

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

*Krzysztof Martyn*

### **zatytułowanej:**

*Multiple Criteria Decision Analysis methods inspired by other sub-disciplines of artificial intelligence*

## **1. Problem badawczy i jego znaczenie**

Rozprawa doktorska przygotowana na Wydziale Informatyki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej pod kierunkiem dr inż. hab. Miłósza Kadzińskiego została napisana w języku angielskim, a jej podstawą jest pięć prac naukowych, z czego trzy zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach o zasięgu międzynarodowym: *International Journal of Approximate Reasoning*, *Knowledge-Based Systems*, *European Journal of Operational Research*, a dwa pozostałe złożone do nie mniej prestiżowych czasopism: *Expert Systems With Applications* oraz *Information Sciences*.

Na rozprawę doktorską składają lista publikacji wraz z danymi bibliograficznymi, obszerne streszczenie (autoreferat) w języku angielskim, kopie publikacji będących podstawą rozprawy, deklaracje określające wkład pozostałych współautorów w przygotowanie przedstawionych prac.

Główny problem rozważany w rozprawie dotyczy wspomaganie podejmowania decyzji wielokryterialnych (recenzent będzie dalej używał stosowanego przez niego w pracy naukowej określenia wielokryterialne, ale należy nadmienić, iż w naukowej literaturze naukowej w języku polskim równolegle funkcjonuje określenie wielokryteriowe, którego używa Doktorant) z wykorzystaniem wybranych narzędzi i metod sztucznej inteligencji. Metody sztucznej inteligencji zostały wykorzystane do analizy i przetwarzania dostępnej informacji preferencyjnej decydenta oraz do budowy modelu preferencji będącego podstawą implementacji w kolejnym kroku metody wielokryterialnej. Rezultatem są propozycje hybrydowych rozwiązań łączących metody wielokryterialne (MCDM), z analizą i uczeniem się preferencji w oparciu o narzędzia sztucznej inteligencji (AI).

Autor rozprawy wyróżnia trzy kierunki wspomaganie podejmowania decyzji oparte na sztucznej inteligencji. Są to:

- *Metody wspomaganie decyzji inspirowane głębokimi sieciami neuronowymi* - szczególnie użyteczne w przypadku dużych zbiorów danych, w których mogą występować niespójności oraz szum.
- *Metody wspomaganie decyzji inspirowane uczeniem maszynowym* - umożliwiają odtwarzanie złożonych przekształceń danych wejściowych, np. niemonotoniczne kryteria
- *Metody wspomaganie decyzji inspirowane eksploracją zasobów Internetu* - analiza połączeń między rozważanymi stronami internetowymi

Ogólnie, problematyka wspomaganie podejmowania decyzji wielokryterialnych nie jest zagadnieniem nowym. Nowatorstwo pracy polega na umiejętnym połączeniu wybranych metod sztucznej inteligencji z metodami wielokryterialnymi co pozwala na wsparcie decydenta szczególnie na

*Roszkowska Ewa*

etapie analizy i przetwarzania informacji preferencyjnej oraz propozycji budowy hybrydowych narzędzi wspomagania podejmowania decyzji. Celem jest budowa modelu preferencji lepiej odzwierciedlającego preferencje decydenta, niż to ma miejsce w klasycznym podejściu. Niezaprzeczalnym walorem pracy jest podjęcie badań w trzech obszarach, co świadczy o dobrym zrozumieniu problemów analizy wielokryterialnej oraz wyodrębnieniu istotnych problemów będących przedmiotem późniejszej analizy (np. duży zbiór danych, niemonotoniczność kryteriów, dane dostępne na stronie internetowej) wraz z dostosowaniem odpowiednich narzędzi AI do propozycji „hybrydowego wsparcia” decydenta. Dodatkowo owo „hybrydowe” wsparcie zaproponowano dla metod opartych na różnych modelach agregacji preferencji, np.: UTADIS (addytywna funkcja wartości), PROMETHEE (relacja preferencji oparta na porównywaniu parami) oraz ELECTRE (relacja przewyższania).

