

dr hab. Małgorzata Przybyła-Kasperek, prof. UŚ
Instytut Informatyki
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski w Katowicach
ul. Będzińska 39, 41-205 Sosnowiec

Katowice, 10.06.2026r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Kamila Kmity pt. „, Explainable Impact of Partial Supervision in Semi- Supervised Fuzzy Clustering”

Niniejsza recenzja jest sporządzona w odpowiedzi na pismo Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk (IBS PAN), dr. hab. inż. Jana Owsińskiego z dnia 8 kwietnia 2026 r. (znak: BA3-0004-10/24).

1. Problematyka badawcza pracy i jej znaczenie

Tematyka rozprawy doktorskiej wpisuje się w obszar uczenia maszynowego (Machine Learning) oraz wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (Explainable AI – XAI). Praca koncentruje się na klasie algorytmów częściowo nadzorowanej rozmytej analizy skupień (Semi-Supervised Fuzzy Clustering – SSFC), które stanowią rozwinięcie klasycznych metod nienadzorowanych (takich jak Fuzzy c-Means czy Possibilistic c-Means) o wiedzę a priori (etykiety) dla wybranego podzbioru danych.

Zasadniczym problemem badawczym jest brak rygorystycznego wyjaśnienia mechanizmu regulowania wpływu częściowego nadzoru w modelach SSFC. Wpływ ten w literaturze przedmiotu sterowany jest za pomocą hiperparametru α , wykorzystywanego w technice addytywnego łączenia funkcji celu. Autor wskazuje, że rola tego parametru jest jedynie powierzchownie interpretowana w literaturze (jako waga balansująca część nadzorowaną i nienadzorowaną funkcji celu), a nie formalnie wyjaśniana w kontekście wpływu na faktyczną decyzję modelu, czyli estymowane macierze przynależności i macierze prototypów.

W mojej ocenie podjęcie tego tematu jest uzasadnione i potrzebne. Nurt XAI jest obecnie zdominowany przez metody tłumaczące działanie głębokich sieci neuronowych (tzw. czarnych skrzynek). Doktorant słusznie zauważa jednak, że klasyczne algorytmy sztucznej inteligencji, w tym modele rozmyte, również cierpią na deficyty wyjaśnialności. Uważam, że skupienie się Autora na formalnym wyjaśnieniu, jak parametr α modyfikuje faktyczną decyzję algorytmu (tj. estymowane prototypy i stopnie przynależności), stanowi merytorycznie uzasadnione ujęcie tematu. Ma ono znaczenie zarówno teoretyczne, ale też praktyczne – zapobiega bowiem błędnej interpretacji klastrów w sytuacjach, gdy modele aplikowane są do

danych wrażliwych (co Autor ilustruje na przykładzie danych pacjentów z chorobą afektywną dwubiegunową).

2. Cel pracy i teza badawcza

Rozprawa nie posiada jednej, ogólnej tezy wyrażonej wprost w jednym zdaniu, jednak Autor w rozdziale 1.5 w sposób uporządkowany definiuje problem oraz stawia przed sobą dwa główne cele badawcze i cztery cele poboczne, które wyznaczają zakres pracy.

Cele główne obejmują:

- Wprowadzenie uniwersalnego aparatu wyjaśnialności dla wpływu częściowego nadzoru w modelach SSFC. Wymagało to zdefiniowania formalnego, ogólnego zapisu funkcji celu oraz funkcji estymujących wagi i prototypy.
- Formalne wyjaśnienie wpływu nadzoru (parametru α) w dwóch klasycznych modelach: Semi-Supervised Fuzzy c-Means (SSFCM) oraz Semi-Supervised Possibilistic c-Means (SSPCM), co zrealizowano wykazując ściśle zależności matematyczne między α a poszczególnymi typami wag (dla obiektów nadzorowanych i nienadzorowanych).

Cele poboczne to:

- Opracowanie wektoryzowanej, modułowej implementacji algorytmów typu open-source (pakiet fuscclust w języku R).
- Zidentyfikowanie i empiryczna analiza zjawiska niedostatecznego wpływu (underimpact) – stochastycznego fenomenu występującego, gdy parametr α jest zbyt mały, by zrekompensować niefortunną inicjalizację macierzy wag, co prowadzi do błędnego uporządkowania prototypów i drastycznego spadku dokładności klasyfikacji.
- Zidentyfikowanie i empiryczna analiza zjawiska nadmiernego wpływu (overimpact), badanego jako asymptotyczne zachowanie modelu przy $\alpha \rightarrow \infty$, gdzie udział obiektów nienadzorowanych w kształtowaniu prototypów dąży do zera.
- Sformułowanie praktycznych wytycznych do tworzenia siatek (grid search) wartości współczynnika α .

