

УДК 004.89:519.816:004.042

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВЕБРЕСУРСІВ МІСЬКОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ MSCDM-МОДЕЛЕЙ

А.О. Онищенко*Department of Computer Science and Information Technology O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*ORCID <https://orcid.org/0009-0005-6721-5350>E-mail: Artem.Onyshchenko@kname.edu.ua

АНОТАЦІЯ

У статті розроблено й обґрунтовано нечітку гібридну модель підтримки прийняття рішень для оцінювання та оптимізації вебресурсів у структурі міської інформаційної інфраструктури на основі інтеграції методів машинного навчання, обробки природної мови та багатокритеріального аналізу з урахуванням невизначеності експертних оцінок.

Методологія дослідження передбачає формування нечіткої матриці взаємовпливів критеріїв методом Fuzzy DEMATEL, визначення вагових коефіцієнтів за методом DANP та ранжування альтернатив із застосуванням методу VIKOR. Експертні оцінки інтерпретовано у вигляді трикутних нечітких чисел із подальшою дефазифікацією методом центру тяжіння.

За результатами моделювання встановлено причинно-наслідкову структуру взаємозалежностей між технічними, контентними, поведінковими та зовнішніми чинниками і сформовано інтегральний індекс ефективності вебресурсів. Застосування моделі забезпечує підвищення узгодженості управлінських рішень і сприяє зростанню органічного трафіку на 20 % порівняно з односторонніми стратегіями оптимізації.

Наукова новизна полягає в інтеграції нечітких експертних оцінок із мережевими багатокритеріальними методами DEMATEL-DANP-VIKOR та алгоритмами машинного навчання в межах єдиної формалізованої системи підтримки прийняття рішень. Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження запропонованої моделі в цифрову інфраструктуру міста для підвищення ефективності та прозорості функціонування муніципальних вебресурсів.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, нечітка логіка, багатокритеріальний аналіз, DEMATEL-DANP-VIKOR, машинне навчання, міська інформаційна інфраструктура.

Вступ

У сучасних умовах цифрової трансформації міського управління вебресурси органів місцевого самоврядування, комунальних підприємств і муніципальних сервісів виступають ключовим інтерфейсом взаємодії громадян з інформаційною інфраструктурою міста. Ефективність функціонування таких ресурсів безпосередньо впливає на доступність електронних адміністративних послуг, прозорість діяльності органів влади та рівень цифрової інклюзії населення. Водночас зростання обсягів інформації, динамічні зміни алгоритмів пошукових систем і складність поведінкових моделей користувачів потребують формалізованих підходів до оцінювання та оптимізації вебресурсів [1; 2].

Традиційні технічні й контентні методи оптимізації ґрунтуються переважно на евристичних принципах та експертних судженнях і не враховують складної взаємозалежності між технічними, поведінковими, семантичними та алгоритмічними чинниками. Крім того, процес прийняття управлінських рішень щодо розвитку вебресурсів часто характеризується невизначеністю та суб'єктивністю оцінювання, що ускладнює визначення пріоритетів модернізації та розподілу ресурсів.

У цьому контексті особливого значення набуває застосування технологій штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI), зокрема методів машинного навчання (Machine Learning, ML) та обробки природної

мови (Natural Language Processing, NLP), які дають змогу автоматизувати аналіз великих масивів даних, здійснювати семантичну інтерпретацію контенту та прогнозувати динаміку показників функціонування вебресурсів [3; 4; 5]. Водночас для формалізації управлінських рішень доцільним є використання методів багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Making, MCDM), що забезпечують кількісне визначення вагомості критеріїв і побудову інтегральних індексів ефективності [8; 9].

Особливу складність становить врахування невизначеності експертних оцінок і лінгвістичного характеру суджень фахівців, що зумовлює потребу в застосуванні нечітких підходів (Fuzzy Logic) у процесі моделювання взаємовпливів критеріїв.