Rozważania teoretyczne zostały poparte przykładami praktycznych zastosowań proponowanych podejść do analizy złożonych problemów decyzyjnych, a także prezentacją modeli symulacyjnych wraz z solidną analizą otrzymanych wyników.

Moim zdaniem, badania i propozycje rozwiązań zaproponowane w każdym z trzech obszarów badawczych z osobna, mogłyby być podstawą rozprawy doktorskiej.

Podsumowując, najważniejszy problem rozważany w rozprawie dotyczy propozycji wykorzystania wybranych technik sztucznej inteligencji, tj. technik z uczenia maszynowego, głębokich sieci neuronowych czy eksploracji zasobów Internetu do budowy modelu preferencji decydenta, będącego podstawą implementacji metody wielokryterialnej. Celem jest wsparcie decydenta w analizie informacji preferencyjnej, co daje możliwość rozwiązywania nowych, a także bardziej złożonych problemów decyzyjnych sortowania, rankingu czy wyboru (np. analiza dużych zbiorów danych, niemonotoniczne kryteria). Rozważany problem posiada zarówno charakter naukowy, jak i duże znaczenie praktyczne.

## 2. Wkład autora

Wkład autora w niniejszej rozprawie można przedstawić w trzech obszarach badawczych:

- *Wspomaganie decyzji inspirowane głębokimi sieciami neuronowymi.* Wyniki badań pokazują, że głębokie uczenie „dobrze radzi” z odkrywaniem parametrów modelu preferencji decydenta dla złożonych problemów, które obejmują duży zasób obarczonych szumem danych treningowych. ANN wykorzystano do wspomaganie decyzji, w sytuacji, gdy uczenie się przebiega na podstawie historycznych decyzji lub wzorców jako przykładowych opcji. Propozycje dotyczyły ośmiu metod uczenia preferencji w postaci sieci neuronowych: operator OWA, całka Choquet, addytywna funkcję wartości, odległość od idealnej i antyidealnej opcji, metody bazujące na relacji przewyższania i preferencji pomiędzy parami wariantów. Wspominane metody uczenia preferencji mają praktyczne zastosowanie w znanych i często stosowanych metodach wielokryterialnych tj. średnia ważona, TOPSIS, UTADIS, PROMETHEE czy ELECTRE. Konsekwencją była ciekawa propozycja architektury szeregu nowych metod, np.: ANN-Ch-Pos., ANN-Ch-Constr. oraz ANN-Ch-Uncons, ANN-UTADIS oraz ANN-PROMETHEE. Do określenia skuteczności algorytmów, użyto dwóch miar jakości klasyfikacji: 1) standardowy błąd klasyfikacji (błąd zero-jedynkowy (0/1)) zliczający liczbę wariantów, które model sklasyfikował nieprawidłowo 2) analiza pola pod wykresem krzywej ROC, pozwalająca określić, ile zmian w rankingu, powstałym na podstawie globalnych ocen, należy dokonać, aby uzyskać w pełni spójne rozwiązanie. Dodatkowo przetestowano trzy różne scenariusze z zadanymi warunkami (niewielka liczba danych treningowych w porównaniu do danych testowych, równa wielkość obu zbiorów danych, znacząco większy zbiór treningowy od zbioru testowego) do rozwiązywania postawionego problemu. Najlepsze wyniki

*Rozbiowski Ewo*

w eksperymencie pod względem błędu 0/1 otrzymano dla modeli ANN-UTADIS oraz ANN-Ch-Uncons. Ze względu na miarę AUC dodatkowo wysoką skuteczność otrzymano dla metody ANN-PROMETHEE. Należy zwrócić uwagę, że metody wzięte do analizy oparte są na różnych podejściach do analizy preferencji typu "ANN- metoda wielokryterialna", co wzmacnia wartość poznawczą i praktyczną otrzymanych wyników badawczych umożliwiając decydentowi wybór narzędzia wielokryterialnego, czy też porównanie wyników otrzymanych z wykorzystaniem różnych podejść.

