхом розробки агрегованої моделі родовища підземних вод та методу оцінювання його стану за умов невизначеності на основі інтервальних нечітких множин типу 2.*

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання.

1. Розглянути наукові першоджерела для критичного аналізу існуючих моделей складних природних об'єктів та методів оцінювання їхнього стану за умов невизначеності.

2. Розробити модель родовища підземних вод на основі інтервальних нечітких множин типу 2, яка складається з множини моделей, сформованих на основі знань експертів. Запропонувати агрегуючий критерій прийняття рішення на основі виходів множини моделей.

3. Розробити автоматизований метод виділення інформативних ознак набору експериментальних даних, що враховує знання експерта про предметну галузь.

4. Розробити вдосконалену форму методу кластеризації РСМ (Possibilistic C-Means) на основі узагальненої інтервальної оцінки за різними критеріями якості для більш повного врахування невизначеностей, пов'язаних із браком експертних знань.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання стану родовищ підземних вод за умов невизначеності.

Предметом дослідження є нечіткі моделі та методи оцінювання стану родовищ підземних вод за умов невизначеності на основі інтервальних нечітких множин типу 2.

Методи дослідження базуються на основних положеннях теорії нечітких множин (для формалізації причинно-наслідкових зв'язків між вхідними та вихідними змінними моделі та побудови процесу прийняття рішень шляхом

побудови нечіткого логічного висновку на основі інтервальних нечітких множин типу 2), теорії оптимізації та еволюційних обчислень (для налаштування параметрів функцій належності вхідних змінних нечітких моделей), інтелектуального аналізу даних (для оптимізації множини вхідних змінних нечітких моделей типу 1 та 2, а також для побудови самостійної моделі прийняття рішення про зміни в характері функціонування родовища в часі).

В процесі досліджень використовувалась математична система MATLAB, програмний пакет Statistica 13, середовище розробки Microsoft Visual Studio та мова програмування C#.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше запропоновано модель родовища підземних вод на основі інтервальних нечітких множин типу 2, яка, на відміну від відомих, передбачає агрегацію множини моделей, які формуються на основі знань експертів, за агрегуючим критерієм, що забезпечує підвищення обґрунтованості отриманих оцінок за умов невизначеності.

2. Вперше запропоновано метод виділення інформативних ознак набору експериментальних даних стану родовища підземних вод, який, на відміну від відомих, передбачає скорочення кількості ознак цього стану по завершенні оптимізаційної процедури, що дає змогу посилити контроль експерта за ознаками, які відкидаються, і тим самим забезпечити підвищення обґрунтованості отриманих оцінок стану родовища підземних вод.

3. Вдосконалено метод кластеризації Possibilistic C-Means шляхом введення узагальненої інтервальної оцінки за трьома критеріями якості, що забезпечує підвищення обґрунтованості оцінок перспективності родовищ підземних вод.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення результатів, отриманих у ході дисертаційного дослідження, полягає в тому, що:

1. Створено нечітку базу знань на основі експериментальних даних артезіанських свердловин.

2. Розроблено нечітку логічну систему типу 1, яка може використовуватись не лише для оцінювання стану родовищ підземних вод, але й у низці інших задач,

зокрема для оцінювання якості зображень.

3. Розроблено алгоритм отримання виходу агрегованої моделі родовища підземних вод за умов невизначеності.

4. Розроблено алгоритм автоматизованого виділення інформативних ознак набору експериментальних даних з урахуванням експертних знань.

5. Модифіковано алгоритм кластеризації Possibilistic C-Means з інтервальними ступенями належності.

6. Створено програмне забезпечення для оцінювання перспективності артезіанської свердловини за умов невизначеності.

На логічну частину розробленого програмного забезпечення отримано свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір [65], [66].

Отримані наукові результати доповнюють та розширюють відомі нечіткі моделі родовищ підземних вод і методи оцінювання їхнього стану. Розроблена математична модель та методи надають можливості для більш адекватного опису родовища на ранніх етапах роботи з ним, коли дослідник не володіє повним вектором даних, дають змогу оцінити перспективи подальшої роботи зі свердловиною та виявити випадки, коли її експлуатація пов'язана з різного роду труднощами. Запропоновані моделі артезіанських свердловин для оцінювання їхньої перспективності, поточного стану та періодичного спостереження можуть використовуватись у довготривалих програмах вивчення родовищ підземних вод задля скорочення терміну прийняття рішень про доцільність їхньої подальшої експлуатації та заощадження необхідних для цього ресурсів.

Наукові результати дисертаційного дослідження впроваджено в практичну діяльність Правобережної геологічної експедиції ДП «Українська геологічна компанія», а також у навчальний процес кафедри захисту інформації Вінницького національного технічного університету.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, викладені в роботі, отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: метод кластеризації на основі інтервальних функцій належності типу 2 з використанням критерію якості Квона [25], запропоновано