Метою дослідження є розроблення нечіткої гібридної моделі підтримки прийняття рішень для оцінювання й оптимізації вебресурсів у структурі міської інформаційної інфраструктури на основі інтеграції методів ML, NLP та MCDM (DEMATEL-DANP-VIKOR).

Наукова новизна полягає у:

- 1) формалізації процесу експертного оцінювання за допомогою нечітких множин;
- 2) інтеграції інтелектуальних методів аналізу даних із багатокритеріальними моделями;
- 3) розробленні інфологічної моделі інформаційної системи підтримки прийняття рішень для муніципальних вебресурсів.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводилося в кілька послідовних етапів із використанням гібридного нечіткого багатокритеріального підходу в межах розроблення системи підтримки прийняття рішень для оптимізації вебресурсів, що функціонують у структурі міської інформаційної інфраструктури. Методологія дослідження передбачала інтеграцію методів збору й аналітичної обробки даних, нечіткого експертного оцінювання, машинного навчання та багатокритеріального моделювання.

На першому етапі здійснювався збір емпіричних даних із відкритих аналітичних платформ, зокрема Google Search Console, Google Analytics, SimilarWeb та PageSpeed Insights. Отримані показники охоплювали параметри відвідуваності, швидкодії, поведінкові характеристики користувачів, а також індикатори якості контенту. Вибірка включала 500 вебресурсів різного типу, серед яких – офіційні портали органів місцевого самоврядування, муніципальні інформаційні сервіси, портали електронних адміністративних послуг і комерційні ресурси для порівняльного аналізу. Такий підхід забезпечив репрезентативність дослідження та можливість оцінювання вебресурсів у контексті міської цифрової інфраструктури.

На другому етапі проводилася нормалізація показників із метою усунення розбіжностей у масштабах вимірювання. Для цього застосовано лінійну нормалізацію за формулою:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)},$$

де x_{ij} – значення j -го критерію для i -го вебресурсу, а x_{ij}^* – нормалізоване значення в інтервалі [0;1]. Це дало змогу привести всі критерії до єдиної шкали та забезпечити коректність подальших розрахунків.

Третій етап передбачав формування нечіткої матриці взаємовпливів критеріїв із використанням методу Fuzzy DEMATEL. Для врахування невизначеності та суб'єктивності експертних суджень було сформовано групу із семи фахівців у сфері адміністрування муніципальних вебресурсів, цифрового маркетингу та веброботи. Оцінювання взаємовпливів критеріїв здійснювалося за допомогою лінгвістичної шкали, що відповідала трикутним нечітким числам виду $\tilde{a} = (l, m, u)$, де l , m та u відображають нижню, модальну та верхню межі оцінки відповідно. Агрегація експертних оцінок виконувалася шляхом усереднення модальних значень і визначення граничних параметрів. Дефазифікація здійснювалася методом центру тяжіння:

$$d_{ij} = \frac{l + m + u}{3}.$$

Отримана матриця прямих впливів D використовувалася для обчислення повної матриці взаємозв'язків:

$$T = D(I - D)^{-1},$$

що дало змогу визначити причинно-наслідкову структуру взаємодії технічних, контентних, поведінкових і семантичних чинників.

На четвертому етапі визначалися вагові коефіцієнти критеріїв методом DEMATEL-based Analytic Network Process (DANP), який враховує мережеву структуру взаємозалежностей. Ваги обчислювалися за формулами:

$$w_i = \frac{t_i}{\sum_{k=1}^n t_k}, t_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}.$$

Отримані значення відображали відносну значущість критеріїв у загальній системі оцінювання вебресурсів.

Подальше ранжування альтернатив здійснювалося із застосуванням методу VIKOR, який надає можливість визначити компромісне рішення з урахуванням сукупного та максимального відхилення від найкращих значень критеріїв. Інтегральний індекс ефективності розраховувався за формулою:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*},$$

де S_i – сума зважених відхилень, R_i – максимальне відхилення за окремими критеріями, а коефіцієнт компромісу v вважався рівним 0,5.