- *Metody wspomagania decyzji inspirowane uczeniem maszynowym.* Zaproponowano dwie metody modelowania kryteriów niemonotonicznych, które mogą być wykorzystane do konstrukcji addytywnej funkcji wartości/użyteczność (MAVT/MAUT). Pierwszy sposób polega na kontroli złożoności modelu poprzez minimalizację zmian kierunku monotoniczności. Analizie poddano różne typy kryteriów: typu koszt, zysk, kryteria monotoniczne z wypłaszczaniem preferencji, kryteria niemonotoniczne o różnych kształtach np.: A lub V. Zastosowano podejście binarne do określenia kształtu marginalnych funkcji, kierunku monotoniczności, normalizacji oraz złożoności. Problem poszukiwania parametrów modelu zdefiniowano jako zagadnienie mieszane całkowitoliczbowego programowania liniowego. Drugi sposób poległ na problemie złożenia komponentu nierosnącego i niemalejącego. Problem ten może być przedstawiony jako zadanie programowania liniowego bez zmiennych binarnych. Należy jednak nadmienić, że w sytuacji złożonego problemu decyzyjnego możemy otrzymać funkcję o skomplikowanej postaci. Przydatność zaproponowanych podejść przetestowano na rzeczywistym problemie zarządzania ryzykiem w sytuacji obchodzenia się z nanomateriałami w różnych warunkach. W mojej opinii w obu przypadkach otrzymano wartościowe wyniki, a ostateczny wybór „sposobu radzenia” z niemonotoniczną kryteriów należy pozostawić decydentowi z rekomendacją wad i zalet proponowanych podejść.
- *Metody wspomagania decyzji inspirowane eksploracją zasobów Internetu.* Inspiracją badań w tym obszarze były metody rodziny metod ELECTRE oraz PROMETHEE oparte na relacji przewyższania oraz preferencji. Celem badań było wykorzystanie dodatkowych technik eksploatujących te relacje w celu uzyskania rekomendacji wariantów najbardziej preferowanych lub rankingów. Zaproponowano dwie rodziny metod PrefRank oraz ScoreBin, które służą do analizy różnych typów relacji wykorzystujące metodę Net Flow Score oraz algorytmy analizy grafów wykorzystywane pierwotnie do eksploracji zasobów Internetu. Rodzina metod PrefRank bazuje na rozmytej relacji preferencji, podczas gdy ScoreBin na binarnej relacji przewyższania. Dodatkowo, w ramach obu rodzin zaproponowano cztery metody, które różnią się sposobem ważenia podczas agregacji porównań parami uwzględniając trudność i łatwość w przewyższaniu lub preferencji grafie. W metodzie PrefRank I (ScoreBin I) wariant uważa się za silny, jeżeli jest on preferowany nad (przewyższa) inne silne opcje, PrefRank II (ScoreBin II) wariant jest dobry, jeżeli jest preferowany nad (przewyższa) wiele opcji słabych. PrefRank III, (ScoreBin III) wariant jest silny, jeżeli jest on preferowany nad (przewyższa) takie opcje, które są gorsze od innych silnych opcji. ScoreBin IV przyjmuje, że wariant jest dobry, jeżeli przewyższa warianty, które trudno jest przewyższyć. Zbadano podobieństwo wyników otrzymanych przy zastosowaniu proponowanych metod z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu wybranych metod eksploatacji relacji (NFS, ELECTRE I, Qualification Distillation) wykorzystując różnej wielkości symulowane problemy. Wyniki badań pokazały min, duże podobieństwo rankingów otrzymanych metodami PrefRank oraz NFS oraz uchwycono pewne podobieństwa między rankingami uzyskanymi za pomocą innych metod. Wyniki ELECTRE I znacznie się różniły od rankingów uzyskanych za pomocą pozostałych metod. Pokazano możliwości zastosowań metod z obu rodzin do analizy rzeczywistych problemów decyzyjnych. Metodę PrefRank zastosowano do oceny specjalnych

*Donłowski Ewo*

stref ekonomicznych w Polsce, gdzie uzyskano spójne rekomendacje w ramach wszystkich metod dotyczące pierwszych pozycji strefy Kostrzyn i Słubice pod względem wzrostu finansowego i tworzenia nowych miejsc pracy. Z kolei metody z rodziny Score-Bin zastosowano do oceny i wyboru najlepiej zarządzanego parku technologicznego w Polsce pod względem osiągania największych zysków oraz wspiera rozwój przemysłu i badań.