Cele te zostały w pracy zrealizowane. Autor przeniósł dyskusję o SSFC z poziomu optymalizacji funkcji błędu na poziom faktycznych zmian strukturalnych w prototypach, dostarczając konkretnych narzędzi diagnostycznych (wykresy U-plot i O-plot). Pozytywnie oceniam fakt, że Autor postawił przed sobą zarówno cele teoretyczne (skonstruowanie uniwersalnego aparatu matematycznego do analizy modeli takich jak SSFCM i SSPCM), jak i cele aplikacyjne (stworzenie wektoryzowanej, otwarto-źródłowej implementacji oraz opracowanie wytycznych dla praktyków tworzących siatki parametru α).

3. Poprawność i struktura pracy

Rozprawa liczy ponad 186 stron i została podzielona na sześć głównych, numerowanych rozdziałów oraz wykazy figur, tabel, pseudokodów i bibliografię. Praca została napisana w języku angielskim. Autor z dużą dyscypliną podchodzi do wprowadzanej notacji. Definicje, wzory i kolejne kroki optymalizacyjne są wprowadzane w sposób ciągły i spójny.

Rozdział 1. stanowi formalne wprowadzenie do problematyki badawczej. Prezentuje tło teoretyczne, wskazuje lukę badawczą i definiuje cele pracy. Zamieszczenie w tym miejscu

ilustracyjnej analizy na zbiorze danych iris ułatwia zobrazowanie problemu badawczego, jakim są rozbieżności w trafności klasyfikacji przy różnych wartościach parametru skalującego.

Rozdział 2. wprowadza pojęcia z zakresu rozmytej analizy skupień w wariantach nienadzorowanym i częściowo nadzorowanym. Przegląd literatury systematyzuje obecny stan wiedzy. Należy jednak zaznaczyć, że przegląd ten mógłby zostać poszerzony o głębszą dyskusję nad alternatywnymi (poza modelami rozmytymi) metodami uczenia częściowo nadzorowanego, co nadałoby pracy szerszy i bardziej uniwersalny kontekst.

Rozdział 3. to teoretyczna część rozprawy. Autor podejmuje w nim dyskusję z pojęciem wyjaśnialności (Explainable AI), odnosząc się do standardów ISO/IEC oraz literatury kognitywnej, w celu rozróżnienia „interpretacji” od formalnego „wyjaśnienia”. Wyprowadzenie wpływu częściowego nadzoru na decyzje algorytmów SSFCM oraz SSPCM zostało przeprowadzone bez błędów. Zwrócenie uwagi na problematyczną semantykę stopni przynależności w modelach z nadzorem jest trafnym spostrzeżeniem, ale otwartym pozostaje pytanie, czy uzasadnia to aż tak marginalne traktowanie macierzy U w dalszej analizie.

W rozdziale 4. rozważania przeniesiono na grunt implementacji oprogramowania. Zaproponowanie zwektoryzowanej implementacji algorytmów w języku R (pakiet fuscclust) jest krokiem w stronę poprawy reprodukowalności badań w omawianej dziedzinie.

Rozdział 5. zawiera weryfikację empiryczną. Sformalizowano tu zjawiska niedostatecznego (underimpact) oraz nadmiernego (overimpact) wpływu częściowego nadzoru i wprowadzono wykresy diagnostyczne U -plot i O -plot. Modele ewaluowano na danych w pełni nadzorowanych z symulowanym brakiem etykiet (iris, dane syntetyczne) oraz na rzeczywistym zbiorze medycznym (bipolar). Opracowane reguły (Rule 1, Rule 2) porządkują proces doboru hiperparametrów. Pewnym mankamentem przeprowadzonych eksperymentów jest a priori przyjęte, upraszczające założenie o wartości współczynnika rozmycia (fuzzifier) $m = 2$. Choć jest to ugruntowane w literaturze kompromisowe podejście optymalizacyjne, brak analizy wrażliwości proponowanych narzędzi diagnostycznych na zmianę tego parametru.

Rozdział 6. stanowi zwięzłe podsumowanie zrealizowanych celów oraz perspektyw dalszych prac. Bibliografia jest adekwatna do podjętego problemu. Podsumowując, struktura pracy jest poprawna. Zaproponowany układ odpowiada postawionym celom badawczym, prowadząc czytelnika w sposób logiczny od definicji problemu, przez dowody matematyczne i implementację, aż po walidację empiryczną.