метод кластеризації на основі інтервальних функцій належності та критеріїв якості Квона, Хіе-Бені та індексу розбиття [29], виконано адаптацію методу інтервального нечіткого кластерного аналізу до прикладної задачі моніторингу стану підземних вод [30], створено нечітку базу знань на основі експериментальної вибірки зображень [24], побудовано нечіткий класифікатор для аналізу цілісності зображень [33], побудовано нечітку логічну систему на основі нечітких множин типу 1 та виконано налаштування її параметрів за допомогою генетичного алгоритму [38], виконано аналіз артезіанської свердловини як галузі прикладного застосування математичних моделей на основі нечітких множин та запропоновано моделі в розрізі якості води, перспектив освоєння та ступеня вивченості свердловини [37], запропоновано нечітку логічну систему типу 2 для класифікації зразків води за можливим призначенням [34], запропоновано математичну модель родовища підземних вод для оцінювання їхніх запасів на ранніх етапах розвідки [68], побудовано систему підтримки прийняття рішень на гідрогеологічних даних за умов невизначеності [32], запропоновано автоматизований метод пошуку інформативних ознак на основі генетичного алгоритму [27], запропоновано метод виділення інформативних ознак з використанням експериментальних даних та експертних знань [28], побудовано агреговану модель артезіанської свердловини для оцінювання її стану за умов невизначеності та запропоновано критерій отримання вихідного інтервалу моделі [31], [174]. У роботі [138] автору належить експериментальне підтвердження доцільності використання нечітких множин типу 2 в моделях, що оперують неповністю визначеними вхідними даними.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і наукові результати, викладені в роботі, пройшли апробацію на науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції SAIT 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, Четвертій Міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» та Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)». Дисертаційну роботу було представлено на науковому семінарі відділу методів

комбінаторної оптимізації та інтелектуальних інформаційних технологій Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України 12 березня 2018 р.

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано 15 наукових праць, з них 7 статей в наукових фахових виданнях України, серед яких 2 у виданні, включеному до наукометричної бази Scopus та 1 – у виданні, включеному до Web of Science Core Collection, а також 8 робіт у матеріалах і тезах доповідей міжнародних наукових конференцій. Отримано 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (191 найменування) і 14 додатків. Основний зміст викладено на 122 сторінках друкованого тексту, містить 33 рисунки, 9 таблиць. Загальний обсяг дисертації 210 сторінок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А. Е. Алтунин, и М. В. Семухин, *Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях*. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000.
- [2] С. Л. Блюмин, и И. А. Шуйкова, *Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности*. Липецк: ЛЭГИ, 2001.
- [3] Б. В. Боревский, Н. И. Дробноход, и Л. С. Язвин, *Оценка запасов подземных вод*. К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989.
- [4] А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, и И. П. Федоров, *Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования*. Рига: Зинатне, 1990.
- [5] Держспоживстандарт України. *Води мінеральні питні. Технічні умови: ДСТУ 878-93*, 1993, 90 с.
- [6] Д. А. Вятчин, *Нечеткие методы автоматической классификации: Монография*. Мн.: УП «Технопринт», 2004.
- [7] Ю. И. Галушкина, и А. Н. Марьямов, *Конспект лекций по дискретной математике*. М.: Айрис-Пресс, 2007.
- [8] Л. Х. Гитис, *Статистическая классификация и кластерный анализ*. М.: МГГУ, 2003.
- [9] Л. Ф. Гуляницький, та О. Ю. Мулеса, *Прикладні методи комбінаторної оптимізації: навч. посіб.* К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016.
- [10] П. Е. Данко, А. Г. Попов, и Г. Я. Кожевникова, *Высшая математика в упражнениях и задачах*. М.: Высш. шк., 1986.
- [11] В. М. Дубовой, та О. В. Глонь, *Модельовання систем керування за умов невизначеності: монографія*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
- [12] Б. Дюран, и П. Оделл, *Кластерный анализ*. М.: Статистика, 1977.
- [13] М. Жамбю, *Иерархический кластер-анализ и соответствия*. М.: Финансы и статистика, 1988.

- [14] Л. Заде, *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений*. М.: Мир, 1976.
- [15] Ю. П. Зайченко, М. Есфандиярфард, и А. И. Заика, «Анализ инвестиционного портфеля на основе прогнозирования курсов акций», *Вісн. Нац. техн. ун-ту України «КПІ»*, №. 47, с. 168–179, 2007.
- [16] Ю. П. Зайченко, *Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах*. К.: «Издательский дом «Слово», 2008.
- [17] Верховна Рада України. (2017, Трав. 18). Закон № 2047-VIII, *Про питну воду та питне водопостачання*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2918-14>.
- [18] К. М. Залеская, «Анализ устойчивости методов нечеткой кластеризации к выбору их параметров», *Искусственный интеллект*, №4, с. 35-39, 2010.
- [19] С. М. Захарченко, Н. Р. Кондратенко, та О. О. Манаєва, «Використання генетичного алгоритму в задачі кластеризації абонентів інтернет-провайдера», на *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, Вінниця, 2010, с. 120-121.
- [20] С. М. Захарченко, Н. Р. Кондратенко, та О. О. Манаєва, «Дослідження можливостей генетичного алгоритму в задачі кластеризації користувачів мережі Інтернет», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2 (18), с. 68-72, 2010.
- [21] А. Г. Ивахненко, *Моделирование сложных систем по экспериментальным данным*. М.: Радио и связь, 1987.
- [22] ДКЗ України по запасах корисних копалин. *Інструкція із застосування класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ мінеральних підземних вод*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0320-02>.
- [23] Верховна Рада України. (1994, Лип. 27). Постанова ВР №132/94-ВР, *Кодекс України про надра*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80>.