Podsumowując, w mojej ocenie w każdym z tych obszarów badań wkład autora jest wiodący i znaczący. Precyzyjnie określono problem badawczy, który jest dodatkowo fundamentalny z punktu widzenia wspomaganie decydenta w obszarze analizy informacji preferencyjnej i dalszej implementacji metod wielokryterialnych. Pokazano, że wykorzystanie technik z obszaru sztucznej inteligencji pozwala na opracowanie hybrydowych algorytmów metod wielokryterialnych, które lepiej poradzą ze złożonymi problemami decyzyjnymi.

Opracowano różne propozycje podejść do rozwiązania zdefiniowanych wcześniej problemów. W sytuacji dużego niespójnego zbioru przykładowych decyzji opracowano i przetestowano algorytmy uczenia się preferencji (w oparciu o sieci neuronowe) do wyznaczania wartości parametrów wybranych metod MCDA. Zaproponowano dwa sposoby modelowania kryteriów niemonotonicznych dla addytywnej funkcji wartości. Pierwszy sposób oparty na minimalizacji liczby zmian kierunku monotoniczności, drugi rozkład funkcji na di rozkład na monotoniczne składowe. W obu przypadkach przedstawiono problem jako zadanie programowania matematycznego. Opracowano dwie rodziny metod wielokryterialnych opartych na rozmytej (PrefRank) i binarnej (ScoreBin) relacji preferencji lub przewyższania bazujące na koncepcji siły i słabości wariantów. Wykorzystano przy tym algorytmy oceniające strony internetowe na podstawie hiperłączy.

Wykonano szereg eksperymentów, których celem była ocena jakości zaproponowanych podejść oraz dokonano analizy porównawczej otrzymanych wyników z wynikami otrzymanymi powszechnie stosowanymi metodami. Pokazano możliwości wykorzystania opracowanych algorytmów/metod w praktyce.

Należy także zaznaczyć, że wyniki badań zostały opublikowane w prestiżowych międzynarodowych czasopismach naukowych, co dodatkowo podkreśla ich wartość. Łączna liczba cytowań wg. Google Scholar na dzień 13 lipca 2023 roku - sporządzanie recenzji (1 czerwca 2023 przygotowanie pracy doktorskiej) wynosi dla trzech opublikowanych prac odpowiednio: 55 (48), P1=33 (31) (2020), P2=13 (11) (2021), P3=9 (6) co pokazuje o wzroście cytowalności i rozpoznawalności dorobku naukowego, które jest podstawą niniejszej dysertacji doktorskiej.

### **3. Poprawność**

Tekst pracy doktorskiej składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów, zakończenia oraz bibliografii. W rozdziale pierwszym przedstawiono podstawowe pojęcia dotyczące zagadnień rozważanych w rozprawie, w tym analizy wielokryterialnej, analizy informacji preferencyjnej decydenta, analizy odporności, krótkie omówienie trzech metod UTADIS, PROMETHEE oraz ELECTRE wykorzystywanych w dalszej części rozprawy. W rozdziale drugim przedstawiono podstawowe zagadnienia dotyczące wybranych subdyscyplin sztucznej inteligencji, wskazując jednocześnie te które będą szczególnym przedmiotem zainteresowania Doktoranta w dalszej części pracy, czyli uczenia maszynowego, sieci neuronowych, analizy zasobów Internetu. W trzech kolejnych rozdziałach zawarto główne wyniki prac badawczych dotyczące metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji inspirowanych głębokimi sieciami neuronowymi, uczeniem maszynowym oraz analizą zasobów Internetu. Rozprawę kończy posumowanie oraz bibliografia.