4. Najważniejsze wyniki naukowe

Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w cyklu prac naukowych, ściśle powiązanych z tematyką dysertacji. W szczególności są to następujące pozycje:

1. K. Kmita, K. Kaczmarek-Majer and O. Hryniewicz, “Explainable Impact of Partial Supervision in Semi-Supervised Fuzzy Clustering,” in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3189-3198, May 2024, doi: 10.1109/TFUZZ.2024.3370768
2. Kmita, K., Kaczmarek-Majer, K., Hryniewicz, O. (2023). Classification Error in Semi-Supervised Fuzzy C-Means. In: Massanet, S., Montes, S., Ruiz-Aguilera, D., González-Hidalgo, M. (eds) *Fuzzy Logic and Technology, and Aggregation Operators*. EUSFLAT

AGOP 2023 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14069. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39965-7_60

3. K. Kmita, G. Casalino, G. Castellano, O. Hryniewicz and K. Kaczmarek-Majer, "Confidence path regularization for handling label uncertainty in semi-supervised learning: use case in bipolar disorder monitoring," 2022 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Padua, Italy, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE55066.2022.9882759.
4. K. Kmita, K. Kaczmarek-Majer, O. Hryniewicz, (2023). Learning Control Limits for Monitoring of Multiple Processes with Neural Network. In: García-Escudero, L.A., et al. Building Bridges between Soft and Statistical Methodologies for Data Science . SMPS 2022. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1433. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15509-3_32

W moim odczuciu, na podstawie analizy przedłożonej dysertacji, można wymienić cztery najistotniejsze, oryginalne wyniki naukowe o charakterze teoretycznym i praktycznym.

Pierwszym z nich jest opracowanie uniwersalnego aparatu pojęciowego do wyjaśniania wpływu częściowego nadzoru w modelach rozmytej analizy skupień. Nowością tego podejścia jest przededefiniowanie sposobu patrzenia na optymalizację algorytmów z częściowym nadzorem. Doktorant zaproponował nową, ogólną postać funkcji celu, w której wyodrębnił funkcję ważącą oraz funkcję kary. Sformułował on interpretację, w której udowodnił, że wymuszanie częściowego nadzoru za pomocą hiperparametru α zaburza klasyczną semantykę stopni przynależności (jako miary podobieństwa do prototypu). W konsekwencji matematycznie uzasadnił konieczność przesunięcia głównego ciężaru analizy modeli SSFC z estymowanych macierzy przynależności na macierze prototypów.

Kolejnym istotnym osiągnięciem pracy jest dostarczenie formalnych, ścisłych matematycznie dowodów dotyczących wpływu współczynnika skalowania na wyniki dwóch klasycznych modeli: Semi-Supervised Fuzzy c-Means oraz Semi-Supervised Possibilistic c-Means. Doktorant szczegółowo wyprowadził wzory pokazujące, w jaki sposób wartość α modyfikuje wagi w kolejnych iteracjach algorytmu optymalizacyjnego. Pokazał m.in., że w modelu SSFCM parametr ten ustala sztywne granice (dolne i górne) dla optymalnych stopni przynależności obiektów nadzorowanych.

Trzecim wynikiem rozprawy jest zidentyfikowanie, zdefiniowanie i dogłębna analiza empiryczna dwóch zjawisk negatywnie wpływających na stabilność modeli: niedostatecznego wpływu oraz nadmiernego wpływu częściowego nadzoru. Doktorant udowodnił, że niedostateczny wpływ ma charakter stochastyczny i występuje, gdy losowa inicjalizacja algorytmu stoi w sprzeczności z dostarczonymi etykietami, a parametr α jest zbyt mały, by ten błąd skorygować. Prowadzi to do drastycznych błędów w klasyfikacji. Jako praktyczne rozwiązanie, Autor zaproponował dedykowane narzędzia diagnostyczne – wykresy U-plot i O-plot, które pozwalają na empiryczne zbadanie zachowania modelu. Na ich podstawie opracował wytyczne dotyczące konstruowania optymalnych siatek wartości hiperparametru α .

Ostatnim, czwartym osiągnięciem, które wpisuje się w ramy nauk inżynierjno-technicznych, jest wkład algorytmiczno-programistyczny. Doktorant zaproponował implementację matematyczną omawianych algorytmów rozmytych. Na jej bazie stworzył otwarto-źródłowy pakiet fussclust w języku programowania R.

