



dr hab. inż. Dariusz Młyński, prof. URK
Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków
e-mail: dariusz.mlynski@urk.edu.pl

Kraków, 14.06.2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Mohammadreza Einikarimkandi
pt. ***Enhancing the accuracy of process-based and data-driven models
for predicting drought***
PL.: ***Poprawa dokładności predykcji suszy za pomocą modeli opartych na
procesach i modeli opartych na danych***

Promotor: dr hab. inż. Mikołaj Piniewski, prof. SGGW

1. PODSTAWA WYKONANIA RECENZJI

Recenzję rozprawy doktorskiej Pana Mohammadreza Einikarimkandi (Doktorant) pt. *Enhancing the accuracy of process-based and data-driven models for predicting drought* wykonano w oparciu o następujące dokumenty:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742 ze zm.),
- decyzja Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, podpisaną przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny, Pana Prof. dr hab. inż. Janusza Kubraka, o powołaniu mojej osoby na Recenzenta niniejszej rozprawy doktorskiej,
- rozprawa doktorska Pana Mohammadreza Einikarimkandi (Doktorant) pt. *Enhancing the accuracy of process-based and data-driven models for predicting drought* udostępniona w formie papierowej.

Na podstawie wstępnego zapoznania się z rozprawą doktorską stwierdzono że spełnia ona wymagania formalne stawiane takim opracowaniom, stąd można było podjąć realizację recenzji, zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi.

2. UKŁAD ROZPRAWY DOKOTRSKIEJ

Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską przygotowano w oparciu następujące publikacje naukowe:

- Einikarimkandi, M.R., Ziveh, A.R., Salmani, H., Mujahid, S., Ghezelayagh, P., Piniewski, M. 2023. Detecting drought events over a region in Central Europe using a regional and two satellite-based precipitation datasets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 342, 109733. (publikacja 1)
- Einikarimkandi, M.R., Rahmati, A., Piniewski, M. 2022. Hydrological application and accuracy evaluation of PERSIANN satellite-based precipitation estimates over a humid continental climate catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101109. (publikacja 2)
- Einikarimkandi, M.R., Salmani, H., Piniewski, M. 2023. Comparison of process-based and statistical approaches for simulation and projections of rainfed crop yields. *Agricultural Water Management*, 277, 108107. (publikacja 3)
- Einikarimkandi, M.R., Massari, C., Piniewski, M. 2023. Satellite-based soil moisture enhances the reliability of agro-hydrological modeling in large

- transboundary river basins. Science of the Total Environment, 873, 162396. (publikacja 4)
- Einikarimkandi, M.R., Najminejad, F., Piniewski, M. 2023. Direct and indirect simulating and projecting hydrological drought using a supervised machine learning method. Science of The Total Environment, 898, 165523. (publikacja 5)

Przedstawione artykuły naukowe opublikowano w latach 2022-2023 w bardzo prestiżowych czasopismach naukowych. Świadczą o tym wskaźniki bibliograficzne. Impact Factor czasopism wynosi od 4,7 do 9,8 (sumaryczny 37,2). Według punktacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) jeden artykuł opublikowano w czasopiśmie 100 pkt, jeden w czasopiśmie 140 pkt a pozostałe w czasopismach 200 pkt (sumaryczna punktacja MNiSW to 840 pkt). Przedstawione publikacje są wieloautorskie. Cztery prace przygotowano w zespole 3-autorskim natomiast jedną w zespole sześciu autorów. Doktorant w każdym artykule jest pierwszym autorem. Pełnił funkcję autora korespondującego w ramach trzech prac. Według oświadczeń podpisanych przez wszystkich współautorów oraz informacji podanych w publikacjach, Doktorant był odpowiedzialny za konceptualizację, metodykę badań, obliczenia oraz przygotowanie manuskryptów. Na podstawie przedstawionych informacji z całą pewnością można stwierdzić iż Doktorant był autorem wiodącym w przedstawionych publikacjach. Stąd mogą one stanowić podstawę do ubiegania się o przyznanie stopnia naukowego doktora.