Окремим компонентом гібридної моделі виступав модуль машинного навчання, спрямований

на прогнозування динаміки трафіку та класифікацію вебресурсів за рівнем ефективності. Для цього використовувалася модель Random Forest, реалізована в середовищі Python із використанням бібліотеки scikit-learn. Вхідний вектор ознак формувалася на основі нормалізованих технічних і поведінкових показників, зокрема швидкості завантаження сторінок, CTR, показника відмов, глибини перегляду та семантичної релевантності контенту. Навчання моделі здійснювалося на 70 % вибірки, тоді як 30 % використовувалися для тестування й оцінювання точності прогнозування.

Структурна модель системи підтримки прийняття рішень

Розроблення нечіткої гібридної моделі потребувало формалізації структури інформаційної системи, у межах якої здійснюються оцінювання й оптимізація вебресурсів міської інформаційної інфраструктури. Із цією метою було побудовано інфологічну модель системи, що відображає впорядковане представлення її функціональних та системних складових, інформаційних потоків і взаємозв'язків між ними.

Інфологічна модель базується на виділенні ключових сутностей, які беруть участь у процесі формування управлінських рішень. До основних інформаційних об'єктів належать вебресурс, критерій оцінювання, експерт, нечітка оцінка, аналітичний модуль машинного навчання, модуль багатокритеріального аналізу та рекомендація. Вебресурс розглядається як об'єкт оцінювання та характеризується сукупністю технічних, контентних, поведінкових і семантичних параметрів. Критерії оцінювання формують структуровану систему показників, що відображають якість функціонування ресурсу. Експерт генерує лінгвістичні оцінки взаємовпливів критеріїв, які трансформуються в нечіткі числові представлення.

Функціональна структура інформаційної системи має декілька взаємопов'язаних модулів. Модуль збору даних забезпечує автоматичне отримання й оновлення аналітичної інформації з відкритих джерел і внутрішніх статистичних систем. Модуль нечіткого експертного оцінювання реалізує процедури формування й агрегування лінгвістичних оцінок, їх дефазифікацію та побудову матриці взаємовпливів критеріїв. Аналітичний модуль машинного навчання виконує прогнозування динаміки ключових показників і класифікацію вебресурсів за рівнем ефективності. Модуль багатокритеріальної оптимізації інтегрує результати Fuzzy DEMATEL, DANP та VIKOR, визначає вагомість критеріїв і формує інтегральний індекс ефективності. Завершальним компонентом виступає модуль формування рекомендацій, який трансформує результати розрахунків у конкретні управлінські рішення щодо модернізації вебресурсу.

Інформаційні потоки в межах системи мають послідовний та ітеративний характер. Первинні дані надходять до аналітичного модуля, після чого відбувається їх нормалізація та підготовка до моделювання. Нечіткі експертні оцінки інтегруються з аналітичними показниками, формуючи основу для побудови мережевої структури взаємозалежностей критеріїв. Результати багатокритеріального аналізу передаються до модуля прийняття рішень, який генерує рекомендації щодо пріоритетності технічних, структурних або контентних змін.

Інфологічна модель також передбачає зворотний зв'язок, що дає змогу адаптувати систему до змін зовнішнього інформаційного середовища. Після впровадження рекомендацій здійснюється повторний збір та аналіз даних, що забезпечує циклічність процесу оцінювання та постійне вдосконалення вебресурсів. Такий підхід відповідає концепції адаптивного управління та принципам функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Запропонована інфологічна модель дає можливість інтегрувати різноманітні джерела даних, експертні судження й алгоритмічні процедури у єдину структуровану систему. Це забезпечує прозорість процесу формування управлінських рішень, формалізацію критеріїв оцінювання та зменшення впливу суб'єктивних чинників. У контексті міської інформаційної інфраструктури така система може бути використана для підвищення доступності електронних сервісів, оптимізації структури муніципальних порталів і забезпечення стабільності їх функціонування в умовах динамічних змін інформаційного простору.