*Rozprawka Geo*

Praca została dobrze przygotowana, układ pracy jest logiczny i spójny, a treść zaprezentowana poprawnie metodologicznie i językowo. W pracy przedstawiono główne wyniki badań, które były prezentowane w artykułach naukowych dołączonych do rozprawy doktorskiej.

Jak wspomniano wyniki badań zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach naukowych i były przedmiotem rygorystycznych recenzji naukowych. Chciałabym zaznaczyć, że wszystkie prace opublikowane w czasopismach są obszerne i wymagają wysiłku od czytelnika ze względu na zakres prezentowanych wyników badawczych. Charakteryzują się poprawnością i elegancją matematyczną, jasnością i klarownością przekazu. Rozważania teoretyczne są poparte wynikami symulacji, czy przykładami empirycznymi, które są precyzyjnie opisane i opatrzone wartościową dyskusją.

#### **4. Wiedza kandydata**

Lektura przedłożonej do oceny dysertacji pokazuje, że wiedza kandydata jest na wysokim poziomie. Wzorowo zdefiniowano problem badawczy, w sposób syntetyczny, ale wyczerpujący (co było nie lada wyzwaniem) dokonano wprowadzenia w zakresie pojęć, koncepcji wykorzystywanych w pracy (rozdziały 1,2). W pozostałych rozdziałach (rozdziały 3,4,5) przedstawiono oryginalne wyniki badań naukowych. Bibliografia jest wyczerpująca i właściwie dobrana. Na uwagę zasługuje fakt, że Kandydat wykazał, że nie tylko posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie *informatyka techniczna i telekomunikacja*, ale także umiejętność łączenia wiedzy z różnych dyscyplin. Przedstawione w dysertacji wyniki badań wymagały zaawansowanej wiedzy z wielokryterialnej analizy decyzyjnej oraz metod sztucznej inteligencji. Koncepcje i główne wyniki badań (proponowane hybrydowe rozwiązania) powstały dzięki umiejętności połączenia wiedzy i narzędzi z informatyki, programowania matematycznego, metod wielokryterialnych czy badań operacyjnych.

#### **5. Inne uwagi<sup>1</sup>**

W mojej ocenie przedstawiona praca doktorska jest wyróżniająca. Badany problem jest ważny, umiejętnie i wszechstronnie przeprowadzone oraz wzorcowo opisane badania (problem, metodologia, wyniki). Koncepcja badań i otrzymane wyniki teoretyczne są bardzo interesujące i o dużym potencjale zastosowań praktycznych. Zdaniem recenzenta badania w każdym z trzech obszarów badawczych mogłyby być z powodzeniem podstawą dysertacji doktorskiej ze względu np.: na kompleksowość podejścia do problematyki, wielość propozycji rozwiązań w każdym obszarze, propozycje metod weryfikacji i oceny jakości zaproponowanych podejść, budowę i analizę modeli symulacyjnych czy przykładów opartych na danych rzeczywistych.

#### **6. Podsumowanie**

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami)<sup>2</sup> moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

---

<sup>1</sup> Opcjonalnie

<sup>2</sup> <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20190000276>

*Poprawstwo Ewe*

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak X)

<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja?


<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zdecydowanie TAK	Raczej TAK	Trudno powiedzieć	Raczej NIE	Zdecydowanie NIE

Wkład Autora w dyscyplinę został oceniony na podstawie pracy doktorskiej, publikacji i oświadczeń. W każdej z pięciu publikacji wchodzącej w skład rozprawy, wkład ten był wiodący i bardzo znaczący.

Ponadto, biorąc pod uwagę interesującą tematykę, zaprezentowane w pracy wyniki badań na wysokim poziomie naukowych w obszarze teoretycznym i praktycznych zastosowań, umiejętność łączenia badań z różnych obszarów z badaniami w dyscyplinie informatyka rekomenduję **wyróżnienie** rozprawy doktorskiej.

  
Podpis