Przedstawione powyżej publikacje stanowiły podstawę do przygotowania rozprawy doktorskiej, gdzie opisano najważniejsze uzyskane rezultaty. Język rozprawy to angielski. Struktura pracy obejmowała następujące elementy: streszczenie w języku angielskim i polskim, wprowadzenie, cele pracy i hipotezy badawcze, metodyka obliczeń, wyniki badań, dyskusja, podsumowanie oraz spis literatury. Do rozprawy dołączono załączniki w formie publikacji naukowych oraz oświadczeń autorów o wkładzie do poszczególnych prac.

Generalnie, w ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej w sposób jasny i klarowny omówiono przedstawione badania. Konstrukcja rozprawy jest prawidłowa oraz typowa dla takich opracowań. Doktorant płynnie przechodzi pomiędzy poszczególnymi rozdziałami które treściowo stanowią logiczny ciąg przyczynowo-skutkowy. Należy również podkreślić staranność Doktoranta w przygotowaniu edycyjnym rozprawy. Jej estetyczna forma znacznie ułatwiła odbiór oraz zrozumienie, w czasie przygotowania recenzji. Generalnie, układ rozprawy doktorskiej jest prawidłowy i ocenia się go na poziomie bardzo dobrym.

3. OPIS ORAZ OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

3.1. Wstęp

Wstęp podzielono na następujące podrozdziały: opis suszy, techniki modelowania przebiegu suszy oraz dane satelitarne wykorzystywane do oceny przebiegu suszy. W pierwszym podrozdziale Doktorant zdefiniował pojęcie suszy, opisał jej negatywne skutki a także podał rodzaje susz. W drugim podrozdziale Doktorant przedstawił techniki modelowania przebiegu suszy, obejmujące tradycyjne modele procesowe oraz modele oparte na sztucznej inteligencji. W ostatnim podrozdziale Doktorant koncentruje się na wykorzystaniu danych satelitarnych do oceny przebiegu suszy, podkreślając problemy z dostępem do danych hydrometeorologicznych w obszarach transgranicznych i wskazując na alternatywę w postaci danych satelitarnych. Na samym końcu podkreślono znaczenie wilgotności gleby dla cyklu obiegu energii i wody oraz potrzebę dokładnych pomiarów i dostępu do danych poprawiających jakość modeli hydrologicznych.

Generalnie wstęp do rozprawy doktorskiej jest przygotowany bardzo starannie. Doktorant zdefiniował główne problemy dotyczące modelowania przebiegu suszy, w tym dostępności do danych hydrometeorologicznych. Bez wątplenia wstęp stanowi uzasadnienie podjęcia celu badawczego rozprawy doktorskiej. Niemniej pojawiły się pewne kwestie dyskusyjne. Przede wszystkim wydaje się że fragment opisu poszczególnych typów suszu jest niepełny (str. 9) ponieważ pominięto bardzo ważny aspekt suszy jakim jest hydrogeologiczna. Opis wskaźników suszy powinien być bardziej precyzyjny, uwzględniający podział wskaźników w odniesieniu do poszczególnych typów suszy. Ponieważ w rozprawie brak jest rozdziału „Przegląd literatury” Doktorant we wstępie powinien również pokrótce opisać wyniki innych badań, przeprowadzonych przez innych autorów, dot. modelowania suszy. Równocześnie podkreśla się że przedstawione uwagi mają charakter tylko uzupełniający do przygotowanego wstępu.

Generalnie, Doktorant we wstępie wykazał iż dokładnie zapoznał się z istniejącą literaturą na temat modelowania procesów suszy i posiada znacząca wiedzę teoretyczną, dotyczącą opisywanego problemu. Wskazuje to na solidne zrozumienie przedstawionego kontekstu badawczego. Wstęp do rozprawy doktorskiej ocenia się na poziomie bardzo dobrym.

3.2. Cel pracy i hipotezy badawcze

W ramach przeprowadzonych analiz Doktorant postawił trzy cele badawcze: 1) poprawa dokładności modeli agro-hydrologicznych opartych na procesach oraz modeli opartych na danych w prognozowaniu suszy 2) ocena zmian w różnych typach suszy w Polsce 3) ocena zestawów danych satelitarnych w zastosowaniach agro-hydrologicznych. W przypadku hipotezy badawczej, w rozprawie przedstawiono jedną ogólną, mówiącą że dokładność modelowania agro-hydrologicznego można poprawić poprzez wykorzystanie podejść wieloobektowej kalibracji i danych wejściowych z zestawów danych satelitarnych.