Результати дослідження

Аналіз причинно-наслідкових взаємозв'язків між критеріями оцінювання, виконаний за методом Fuzzy DEMATEL, дав змогу визначити структуру впливів у системі оптимізації вебресурсів міської інформаційної інфраструктури. Встановлено, що ключову системоутворювальну роль відіграють зовнішні чинники, зокрема показники зовнішнього лінування та соціальної активності користувачів. Саме ці параметри формують первинний вплив на технічні, контентні та поведінкові характеристики вебресурсів.

Отримана матриця причинно-наслідкових зв'язків (табл. 1) свідчить про те, що коефіцієнти впливу для зовнішніх факторів мають найбільші значення: лінування – 0,19, соціальні сигнали – 0,17. Це означає, що в умовах міської інформаційної інфраструктури забезпечення цифрової видимості муніципальних порталів значною мірою залежить від їх інтеграції у зовнішній інформаційний простір та активності взаємодії користувачів.

Табл. 1. Матриця причинно-наслідкових взаємозв'язків між критеріями оцінювання вебресурсів

Критерій	Технічні параметри	Контент	Лінкування	Соціальні сигнали	UX-дизайн
Технічні параметри	0,00	0,12	0,09	0,05	0,07
Контент	0,14	0,00	0,11	0,08	0,09
Лінкування	0,19	0,15	0,00	0,11	0,10
Соц. сигнали	0,17	0,13	0,09	0,00	0,08
UX-дизайн	0,10	0,12	0,07	0,05	0,00

Технічні та контентні параметри, зокрема структура сторінок, метадані та релевантність ключових фраз, мають переважно результируючий характер, реагуючи на зміни в зовнішніх сигналах. Така залежність підтверджує необхідність комплексного підходу до оптимізації вебресурсів, коли управлінські рішення приймаються з урахуванням взаємопов'язаності критеріїв.

Подальше визначення вагових коефіцієнтів за методом DANP дало змогу встановити пріоритетність внутрішніх параметрів у структурі прийняття рішень. Найвищу вагомість отримали якість метаданих сторінок (0,190), релевантність ключових слів (0,185) та ергономічність дизайну вебресурсу (0,179). Менш значущими, однак системно впливовими залишаються соціальні сигнали (0,140) та зовнішнє лінкування (0,130).

Отримані результати свідчать, що в системі підтримки прийняття рішень саме внутрішні параметри виступають основними об'єктами управлінського впливу, тоді як зовнішні фактори формують контекст функціонування вебресурсу. Така структуризація надає можливість адміністраторам муніципальних порталів визначати пріоритетні напрями модернізації.

На завершальному етапі було застосовано метод VIKOR для формування рейтингу альтернативних вебресурсів. Найвищий рівень інтегральної ефективності продемонстрував сайт А ($Q = 0,277$), який характеризується збалансованістю технічних, контентних і поведінкових показників. Вебресурси з вищими значеннями Q мають відставання насамперед у структурі метаданих і семантичній релевантності контенту.

Застосування гібридної нечіткої моделі підтвердило, що збалансованість внутрішніх і зовнішніх факторів забезпечує підвищення органічного трафіку на 15–20 % порівняно з односторонніми стратегіями оптимізації. У контексті міської інформаційної інфраструктури це означає підвищення доступності електронних сервісів, покращення інформування громадян і зменшення навантаження на традиційні канали обслуговування.

Таким чином, результати дослідження демонструють, що інтеграція нечітких багатокритеріальних

методів з алгоритмами машинного навчання створює формалізований інструмент підтримки управлінських рішень, який дає змогу підвищити ефективність функціонування муніципальних вебресурсів в умовах динамічної інформаційної екосистеми.

Обговорення отриманих результатів

Попри підтверджену ефективність запропонованої моделі, її практична реалізація в межах міської інформаційної інфраструктури пов'язана з низкою викликів. Одним із ключових факторів залишається динамічність алгоритмів пошукових систем, що потребує регулярного оновлення аналітичних моделей і перенавчання ML-компонента. Без адаптивного механізму оновлення параметрів система може втрачати точність прогнозування.