- [24] Н. Р. Кондратенко, В. А. Лужецький, та О. О. Снігур, «Аналіз зображень із використанням нечітких хеш-функцій», на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації*, Вінниця, 2013, с. 308-309.
- [25] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Використання інтервальних функцій належності в задачах кластеризації даних соціального характеру», *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 3. с. 20-29, 2012.
- [26] Н. Р. Кондратенко, Н. Б. Зелінська, та С. М. Куземко, «Діагностика гіпотиреозу на основі нечіткої логіки з використанням інтервальних функцій належності», *Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, №4, с. 52-58, 2003.
- [27] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Еволюційний пошук із кластеризацією для виділення інформативних ознак у задачі оцінки якості питної води», на *XII міжнар. конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)*, Вінниця, 2014, с. 208.
- [28] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Еволюційний пошук інформативних ознак із залученням експерта в задачі оцінки якості артезіанської води», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 96-101, 2015.
- [29] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Інтервальна нечітка кластеризація на основі альтернативних критеріїв якості», *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 2. с. 59-66, 2012.
- [30] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Інтервальний нечіткий кластерний аналіз для моніторингу стану артезіанської свердловини», *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, №4, с. 77-84, 2017.
- [31] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Моделювання багатовимірних залежностей на основі нечітких множин типу 2 на недовизначених гідрогеологічних даних», на *19-й Міжнар. наук.-техн. конф. SAIT 2017*, Київ, 2017, с. 166–167.

- [32] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Нечітка логічна система типу 2 для оцінювання перспективності артезіанської свердловини», на *17-й Міжнар. наук.-техн. конф. SAIT 2015*, Київ, 2015, с. 157.
- [33] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Нечітке моделювання в задачах аналізу цілісності зображень», на *15-й Міжнар. наук.-техн. конф. SAIT 2013*, Київ, 2013, с. 287.
- [34] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Нечітке моделювання в задачах гідрогеології», на *16-й Міжнар. наук.-техн. конф. SAIT 2014*, Київ, 2014. с. 224-225.
- [35] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Манаєва, «Нечітка кластеризація абонентів інтернет-провайдера», у *Тези доповідей. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)*, Вінниця, 2010, с. 49.
- [36] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Манаєва, «Нечітка кластеризація з урахуванням індексу вірогідності в задачах соціального спрямування», у *Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011*, Київ, 2011, с. 265.
- [37] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Нечітка модель оцінки запасів підземних вод» на *міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, Вінниця, 2014, с. 116–117.
- [38] Н. Р. Кондратенко, та О. О. Снігур, «Нечітке моделювання в задачі оцінки якості зображень лазерних плям», *Системні дослідження та інформаційні технології*, №3, с. 7-16, 2014.
- [39] Н. Р. Кондратенко, «Особливості застосування функцій належності типу 2 в системах нечіткої логіки», *Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, №2. с. 43-50, 2016.
- [40] Н. Р. Кондратенко, «Підвищення адекватності нечітких моделей за рахунок використання нечітких множин типу 2», *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*, № 6, с. 56-61, 2014.
- [41] Н. Р. Кондратенко, О. В. Чеборака, та С. М. Куземко, «Прогнозування часових послідовностей з використанням різновходових нечітких моделей на основі

інтервальних функцій належності», *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 4, с. 62–68, 2007.

- [42] В. Кравченко, «Гібридний метод підтримки та прийняття управлінських рішень на основі обробки експертних суджень і нечіткої логіки», *Формування ринкової економіки в Україні*, № 27. с. 165-168, 2001.
- [43] С. М. Куземко, «Моделювання багатовимірних залежностей на основі інтервальних функцій належності з врахуванням пропусків даних» : дис. канд. техн. наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2006.
- [44] О. О. Манаєва, «Побудова кластерів з використанням генетичного алгоритму», на *XXXIX наук.-тех. конф. проф.-викл. складу, співробітників та студентів університету*, Вінниця, 2010. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2010/initki/txt/manaeva.pdf>.
- [45] И. Д. Мандель, *Кластерный анализ*. М.: Статистика, 1988.
- [46] Ю. Н. Матвеев, *Основы теории систем и системного анализа: учебное пособие*. Тверь: ТГТУ, 2007.
- [47] Д. Ф. Володин, Е. А. Яковлев, и В. И. Почтаренко, *Временные методические рекомендации по проведению геолого-экологических исследований при геологоразведочных работах (для условий Украины)*. Киев: Укргеология, 1990.
- [48] Ю. Н. Минаев, *Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе*. М.: Горячая Линия-Телеком, 2003.
- [49] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, та О. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації динамічних систем: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2010.
- [50] В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, та А. О. Слободянюк, «Аналіз та прогноз резервів поверхневих і підземних вод для потреб водопостачання Вінницької області», на *XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2017.

- [51] Кабінет міністрів України. (1998, Груд. 18). *Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF>.
- [52] А. С. Нариньяни, «Недоопределенность в системе представления и обработки знаний», *Изв. АН СССР. Тех. Кибернетика*, № 5. с. 3–28, 1986.
- [53] А. Пегат, *Нечеткое моделирование и управление*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.
- [54] М. С. Олдендерфер, и Р. К. Блешфилд, *Кластерный анализ. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ*. М. : Финансы и статистика, 1989.
- [55] С. А. Олизаренко, А. В. Перепелица, и В. А. Капранов «Нечеткие логические системы интервального типа 2. Архитектура и механизм вывода», *Системи обробки інформації*, №5 (95), с. 156-164, 2011.
- [56] А. П. Олійник, Л. О. Штаєр, О. І. Белей, Р. Б. Стасюк, та І. А. Ясінецька, «Моделювання фільтраційних процесів в прямокутній ділянці ґрунту з використанням рівнянь Дарсі», *Східно-Європейський журнал передових технологій*, № 6/10 (90), с. 24-30, 2017.
- [57] Кабінет Міністрів України. (1995, Лют. 14). *Положення про порядок передачі розвіданих родовищ корисних копалин для промислового освоєння*. [Електронний документ]. Доступно: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/114-95-%D0%BF>.
- [58] Д. А. Поспелов, *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта*. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
- [59] С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, и Л. Д. Мешалкин, *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности*. Справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1989.
- [60] С.А. Айвазян, и А. И. Орлова, *Прикладной многомерный статистический анализ*. М.: Наука, 1978.
- [61] Г. Б. Ракитянська, «Діагностика в ієрархічній системі матриць нечітких відношень», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2, с. 48-55, 2008.