Analizując cele pracy w rozprawie stwierdzono że cel (2) należałoby doprecyzować o stwierdzenie, co wg Doktoranta oznaczają „zmiany w różnych typach suszy”. Z tematyki przedstawionych publikacji były to prawdopodobnie zmiany w przebiegu suszy w świetle zmian klimatu. W przypadku postawionej hipotezy, w rozprawie można ją uzupełnić o szczegółowe, zgodnie z tym co było weryfikowane w poszczególnych publikacjach naukowych. Np. dobór baz danych satelitarnych wpływa na jakość modelowania hydrometeorologicznego; znaczący wzrost temperatury w scenariuszu RCP8.5 spowoduje spadek plonów w poszczególnych regionach Polski; wykorzystanie podejścia wieloobektowego do kalibracji modeli hydrologicznych, poprawi dokładność symulacji wzrostu plonów oraz wielkości przepływów w dużych zlewniach rzecznych; narzędzia sztucznej inteligencji są skutecznym rozwiązaniem do prognozowania przebiegu suszy; w świetle zmian klimatu prognozuje się głębsze i bardziej dotkliwe susze; itp.

Po szczegółowym zapoznaniu się z celami pracy oraz hipotezą badawczą rozprawy należy stwierdzić, że generalnie zredagowano je poprawnie, jednoznacznie oraz zwięźle. Umożliwiło to Doktorantowi ukierunkowanie badań na konkretne aspekty modelowania suszy. Treść celu pracy oraz hipotezy ocenia się na poziomie dobrym.

3.3. Materiały i metodyka

Badania przeprowadzono dla trzech obszarów, zróżnicowanych pod kątem powierzchni. Była to zlewnia rzeki Wełna, dorzecze Odry oraz dorzecze Wisły. W ramach badań Doktorant wykorzystał różne zestawy danych. Dla opadów obejmowały one referencyjny zestaw danych G2DC-PL+ oraz satelitarne zestawy

PERSIANN i SM2RAIN-ASCA. Wilgotność gleby oszacowano na podstawie zestawu danych ESA CCI. Przepływy rzeczne zdefiniowano na podstawie danych udostępnionych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB w Warszawie (IMiGW). Do opisu przebiegu suszy meteorologicznej Doktorant zastosował standaryzowany wskaźnik opadu (SPI) a do opisu suszy hydrologicznej standaryzowany wskaźnik odpływu (SRI). Do modelowania przebiegu suszy Doktorant zastosował dwa podejścia: model SWAT+ oraz sztuczne sieci neuronowe (ANN). W pierwszej kolejności model SWAT+ zastosowano w zlewni Wełna a później w całym dorzeczu Odry, gdzie dokonano jego kalibracji oraz walidacji. Metodę ANN wykorzystano do symulacji plonów rolnych, danych hydrometeorologicznych oraz wskaźników susz.

Analizując metodykę przedstawioną przez Doktoranta powstało pytanie, dlaczego do opisu przebiegu suszy meteorologicznej wykorzystano wskaźnik SPI a nie standaryzowany wskaźnik opadu i parowania (SPEI). Wskaźnik ten posiada pewną przewagę nad SPI. Uwzględnia on zarówno opady, jak i potencjalną ewapotranspirację, co pozwala na bardziej kompleksową ocenę przebiegu suszy meteorologicznej. Jest bardziej wrażliwy na zmiany klimatyczne, ponieważ uwzględnia wpływ temperatury na dostępność wody. Dzięki temu SPEI jest bardziej adaptacyjny i dokładniejszy niż SPI w analizach suszy, zwłaszcza przy uwzględnieniu długoterminowych trendów klimatycznych. Ponadto w przedstawionej metodyce rozprawy doktorskiej opis poszczególnych wskaźników suszy powinien być bardziej matematyczny, w formie równań. W przedstawionych publikacjach naukowych Doktorant stosuje szereg wskaźników do opisu jakości poszczególnych modeli opisujących przebieg suszy oraz zjawisk hydrometeorologicznych. Niestety w metodyce rozprawy ich nie opisano. Powstaje również pytanie dlaczego jako bazę referencyjną opadów atmosferycznych założono G2DC-PL+ a nie dane udostępnione przez IMiGW.