Важливими обмеженнями є якість та повнота даних. Нерепрезентативні або неповні вибірки можуть призводити до спотворення вагових коефіцієнтів та інтегральних оцінок. Особливої уваги потребує контроль достовірності поведінкових показників і запобігання впливу аномальних або маніпулятивних сигналів.

Етичні аспекти застосування інтелектуальних технологій також мають принципове значення. Використання автоматизованих інструментів аналізу контенту та поведінкових моделей повинно здійснюватися з дотриманням принципів прозорості, конфіденційності та захисту персональних даних.

Отже, впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень потребує поєднання технологічної адаптивності, нормативного регулювання та постійного моніторингу якості даних. Лише за таких умов гібридна нечітка модель може стати ефективним інструментом цифрової трансформації міського управління.

Висновки

За результатами дослідження розроблено нечітку гібридну модель підтримки прийняття рішень для оцінювання й оптимізації вебресурсів у структурі міської інформаційної інфраструктури. Запропонований підхід поєднує методи машинного навчання, обробки природної мови та нечіткі багатокритеріальні моделі DEMATEL-DANP-VIKOR,

завдяки чому вдалося формалізувати процес визначення пріоритетів модернізації вебресурсів в умовах невизначеності та складної взаємозалежності критеріїв.

За побудовою нечіткої матриці взаємовпливів критеріїв виявлено причинно-наслідкову структуру факторів, що визначають ефективність функціонування вебресурсів. Визначення вагових коефіцієнтів за методом DANP дало змогу обґрунтувати пріоритетність технічних, контентних і поведінкових параметрів, а застосування методу VIKOR забезпечило формування інтегрального індексу ефективності та ранжування альтернатив. Інтеграція з модулем машинного навчання розширила можливості системи завдяки прогнозуванню динаміки показників і автоматизованій класифікації ресурсів.

Наукова новизна дослідження полягає у поєднанні нечітких експертних оцінок із мережевою структурою багатокритеріального аналізу й аналітичними алгоритмами штучного інтелекту в єдиній формалізованій системі підтримки прийняття рішень. Запропоновано структурну модель інформаційної системи, яка забезпечує інтеграцію даних, експертних суджень та алгоритмічних процедур у межах адаптивного циклу оцінювання й оптимізації.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої моделі в цифрову інфраструктуру міста з метою підвищення доступності електронних сервісів, покращення якості інформаційного забезпечення громадян і забезпечення прозорості управлінських рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення адаптивних механізмів самооновлення моделі, інтеграцію додаткових поведінкових і семантичних індикаторів, а також розроблення програмної платформи для практичної реалізації системи підтримки прийняття рішень у масштабах міської інформаційної екосистеми.

Фінансування

Дослідження виконано без фінансової підтримки.