- [62] А. П. Ротштейн, *Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети*. Винница: Универсум-Винница, 1999.
- [63] А. П. Ротштейн, *Медицинская диагностика на нечеткой логике*. Винница: Континент – ПРИМ, 1996.
- [64] О. П. Ротштейн, та Г. Б. Ракитянська, «Діагностика на основі багатовимірних нечітких відношень», *Системні дослідження та інформаційні технології*, №2, с. 97-111, 2015.
- [65] О. О. Снігур, «Комп'ютерна програма для інтервальної нечіткої класифікації даних», *свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63435*, 06.01.2016.
- [66] О. О. Снігур, «Комп'ютерна програма для інтервального нечіткого кластерного аналізу», *свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63436*, 06.01.2016.
- [67] Л. А. Серебрякова, «Методы оценки уровня социально-экономического развития регионов», *Вестник СКГТУ. Серия «Экономика»*, № 3 (11), 2003.
- [68] О. О. Снігур, та Н. Р. Кондратенко, «Оцінка перспективності артезіанської свердловини з використанням експертних знань», на *V міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, Івано-Франківськ, 2015, с. 219-221.
- [69] С. А. Субботин, и А. А. Олейник, «Выделение набора информативных признаков на основе эволюционного поиска с кластеризацией», *Штучный интеллект*, № 4, с. 704-711, 2008.
- [70] С. А. Субботин, «Неитеративный синтез нейро-нечетких диагностических экспертных систем», *Штучный интеллект*, № 4, с. 380-386, 2009.
- [71] А. А. Харкевич, *Теория информации и ее приложения*. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959.
- [72] А. Н. Целых, и Р. П. Тимошенко, «Некоторые теоретико-множественные операции над интервальными нечеткими множествами в моделях

искусственного интеллекта», *Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы*, № 2, с. 69-76, 2001.

- [73] О. В. Чеборака, «Інформаційна технологія інтервального прогнозування часових послідовностей на основі нечітких множин типу-2» : дис. канд. техн. наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2009.
- [74] В. М. Шестопапов, Г. М. Негода, М. В. Набока, та Н. Б. Овчиннікова, «Проблеми класифікації мінеральних вод України і перспективи виявлення їх різноманітності», *Проблеми мінеральних вод*, с. 33-42, 2002.
- [75] В. М. Шестопапов, Б. Д. Стеценко, та Ю. Ф. Руденко «Підземні води тріщинуватих кристалічних порід як джерело питного водозабезпечення Вінниці (Україна)», *Геол. Журн.*, №1 (362), 2018.
- [76] Р. Р. Ягер, «Множества уровня для оценки принадлежности нечетких подмножеств», *Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения*. с. 71-78, 1986.
- [77] E. Celik, M. Gul, and N. Aydin, “A comprehensive review of multi criteria decision making approaches based on interval type-2 fuzzy sets”, *Knowledge-Based Systems*, vol. 85, pp. 329-341, 2015.
- [78] L. Abdullah, and L. Najib, “A new type-2 fuzzy set of linguistic variables for the fuzzy analytic hierarchy process”, *Exp. Syst. Appl.*, no. 41(7), pp. 3297-3305, 2014.
- [79] R. B. Baumgartner, C. Windischberger, and E. Moser, “Quantification in functional magnetic resonance imaging: fuzzy clustering vs. correlation analysis”, *Magnetic Resonance Imaging*, no. 30, pp. 115-125, 1998.
- [80] J. C. Bezdek, R. Ehrlich, and W. Full, “FCM: Fuzzy C-Means Algorithm”, *Computers and Geoscience*, no. № 10 (2–3), pp. 191-203, 1984.
- [81] J. C. Bezdek, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. New York, USA: Plenum Press, 1981.
- [82] D. Boley, M. Gini, and R. Gross, “Partitioning-based clustering for Web document categorization”, *Decision Support Systems*, no. 3, pp. 329-341, 1999.