Pomimo powyższych uwag należy jednak podkreślić iż zaproponowana przez Doktoranta metodyka jest poprawna. W pełni umożliwiła przeprowadzenie badań, wg postawionych celów oraz weryfikację hipotez badawczych. Przede wszystkim Doktorant uzasadnił wybór obszarów badawczych. Stosuje on nowoczesne narzędzia badawcze, takie jak techniki satelitarne, model SWAT+ czy też sieci neuronowe. Świadczy to o jego zaawansowanym warsztacie badawczym oraz dążeniu do uzyskania precyzyjnych wyników oraz jego zaangażowanie w innowacje naukowe i poszukiwanie nowych rozwiązań w dziedzinie hydrometeorologii. Dlatego zaproponowaną przez Doktoranta metodykę należy ocenić na poziomie bardzo dobrym.

3.4. Wyniki badań

Doktorant opisał wyniki badań w ramach trzech etapów: poprawa prognozy suszy rolniczej oraz hydrologicznej, detekcja przebiegu suszy oraz zastosowanie technik satelitarnych w modelowaniu agro-hydrologicznym. Opis uzyskanych rezultatów dokonano w oparciu o publikacje (1) – (5).

W ramach pierwszego etapu opisano możliwość poprawy jakości modeli agro-hydrologicznych do prognozowania przebiegu suszy, stosując różne metody obliczeniowe. Analizy przeprowadzono dla dorzecza Odry oraz zlewni Wełna. Opis rezultatów oparto o wyniki zaprezentowane w publikacji (3) oraz (5). W analizach wykorzystano wskaźniki SPI, w zakresie od SPI-1 do SPI-12, jako dane wejściowe do modeli Sztucznych Sieci Neuronowych (ANN) oraz symulacji i prognozowania przepływów rzecznych, przebiegu suszy hydrologicznej oraz wielkości plonów rolnych. Doktorant stwierdził że uwzględnienie wskaźników SPI w modelach ANN

wpływa na poprawę ich dokładności, co potwierdzono wielkościami wskaźników jakościowych pracy modeli (zmniejszenie współczynnika RMSE oraz zwiększenie współczynnika determinacji). Kolejno Doktorant ocenił prognozowanie suszy hydrologicznej, wyrażonej wskaźnikiem SRI, przy zastosowaniu metod pośrednich oraz bezpośrednich. Metoda bezpośrednia obejmowała symulacje na podstawie danych wejściowych a metoda pośrednia opierała się na wyznaczeniu wskaźników SRI, bazując na symulowanych wartościach przepływów. Doktorant stwierdził że metody pośrednie są dokładniejsze niż bezpośrednie dla wszystkich okresów akumulacji SRI. Podkreślił że wyższa precyzja w symulacjach odpływu prowadzi do większej precyzji prognoz suszy hydrologicznej. Doktorant stwierdził również iż zastosowanie tych samych predyktorów, tj. opadów, temperatury oraz wskaźników SPI nie wpłynęło na uzyskanie podobnej jakości prognozowania przebiegu suszy hydrologicznej, stosując podejście pośrednie oraz bezpośrednie. Kolejno Doktorant opisał analizy prognostyczne modelowania suszy, w świetle zmian klimatu. Analizy przeprowadził bazując na czterech modelach prognostycznych, dla dwóch okresów czasowych, tj. bliska (2021-2040) oraz daleka (2041-2060) przyszłość, zakładając najmniej korzystny scenariusz emisyjny, tj. RCP8.5. Analizowano trzy scenariusze: "umiarkowany", "ciepły i suchy" oraz "ciepły i wilgotny". Wyniki uzyskane przez Doktoranta jednoznacznie wskazały że symulacje pośrednie są bardziej wiarygodne, podczas gdy metody bezpośrednie symulacji wskazują na znaczne zmiany w suszy hydrologicznej w porównaniu z okresem historycznym. Kolejno Doktorant opisał możliwość ulepszania modelowania agro-hydrologicznego wielkości plonów oraz przepływów, za pomocą modelu SWAT+, stosując do tego dane satelitarne, zawierające informacje o wilgotności gleby. Doktorant stwierdził, że kalibracja modelu tylko poprzez wielkości przepływów daje stosunkowo średnią jakość jego pracy. Włączenie danych satelitarnych do procesów kalibracji poprawiają jakość pracy modelu, co wykazano wartościami współczynnika Klinga-Gupta (wyższe wartości współczynnika przy zastosowaniu danych satelitarnych). Uzyskane rezultaty pozwoliły Doktorantowi wykazać że kalibracja wilgotności gleby jest kluczowa dla poprawy dokładności prognoz rolniczych i hydrologicznych. Równocześnie Doktorant wykazał zróżnicowanie jakości modelowania plonów rolniczych w zależności od rodzaju uprawy.