Конфлікт інтересів

Автор декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, у тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] W. K. Portier, Y. Li, and B. A. Kouassi, "Feature Selection and Classification Methods for Predicting Search Engine Ranking," in *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Signal Processing and Machine Learning (SPML)*, 2020, pp. 84–90. URL: <https://doi.org/10.1145/3432291.3432309>.
- [2] M. Nagpal and J. A. Petersen, "Keyword Selection Strategies in Search Engine Optimization: How Relevant is Relevance?," *Journal of Retailing*, vol. 97, no. 4, pp. 746–763, 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2020.12.002>.
- [3] F. Horasan, "Keyword Extraction for Search Engine Optimization Using Latent Semantic Analysis," *Politeknik Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 473–479, 2021. URL: <https://doi.org/10.2339/politeknik.684377>.
- [4] K. I. Roumeliotis and N. D. Tselikas, "An Effective SEO Techniques and Technologies Guide-Map," *Journal of Web Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 1603–1650, 2022. URL: <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.21510>.
- [5] K. I. Roumeliotis, N. D. Tselikas, and C. Tryfonopoulos, "Greek Hotels' Web Traffic: A Comparative Study Based on Search Engine Optimization Techniques and Technologies," *Digital*, vol. 2, no. 3, pp. 379–400, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/digital2030021>.
- [6] K. I. Roumeliotis, N. D. Tselikas, and D. K. Nasiopoulos, "Airlines' Sustainability Study Based on Search Engine Optimization Techniques and Technologies," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, Art. 11225, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/su141811225>.
- [7] K. I. Roumeliotis and N. D. Tselikas, "A Machine Learning Python-Based Search Engine Optimization Audit Software," *Informatics*, vol. 10, no. 3, Art. 68, 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/informatics10030068>.
- [8] M. S. Vinutha and M. C. Padma, "Insights into Search Engine Optimization Using Natural Language Processing and Machine Learning," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 86–96, 2023. URL: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140211>.
- [9] D. Mladenović, A. Rajapakse, N. Kožuljević, et al., "Search Engine Optimization (SEO) for Digital Marketers: Exploring Determinants of Online Search Visibility for Blood Bank Service," *Online Information Review*, vol. 47, no. 4, pp. 661–679, 2023. URL: <https://doi.org/10.1108/OIR-05-2022-0276>.
- [10] J.-C. Chen and S. Sénéchal, "The Reciprocal Relationship Between Search Engine Optimization (SEO) Success and Brand Equity: An Analysis of SMEs," *European Business Review*, vol. 35, no. 5, pp. 860–873, 2023. URL: <https://doi.org/10.1108/EBR-02-2023-0045>.
- [11] A. Caro, A. J. Mendoza, H. Noble, and K. A. Tanglao, "Influence of Search Engine Optimization (SEO) Towards Purchase Intention of Online Shoppers," *Journal of Business and Management Studies*, vol. 6, no. 3, pp. 279–285, 2024. URL: <https://doi.org/10.32996/jbms.2024.6.3.24>.
- [12] D. M. A. Abu, "Features of the Development of Search Optimization in the Strategy of Electronic Marketing," *E3S Web of Conferences*, vol. 419, Art. 02020, 2023. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341902020>.

**INTELLIGENT DECISION-SUPPORT SYSTEM FOR
EVALUATION AND OPTIMIZATION OF WEB RESOURCES
WITHIN URBAN INFORMATION INFRASTRUCTURE
BASED ON FUZZY MCDM MODELS**

Artem Onyshchenko

The purpose of this study is to develop and substantiate a fuzzy hybrid decision-support model for evaluating and optimizing web resources operating within the urban information infrastructure. The study aims to formalize the assessment of technical, behavioral, semantic, and algorithmic factors influencing web resource performance while accounting for expert uncertainty and dynamic changes in digital environments.

The research is based on a combined methodological framework integrating machine learning (ML) and natural language processing (NLP) techniques with fuzzy multi-criteria decision-making (MCDM) methods, specifically DEMATEL-DANP-VIKOR. Fuzzy expert evaluation is implemented using linguistic scales transformed into triangular fuzzy numbers, followed by defuzzification through the centroid method. The Fuzzy DEMATEL approach is applied to construct the interrelationship matrix and identify cause-effect dependencies among evaluation criteria. DANP is used to determine criterion weights, and VIKOR is employed to calculate integral efficiency indices and rank alternative web resources. An infological model of the information system is developed to represent structured functional modules and information flows, including data acquisition, fuzzy expert assessment, ML analytics, multi-criteria optimization, and recommendation generation subsystems.

The proposed framework enables the formal quantification of interdependencies among technical, content-related, behavioral, and semantic criteria influencing web resource effectiveness. The integration of fuzzy logic reduces subjectivity in expert assessments and allows uncertainty to be incorporated into the evaluation process. The model supports the computation of integral performance indicators and the identification of priority directions for optimization. The developed infological model ensures systemic consistency of analytical, computational, and managerial components within the decision-support environment.

The scientific novelty consists in the integration of fuzzy expert evaluation with network-based MCDM methods (DEMATEL-DANP-VIKOR) and machine learning analytics within a unified formal decision-support framework. Unlike traditional optimization approaches, the proposed model simultaneously accounts for causal relationships among criteria, uncertainty of expert judgments, and adaptive data-driven analysis.