Podsumowując, wyniki naukowe zawarte w rozprawie stanowią przemysłany i poparty dowodami wkład w rozwój metod rozmytej analizy skupień. Dorobek publikacyjny Doktoranta odzwierciedla wartość tych badań. Najważniejszy element rozprawy został opublikowany w prestiżowym czasopiśmie IEEE Transactions on Fuzzy Systems, które należy do czołowych periodyków w tej dziedzinie na świecie. Ponadto, wyniki prezentowane były na renomowanej, międzynarodowej konferencji FUZZ-IEEE, gdzie jedna z prac współautorstwa Doktoranta (dotycząca niepewności etykiet w analizie danych z choroby dwubiegunowej) została wyróżniona nagrodą Best Paper Award. Dowodzi to rozpoznawalności i uznania prowadzonych badań w międzynarodowym środowisku naukowym.

5. Uwagi i dyskusja

Pracę oceniam pozytywnie. Zaprezentowane rozważania teoretyczne oraz inżynierskie stanowią zauważalny wkład w rozwój algorytmów częściowo nadzorowanej analizy skupień. Niemniej jednak, lektura rozprawy skłania do sformułowania kilku uwag krytycznych oraz pytań o charakterze dyskusyjnym, które warto poruszyć podczas publicznej obrony.

Pierwsza uwaga dotyczy podejścia Autora do kwestii semantyki stopni przynależności (macierz U). Zwrócenie uwagi na fakt, że nałożenie częściowego nadzoru zaburza klasyczną interpretację tych stopni, jest trafnym spostrzeżeniem. Pozostaje otwartą kwestią, czy marginalizacja macierzy U i przeniesienie całego ciężaru analizy na macierz V są w pełni uzasadnione, zwłaszcza że to właśnie stopnie przynależności definiują istotę algorytmów rozmytej analizy skupień.

Autor w pracy przyjął ograniczenie rozważań optymalizacyjnych i eksperymentalnych do wartości współczynnika rozmycia (fuzzifier) $m = 2$. W rozprawie brakuje analizy wrażliwości proponowanych narzędzi na zmiany tego parametru. Zastanawiające jest, w jakim stopniu zjawiska niedostatecznego (underimpact) i nadmiernego (overimpact) wpływu zmieniałyby swoją specyfikę i dynamikę narastania dla innych, potencjalnie optymalnych dla danych zbiorów, wartości parametru m .

Rozważania empiryczne przedstawione w rozprawie pozostawiają również pewien niedosyt w kontekście różnorodności wykorzystanych zbiorów danych. Walidacja proponowanych narzędzi diagnostycznych (U-plot i O-plot) zyskałaby na wartości, gdyby Autor przebadiał zachowanie proponowanych miar na większej liczbie danych, w szczególności na danych wielowymiarowych. W pracy ograniczono się do zbiorów o bardzo małej liczbie atrybutów (iris – 2 cechy wybrane do analizy, bipolar – 5 cech, chaos – 2 cechy). Brakuje weryfikacji, jak proponowana metoda poradzi sobie na danych wielowymiarowych, gdzie metryki odległości tracą na swojej wyrazistości i mogą ulegać spłaszczeniu.

Autor przyjął założenie o binarnej reprezentacji macierzy nadzoru (macierz F). Eksperymenty i dowody zakładają, że dostarczane algorytmowi etykiety są pewne. W rzeczywistych problemach analitycznych (np. monitorowanie pacjentów z chorobą afektywną dwubiegunową w psychiatrii) etykiety nadawane przez ekspertów często mają charakter niepewny lub rozmyty, a pomiędzy ekspertami może brakować konsensusu. W pracy nie skomentowano szerzej ani nie zweryfikowano eksperymentalnie, w jaki sposób zjawisko asymilacji nadzoru przez model funkcjonuje w sytuacji wprowadzania wartości ułamkowych do macierzy F .

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne rozwiązania postawionych problemów naukowych, które są istotne z punktu widzenia informatyki technicznej, a w szczególności metod rozmytej analizy skupień oraz nurtu wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (XAI). Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną w rozważanym temacie, umiejętnością prowadzenia pracy naukowej, przeprowadzania dowodów formalnych i rozwiązywania postawionych sobie problemów. Autor potwierdził poprawność proponowanych algorytmów i narzędzi diagnostycznych poprzez przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych oraz udostępnienie implementacji programistycznej.

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana przez mnie rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ust. 1-3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.). W związku z tym wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Badań Systemowych PAN o dopuszczenie Pana mgra Kamila Kmity do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz publicznej obrony.

Małgorzata
Przytyk - Kasperek