W kolejnym etapie badań Doktorant dokonał opisu przebiegu suszy za pomocą bazy referencyjnej opadów (G2DC-PL+) oraz danych zestawów satelitarnych PERSIANN i SM2RAIN. Analizy przeprowadzono w odniesieniu do wskaźników SPI. Doktorant wartości wskaźników SPI-3 zastosował do opisu przebiegu suszy meteorologicznej. Wskaźniki SPI-6 oraz SPI-9 wykorzystał do identyfikacji suszy rolniczej a SPI-12 do hydrologicznej. Badaniem objęto dorzecza Wisły oraz Odry. Opis rezultatów oparto o wyniki zaprezentowane w publikacji (1). Analizy przeprowadzone przez Doktoranta wykazały że dla zestawu danych referencyjnych, w okresie 154 miesięcy aż w 80 wystąpiła susza meteorologiczna, z czego stwierdzono 15 ciężkich susz. Według bazy referencyjnej, w analizowanym okresie susze rolnicze były również powszechne. Zidentyfikowano 12 ciężkich susz przypadków poprzez wskaźnik SPI-6 oraz 16 poprzez SPI-9. W przypadku bazy danych PERSIANN, odnotowano 24 ciężkie susze rolnicze, poprzez SPI-6 oraz 20 za pomocą SPI-9. Analizując bazę SM2RAIN stwierdzono występowanie 11 ciężkich susz rolniczych, wyrażonych SPI-6 i SPI-9. W przypadku susz hydrologicznych, zestaw danych referencyjnych odnotował 15 ciężkich zdarzeń oraz ogólnie 75 wystąpień suszy hydrologicznej. Zestaw danych PERSIANN wykrył mniej susz hydrologicznych (67 zdarzeń), ale zidentyfikował 20 ciężkich. Zestaw danych SM2RAIN odnotował 84 susze, z czego 11 sklasyfikowano jako ciężkie. Generalnie,

wyniki przedstawione przez Doktoranta pozwoliły stwierdzić że baza PERSIANN jest wiarygodną do określania SPI. Kolejno Doktorant opisał zróżnicowanie przestrzenne wystąpienia susz, opisanych wskaźnikami wyznaczonymi za pomocą analizowanych baz. Doktorant wykazał że różne rodzaje susz charakteryzują się zróżnicowanymi wzorcami przestrzennymi, co podkreśla konieczność wykorzystania wielu wskaźników i danych do dokładnego zrozumienia suszy w regionie badawczym. Według Doktoranta, rozszerzenie okna SPI dla bazy referencyjnej wykazało, że zachodnia część obszaru badawczego doświadcza bardziej intensywnych susz. Dane PERSIANN odzwierciedlają podobny wzorec, zwłaszcza w odniesieniu SPI-6. Dane referencyjne wykazały że ciężkie susze meteorologiczne głównie występowały w regionie wschodnim, podczas gdy susze rolnicze i hydrologiczne były bardziej powszechne na zachodzie. Doktorant podkreślił że zestawy danych satelitarnych posiadają ograniczenia w detekcji regionalnych różnic między poszczególnymi typami suszy.

Ostatni etap badań opisany przez Doktoranta stanowił kontynuację analiz dotyczących zastosowania technik satelitarnych w modelowaniu agro-hydrologicznym. Doktorant przedstawił możliwość wykorzystania satelitarnych danych opadowych do takich analiz. Obszar badawczy stanowiło dorzecze Odry oraz zlewnia Wełna. Opisu rezultatów dokonano w oparciu o publikacje (2) oraz (4). W ramach obliczeń Doktorant zweryfikował możliwość zastosowania produktów z grupy PERSIANN do modelowania wielkości odpływu. Generalnie wykazał iż zastosowanie takich produktów daje jakość wyników symulacji znacznie poniżej przeciętnych. Doktorant podkreślił iż kluczowym czynnikiem modelowania hydrologicznego jest jakość danych wejściowych oraz kalibracja parametrów modelu. Stwierdził że brak dokładności w danych opadowych, stanowiące sygnał wejściowy mogą prowadzić do znacznych błędów w modelowanym odpływie.