- [83] J. J. Buckley, and W. Siler, "Fuzzy numbers for expert systems", *Fuzzy logic in knowledge-based systems, decision and control* / Ed. M. M. Gupta, T. Yamakawa. Elsevier Science Publishers B.V., pp. 153-172, 1988.
- [84] O. Castillo, and P. Melin, "A review on the design and optimization of interval type-2 fuzzy controllers", *Appl. Soft Comput*, no. 12(4), pp. 1267-1278, 2012.
- [85] O. Castillo, and P. Melin, "Optimization of type-2 fuzzy systems based on bioinspired methods: a concise review", *Inform. Sci*, no. 205, pp. 1-19, 2012.
- [86] F. Cebi, and I. Otaç, "Multi-criteria and multi-stage facility location selection under interval type-2 fuzzy environment: a case study for a cement factory", *Int. J. Comput. Intell. Syst*, no. 8(2), pp. 330–344, 2015.
- [87] S. M. Chen, and L. W. Lee, "Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the interval type-2 TOPSIS method", *Exp. Syst. Appl*, no. 37(4), pp. 2790–2798, 2010.
- [88] T. Y. Chen, "A linear assignment method for multiple-criteria decision analysis with interval type-2 fuzzy sets", *Appl. Soft Comput*, no. 13 (5), pp. 2735–2748, 2013.
- [89] T. Y. Chen, "A PROMETHEE-based outranking method for multiple criteria decision analysis with interval type-2 fuzzy sets", *Soft Comput*, no. 18 (5), pp. 923–940, 2014.
- [90] T. Y. Chen, "A signed-distance-based approach to importance assessment and multi-criteria group decision analysis based on interval type-2 fuzzy set", *Knowl. Inform. Syst*, no. 35 (1), pp.193–231, 2013.
- [91] T. Y. Chen, "An ELECTRE-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets", *Inform. Sci*, no. 263, pp. 1–21, 2014.
- [92] T. Y. Chen, "An integrated approach for assessing criterion importance with interval type-2 fuzzy sets and signed distances", *J. Chin. Inst. Ind. Eng*, no. 28 (8), pp. 553–572, 2011.

- [93] T. Y. Chen, “An interval type-2 fuzzy LINMAP method with approximate ideal solutions for multiple criteria decision analysis”, *Inform. Sci*, no. 297, pp. 50–79, 2015.
- [94] T. Y. Chen, “An interval type-2 fuzzy PROMETHEE method using a likelihood based outranking comparison approach”, *Inform. Fusion*, vol. 25, pp. 105-120, 2014.
- [95] T. Y. Chen, “An interval type-2 fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solutions using a likelihood-based comparison approach for multiple criteria decision analysis”, *Comput. Ind. Eng*, no. 85, pp. 57–72, 2015.
- [96] T. Y. Chen, C. H. Chang, and J. F. R. Lu, “The extended QUALIFLEX method for multiple criteria decision analysis based on interval type-2 fuzzy sets and applications to medical decision making” *Euro. J. Oper. Res*, no. 226 (3), pp. 615–625, 2013.
- [97] Y. Chen, and L. Tu, “Density-based clustering for real-time stream data”, in *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 2007, pp. 133-142.
- [98] K. S. Chuang, H. L. Tzeng, and S. Chen, “Fuzzy c-means clustering with spatial information for image segmentation”, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, no. 30, pp. 9-15, 2006.
- [99] L. Coetzee, and E. C. Botha, “Fingerprint recognition in low quality images”, *Pattern Recognition*, vol. 26, no. 10, pp. 1441-1460, 1993.
- [100] S. Dahiya, B. Singh, and S. Gaur, “Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 147, no. 3, pp. 938–946, 2007.
- [101] J. De Andres, P. Lorca, F. J. D. C. Juez, and F. Sanchez-Lasheras, “Bankruptcy forecasting: a hybrid approach using fuzzy c- means clustering and multivariate adaptive regression splines (MARS)”, *Expert Systems with Applications*, no. 38, pp. 1866–1875, 2011.
- [102] A. P. Dempster, “Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping”, *Ann. Math. Statis*, vol.38, pp.325-339, 1967.

- [103] T. Dereli, and K. Altun, “Technology evaluation through the use of interval type-2 fuzzy sets and systems”, *Comput. Ind. Eng*, no 65 (4), pp. 624–633, 2013.
- [104] B. Dixon, “Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis”, *Journal of Hydrology*, vol. 309, no. 1, pp. 17-38, 2005.
- [105] B. Dixon, “Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool”, *Applied Geography*, vol. 25, no. 4, pp. 327-347, 2005.
- [106] C. Dou, W. Woldt, M. Dahab, and I. Bogardi, “Transient Ground-Water Flow Simulation Using a Fuzzy Set Approach”, *Groundwater*, vol. 35, no. 2, pp. 205-215, 2005.
- [107] Y. Qin, Z. Zhang, and X. Liu, “Dynamic risk assessment of metro station with interval type-2 fuzzy set and TOPSIS method”, *J. Intell. Fuzzy Syst*, 2015, <http://dx.doi.org/10.3233/IFS-151573>.
- [108] M. Erdogan, and I. Kaya, “A type-2 fuzzy MCDM method for ranking private universities in Istanbul”, in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, UK, 2014, vol. I. (Online). URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0d8f/75dee2a09cf7b8a89e7931b823629b1351bd.pdf>.
- [109] E. Fallah-Mendipour, O. Bozorg Haddad, and M. A. Marino, “Prediction and simulation of monthly groundwater levels by genetic programming”, *Journal of Hydro-Environment Research*, vol.7, no. 4, pp. 253-260, 2013.
- [110] Rodell M. [et al.], “Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE”, *Hydrogeology Journal*, vol. 15, no 1, pp. 159-166, 2007.
- [111] C. Kahraman, B. Oztaysi, and I. U. Sarı, “Fuzzy analytic hierarchy process with interval type-2 fuzzy sets”, *Knowl.-Based Syst*, no. 59, pp. 48–57, 2014.
- [112] F. Ghaemi Nasab, and M. Rostamy-Malkhalifeh, “Extension of TOPSIS for group decision-making based on the type-2 fuzzy positive and negative ideal solutions”, *Int. J. Ind. Math*, no. 2 (3), pp. 199–213, 2010.