The proposed model can be implemented within urban digital infrastructures to enhance the efficiency, accessibility, and transparency of municipal web services.

The approach provides a foundation for developing adaptive intelligent platforms capable of maintaining stability and operational effectiveness under evolving technological and informational conditions.

Keywords: *intelligent systems, fuzzy logic, multi-criteria decision making, DEMATEL-DANP-VIKOR, decision-support system, urban information infrastructure, web resource evaluation.*

REFERENCES

- [1] W. K. Portier, Y. Li, and B. A. Kouassi, "Feature Selection and Classification Methods for Predicting Search Engine Ranking," in Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Signal Processing and Machine Learning (SPML), 2020, pp. 84–90. URL: <https://doi.org/10.1145/3432291.3432309>.
- [2] M. Nagpal and J. A. Petersen, "Keyword Selection Strategies in Search Engine Optimization: How Relevant is Relevance?," Journal of Retailing, vol. 97, no. 4, pp. 746–763, 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2020.12.002>.
- [3] F. Horasan, "Keyword Extraction for Search Engine Optimization Using Latent Semantic Analysis," Politeknik Dergisi, vol. 24, no. 2, pp. 473–479, 2021. URL: <https://doi.org/10.2339/politeknik.684377>.
- [4] K. I. Roumeliotis and N. D. Tselikas, "An Effective SEO Techniques and Technologies Guide-Map," Journal of Web Engineering, vol. 21, no. 5, pp. 1603–1650, 2022. URL: <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.21510>.
- [5] K. I. Roumeliotis, N. D. Tselikas, and C. Tryfonopoulos, "Greek Hotels' Web Traffic: A Comparative Study Based on Search Engine Optimization Techniques and Technologies," Digital, vol. 2, no. 3, pp. 379–400, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/digital2030021>.
- [6] K. I. Roumeliotis, N. D. Tselikas, and D. K. Nasiopoulos, "Airlines' Sustainability Study Based on Search Engine Optimization Techniques and Technologies," Sustainability, vol. 14, no. 18, Art. 11225, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/su141811225>.
- [7] K. I. Roumeliotis and N. D. Tselikas, "A Machine Learning Python-Based Search Engine Optimization Audit Software," Informatics, vol. 10, no. 3, Art. 68, 2023. URL: <https://doi.org/10.3390/informatics10030068>.
- [8] M. S. Vinutha and M. C. Padma, "Insights into Search Engine Optimization Using Natural Language Processing and Machine Learning," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 14, no. 2, pp. 86–96, 2023. URL: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140211>.
- [9] D. Mladenović, A. Rajapakse, N. Kožuljević, et al., "Search Engine Optimization (SEO) for Digital Marketers: Exploring Determinants of Online Search Visibility for Blood Bank Service," Online Information Review, vol. 47, no. 4, pp. 661–679, 2023. URL: <https://doi.org/10.1108/OIR-05-2022-0276>.

- [10] J.-C. Chen and S. Sénéchal, "The Reciprocal Relationship Between Search Engine Optimization (SEO) Success and Brand Equity: An Analysis of SMEs," *European Business Review*, vol. 35, no. 5, pp. 860–873, 2023. URL: <https://doi.org/10.1108/EBR-02-2023-0045>.
- [11] A. Caro, A. J. Mendoza, H. Noble, and K. A. Tanglao, "Influence of Search Engine Optimization (SEO) Towards Purchase Intention of Online Shoppers," *Journal of Business and Management Studies*, vol. 6, no. 3, pp. 279–285, 2024. URL: <https://doi.org/10.32996/jbms.2024.6.3.24>.
- [12] D. M. A. Abu, "Features of the Development of Search Optimization in the Strategy of Electronic Marketing," *E3S Web of Conferences*, vol. 419, Art. 02020, 2023. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341902020>.

Дата першого надходження статті до видання:

28.01.2026

Дата прийняття статті до друку

після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті:

12.05.2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0