- [113] H. Gharibi, A. H. Mahvi, and R. Nabizadeh, “A novel approach in water quality assessment based on fuzzy logic”, *Journal of Environmental Management*, no. 112, pp. 87-95, 2012.
- [114] M. K. Ghorabae, “Developing an MCDM method for robot selection with interval type-2 fuzzy sets”, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.007>.
- [115] S. Ghosh, and S. K. Dubey, “Comparative Analysis of K-Means and Fuzzy C-Means Algorithms”, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, № 4 (4), pp. 35–39, 2013.
- [116] W. Gossel, A. M. Ebraheem, P. Wycisk, “A very large scale GIS-based groundwater flow model for the Nubian sandstone aquifer in Eastern Sahara (Egypt, northern Sudan and eastern Libya)”, *Hydrogeology Journal*, vol. 12, no. 6, pp. 698-713, 2004.
- [117] G. H. Granlund, “Fourier Preprocessing for Hand Print Character Recognition”, *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-21, no. 2, pp. 195-201, 1972.
- [118] L. M. Nunes, E. Paralta, and M. C. Cunha, “Groundwater nitrate monitoring network optimization with missing data”, *Water Resources Research*, vol. 40, no. 2, 2004. doi:10.1029/2003WR002469.
- [119] C. Guler, M. A. Kurt, M. Alpaslan, C. Akbulut, “Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques”, *Journal of Hydrology*, vol. 414-415, pp. 435-451, 2012.
- [120] C. Guler, G. D. Tyne, “Delineation of hydrochemical facies distribution in a regional groundwater system by means of fuzzy c-means clustering”, *Water Resources Research. Hydrogeochemistry and Water Chemistry*, vol. 40, no. 12, 2004.
- [121] A. T. Gumus, N. Aydin, and E. Celik, “Passenger satisfaction evaluation for rail transit lines in Istanbul using qualiflex approach based on interval type-2 trapezoidal fuzzy numbers”, in *CIE 2014 – 44th International Conference on Computers and Industrial Engineering and IMSS 2014 – 9th International Symposium on Intelligent*

Manufacturing and Service Systems, Joint International Symposium on The Social Impacts of Developments in Information, Manufacturing and Service Systems – Proceedings, Istanbul, 2014, pp. 343–357.

- [122] M. M. Gupta, and T. Yamakawa, “Cognition, perception and uncertainty”, *Fuzzy logic in knowledge-based systems, decision and control*, pp. 3-10, 1988.
- [123] M. Halkidi, Y. Batistakis, and M. Vazirgiannis, “On Clustering Validation Techniques”, *Journal of Intelligent Information Systems*, no. 17:2/3, pp. 107–145, 2001.
- [124] R. Haupt, and S. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [125] M. B. Hosseini, and M. J. Tarokh, “Interval type-2 fuzzy set extension of DEMATEL method”, *Computational Intelligence and Information Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 157–165, 2011.
- [126] M. B. Hosseini, and M. J. Tarokh, “Type-2 fuzzy set extension of DEMATEL method combined with perceptual computing for decision making”, *J. Ind. Eng. Int*, no. 9 (1), pp. 1–10, 2013.
- [127] B. Q. Hu, and C. Y. Wang, “On type-2 fuzzy relations and interval-valued type-2 fuzzy sets”, *Fuzzy Sets Syst*, vol. 236, pp. 1–32, 2014.
- [128] R. K. Mavi, S. Kazemi, and A. F. Najafabadi, “Identification and Assessment of Logistical Factors to Evaluate a Green Supplier Using the Fuzzy Logic DEMATEL Method”, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, no. 2 (9), pp. 9175-9182, 2012.
- [129] B. Iliev, M. Lindquist, L. Robertsson, and P. Wide, “A fuzzy technique for food- and water quality assessment with an electronic tongue”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 157, no. 9, pp. 1155-1168, 2006.
- [130] T. Dereli, A. Baykasoglu, and K. Altun, “Industrial applications of type-2 fuzzy sets and systems: a concise review” *Comput. Ind*, no. 62 (2), pp. 125–137, 2011.
- [131] A. T. Isik, and E. A. Adali, “The Qualiflex Method For The Insurance Company Selection Problem”, *European Scientific Journal August 2016 /SPECIAL/ edition*, pp. 348-357, 2016.

- [132] M. Iwayama, T. Tokunaga, “Hierarchical Bayesian clustering for automatic text classification”, in *Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence*, Montreal, Quebec, Canada, 1995, vol. 2., pp. 1322-1327.
- [133] R. I. John, “Type 2 fuzzy sets for knowledge representation and inference”, in *Proc. of IEEE Int’l. Conf. on Fuzzy System*, Anchorage, AK, USA, 1998, pp. 1003-1008.
- [134] C. Kahraman, and I. U. Sarı, “Multicriteria environmental risk evaluation using type II fuzzy sets”, *Adv. Comput. Intell. Commun. Comput. Inform. Sci*, no. 300, p. 449–457, 2012.
- [135] N. N. Karnik, and J. M. Mendel, “An Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Systems”, *Fuzzy Systems Proceedings*, 1998. URL: <http://sipi.usc.edu/~mendel/report>
- [136] N. N. Karnik, and J. M. Mendel, “Applications of type-2 fuzzy logic systems to forecasting of time series”, *Information Sciences*, vol. 120, pp. 89-111, 1999.
- [137] N. Karnik, J. Mendel, and Q. Liang, “Type-2 Fuzzy Logic Systems”, *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, vol. 7, no. 6, pp. 643-658, 1999.
- [138] N. Kondratenko, and O. Snihur, «A Method of Building Type-2 Fuzzy Logic Systems in Multidimensional Objects Identification Problems», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, V. 3/4 (87), p. 38-45, 2017.
- [139] F. Kovacs, C. Legany, and A. Babos, “Cluster validity measurement techniques”, in *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases*, Madrid, Spain, 2006, pp. 388-393.
- [140] R. A. Krishnapuram, and J. M. Keller, “Possibilistic Approach to Clustering”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, no. 1(2), p. 98–110, 1993.
- [141] L. W. Lee, and S. M. Chen, “Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the extension of TOPSIS method and interval type-2 fuzzy sets”, in *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, IEEE, 2008, vol. 6, pp. 3260–3265.

- [142] A. Leuski, H. Paques, L. Liu, and D. Grossman, “Evaluating document clustering for interactive information retrieval”, in *Proceedings of the tenth international conference on Information and knowledge management*. New York, NY, USA, 2007, pp. 33-40.
- [143] J. Li, G.H. Huang, G. Zeng, I. Maqsood, and Y. Huang, “An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination”, *Journal of Environmental Management*, vol. 82, № 2, pp. 173-188, 2007.
- [144] Q. Liang, and J. M. Mendel, “Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design”, *IEEE Trans. Fuzzy Syst*, vol. 8, pp. 535–550, 2000.
- [145] Q. Liang, and J. M. Mendel, “MPEG MBR Video traffic modeling and classification using fuzzy technique”, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 9, no. 1, pp. 183-193, 2001.
- [146] Y. Liu, Zh. Li, H. Xiong, X. Gao, and J. Wu, “Understanding of Internal Clustering Validation Measures”, in *2010 IEEE International Conference on Data Mining*, 2010, pp. 911 – 916.
- [147] D. Lowe, “Local Feature View Clustering for 3D Object Recognition”, in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, vol. 1, pp. 682-688.
- [148] P. Melin, and O. Castillo, “A review on the applications of type-2 fuzzy logic in classification and pattern recognition”, *Exp. Syst. Appl*, № 40 (13), p. 5413–5423, 2013.
- [149] J. M. Mendel, R. I. John, and F. Liu, “Interval Type-2 Fuzzy logic systems made simple”, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 14, no. 6, pp. 808-821, 2006.
- [150] J. M. Mendel, and R. I. John, “Interval Type-2 Fuzzy sets made simple”, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 10, no. 2, pp. 117-127, 2002.
- [151] J. M. Mendel, *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2001.
- [152] J. M. Mendel, “Uncertainty, fuzzy logic, and signal processing”, *Signal Processing Journal*, vol. 80, pp. 913–933, 2000.
- [153] R. Qin, Y. Liu, and Z. Liu, “Modeling fuzzy DEA with type-2 fuzzy variable coefficients”, *Advances in Neural Networks*, pp. 25–34, 2009.

- [154] M. K. Ghorabae, M. Amiri, and J. S. Sadaghiani, “Multiple criteria group decision-making for supplier selection based on COPRAS method with interval type-2 fuzzy sets”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, № 75 (5–8), pp. 1115–1130, 2014.
- [155] N. Nemoto, G. E. Hatzakis, and C. W. Thrope, “Automatic control of pressure support mechanical ventilation using fuzzy logic”, *American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine*, vol. 160 (2), pp. 550-556, 1999.
- [156] R. C. M. Nobre, O. C. Rotunno Filho, and W. J. Mansur, “Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool”, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 97, no. 3, pp. 277-292, 2007.
- [157] W. Ocampo-Duque, N. Ferré-Huguet, J. L. Domingo, and M. Schuhmacher “Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study”, *Environment International*, vol. 32, no 6, pp. 733-742, 2006.
- [158] J. V. Oliveira, and W. Pedrycz. *Advances in Fuzzy Clustering and Its Applications*. John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [159] A. Otheman, and L. Abdullah, “A new concept of similarity measure for IT2FS TOPSIS and its use in decision making”, in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mathematical Sciences*. 2014, vol. 1602, pp. 608–614.
- [160] A. Otheman, A. T. A. Ghani, and L. Abdullah, “The use of interval type-2 fuzzy TOPSIS in supplier selection”, *Appl. Mech. Mater*, no. 548, pp. 1954–1958, 2014.
- [161] B. A. Oztaysi, “A group decision making approach using interval type-2 fuzzy AHP for enterprise information systems project selection”, *J. Multiple-Valued Log. Soft Comput*, no. 24 (5–6), pp. 475–500, 2015.
- [162] P. Peer, J. Kovac, and F. Solina, “Human skin colour clustering for face detection”, in *International Conference on Computer as a Tool*, 2003, pp. 144-148.
- [163] V. Podvezko, “The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS”, *Engineering Economics*, vol. 22, no. 2, pp. 134-146, 2011.
- [164] J. Qin, X. Liu, and W. Pedrycz, “An extended VIKOR method based on prospect theory for multiple attribute decision making under interval type-2 fuzzy environment”, *Knowl.-Based Syst*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2015.05.025>.

- [165] R. W. Saaty, “The analytic hierarchy process—what it is and how it is used”, *Mathematical Modelling*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161-176, 1987.
- [166] H. Q. Saremi, and G. A. Montazer, “An application of type-2 fuzzy notions in website structures selection: utilizing extended TOPSIS method”, *WSEAS Trans. Comput*, no. 7 (1), pp. 8–15.
- [167] I. U. Sarı, B. Oztaysi, and C. Kahraman, “Fuzzy analytic hierarchy process using type-2 fuzzy sets: an application to warehouse location selection”, *Multi Criteria Decis. Aid Artif. Intell*, pp. 285–308, 2013.
- [168] O. Senvar, G. Tuzkaya, and C. Kahraman, “Multi criteria supplier selection using fuzzy PROMETHEE method “, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, vol. 313, pp. 21–34, 2014.
- [169] S. D. Shtovba, “Ensuring Accuracy and Transparency of Mamdani Fuzzy Model in Learning by Experimental Data”, *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 39, no. 8, pp. 39–52, 2007.
- [170] V. Simeonov, J. A. Stratis, C. Samara, G. Zachariadis, D. Voutsas, A. Anthemidis, M. Sofoniou, and Th. Kouimtzis, “Assessment of the surface water quality in Northern Greece”, *Water Research*, vol. 37, no. 17, pp. 4119-4124, 2003.
- [171] B. Singh, S. Dahiya, and S. Jain, “Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage: a case study of Southern Haryana, India”, *Environmental Geology*, vol. 54, no. 2, pp. 249-255, 2008.
- [172] R. M. Singh, and B. Datta, “Artificial neural network modeling for identification of unknown pollution sources in groundwater with partially missing concentration observation data”, *Water Resources Management*, vol. 21, no. 3, pp. 557-572, 2006.
- [173] J. A. T. Smellie, M. Laaksoharju, and P. Wikberg, “Äspö, SE Sweden: a natural groundwater flow model derived from hydrogeochemical observations”, *Journal of Hydrology*, vol. 172, no. 1-4, pp. 147-169, 1995.
- [174] O. Snihur, and N. Kondratenko, “Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4/4 (82), pp. 20-28, 2016.

- [175] F. Soltani, R. Kerachian, and E. Shirangi, “Developing operating rules for reservoirs considering the water quality issues: application of ANFIS based surrogate models”, *Expert Systems with Applications*, vol. 37 (9), pp. 6639-6645, 2010.
- [176] S. Subbotin, and A. Oleynik, “Entropy Based Evolutionary Search for Feature Selection”, in *The experience of designing and application of CAD systems in Microelectronics: Proceedings of the IX International Conference CADSM-2007*, Lviv, 2007, pp. 442-443.
- [177] M. Tamer Ayaz, “Simultaneous determination of aquifer parameters and zone structures with fuzzy c-means clustering and meta-heuristic harmony search algorithm”, *Advances in Water Resources*, vol. 30, no. 11, pp. 2326-2338, 2007.
- [178] G. T. Temur, T. Kaya, and C. Kahraman, “Facility location selection in reverse logistics using a type-2 fuzzy decision aid method”, *Supply Chain Management Under Fuzziness*, pp. 591–606, 2014.
- [179] S. Turk, R. John, and E. Ozcan, “Interval type-2 fuzzy sets in supplier selection”, in *14th UK Workshop on Computational Intelligence UKCI 2014*, University of Bradford, UK, 2014. (Online). URL: <http://www.cs.nott.ac.uk/~pszrj/mypapers/UKCI2014SedaTurk06.pdf>
- [180] B. J. Wagner, “Sampling design methods for groundwater modeling under uncertainty”, *Water Resources Research*, vol. 31, no. 10, pp. 2581-2591, 1995.
- [181] J. Wang, J. Kong, and Y. Lu, “A modified FCM algorithm for MRI brain image segmentation using both local and non-local spatial constraints”, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 32, no. 8, pp. 685-698, 2008.
- [182] J. C. Wang, and T. Y. Chen, “Closeness coefficient-based multiple criteria decision making method using interval type-2 fuzzy sets and its application to watershed site selection”, *J. Ind. Product. Eng*, vol. 31(1), pp. 1-16, 2014.
- [183] J. C. Wang, C. Y. Tsao, and T. Y. Chen, “A likelihood-based QUALIFLEX method with interval type-2 fuzzy sets for multiple criteria decision analysis”, *Soft Comput*, pp. 1-19, 2014.

- [184] L. X. Wang, J. M. Mendel, *Generating Fuzzy Rules from Numerical Data, with Applications*. Signal and Image Processing Institute, University of Southern California, Department of Electrical Engineering-Systems, 1991.
- [185] K. C. Wu, “Fuzzy interval control of mobile robots”, *Comput. Elect En*, vol. 22, pp. 211-229, 1996.
- [186] R. R. Yager, and J. Cybern, “Fuzzy subsets of type II in decisions”, *Journal of Cybernetics*, vol. 10, pp. 137-159, 1980.
- [187] H. Yan, Z. Zou, and H. Wang, “Adaptive neuro fuzzy inference system for classification of water quality status”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 22, no. 12, pp. 1891-1896, 2010.
- [188] L. A. Zadeh, “The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning”, *Information Sciences*, vol. 8, pp. 199-249, 1975.
- [189] N. Zamri, and L. Abdullah, “A new objective weight on interval type-2 fuzzy sets”, *World Acad. Sci. Eng. Technol*, no. 80, pp. 1194-1199, 2011.
- [190] J. Zeng, and Z. Q. Liu “Type-2 Fuzzy sets for pattern classification: A review”, in *Proceedings of the IEEE Symposium on Foundations of computational intelligence*, 2007, pp. 193-200.
- [191] D. Zhang, and S. Chen, “A Novel Kernelized Fuzzy C-means Algorithm with Application in Medical Image Segmentation”, *Artificial Intelligence in Medicine*, no. 32, pp. 37-50, 2004.
- [192] Z. Zou, Y. Yun, and J. Sun, “Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 18, no. 5, pp. 1020-1023, 2006.