Przedstawiony przez Doktoranta opis wyników jest klarowny oraz jednoznaczny, dzięki czemu możliwe jest ich pełne zrozumienie. Poprzez prezentację wyników Doktorant odpowiedział na postawiony cel rozprawy oraz zweryfikował hipotezy badawcze. Przedstawione rezultaty pozwoliły przede wszystkim zidentyfikować wiarygodne satelitarne bazy danych opadowych oraz wykazać czynniki które powinny być uwzględnione w kalibracji modeli do opisu przebiegu suszy. Niemniej, po szczegółowym zapoznaniu się zarówno z rozprawą jak i publikacjami stanowiącymi jej podstawę, pojawiły się pewne uwagi dyskusyjne. Przede wszystkim kolejność opisu wyników badań powinna być inna. W pierwszej kolejności powinno się opisać wyniki opisujące jakość baz danych opadowych a później rezultaty dot. poprawy procesów modelowania przebiegu suszy, tak aby opis stanowił logiczny ciąg przyczynowo-skutkowy (od opadu do wystąpienia suszy). W publikacji (1) gdzie Doktorant analizuje różne bazy satelitarne do opisu opadów, przyjmuje on wskaźniki SPI, o różnych horyzontach czasowych, do opisu przebiegu suszy meteorologicznej, rolniczej oraz hydrologicznej. Oczywiście prawidłowym założeniem Doktoranta jest to że długoterminowo utrzymująca się susza meteorologiczna wpływa na występowanie rolniczej oraz hydrologicznej. Niemniej bardzo ostrożnie podchodziłbym do wykorzystania wskaźników SPI do opisu dwóch ostatnich typów suszy ponieważ są one bardzo złożone i wpływają na nie wiele innych czynników, prócz deficyt opadów, takie jak rodzaje upraw, ewapotranspiracja, struktura gleby, praktyki rolnicze, sposób użytkowania zlewni oraz inne. Do opisu jakości baz danych opadowych czy też pracy modeli opisujących przebieg suszy, Doktorant wykorzystuje wiele wskaźników jakościowych. Powstaje pytanie dlaczego zastosowano taką liczbę wskaźników i czy to nie powoduje trudności w jednoznacznej interpretacji uzyskanych rezultatów. W przedstawionych pracach

brakuje informacji jakie czynniki wpływają na regionalizację jakości satelitarnych baz danych opadu oraz jakie fizyczne czynniki wpływają na przestrzenne zróżnicowanie suszy meteorologicznej, opisaną za pomocą wskaźników SPI. W ramach publikacji (2) gdzie Doktorant ocenił możliwość zastosowania produktów PERSIANN do modelowania hydrologicznego, do oceny jakości modelu SWAT+ zastosowano dane hydrologiczne z IMGW. Dlaczego jako bazę referencyjną danych opadowych przyjęto G2DC-PL a nie dane opadowe z IMGW? Model SWAT+ wykorzystano do modelowania hydrologicznego. Doktorant w publikacji przedstawił tylko wyniki samej kalibracji, wyrażone wskaźnikami jakościowymi. Stąd pytanie, czy jakość ta odnosi się do całego spektrum przepływów czy też zauważono że model lepiej pracuje np. przy symulacji przepływów wysokich czy też niskich. Generalnie Doktorant stwierdził iż produkty PERSIANN nie są satysfakcjonujące jako dane wejściowe do modelu SWAT+. Co jest przyczyną takiego stwierdzenia skoro w publikacji (1) wykazano że generalnie dane opadowe z niniejszej bazy są zbliżone jakościowo do referencyjnych. W ramach publikacji (3) Doktorant dokonał oceny wpływu szeroko rozumianych zmian klimatu na predykcję upraw rolniczych. Dlaczego w analizach założono poziom emisyjny RCP8.5? Czy wynika to z założenia skrajnie niekorzystnego scenariuszu emisyjnego? Czy w ramach przeprowadzonych badań uwzględniono potencjalne zmiany wysokości opadów optymalnych dla roślin które stanowiłyby dostosowanie się plonów do zmian klimatycznych, czy też założono stacjonarność potrzeb wodnych roślin uprawnych? W ramach publikacji (4) Doktorant badał możliwość wykorzystania danych satelitarnych do pozyskiwania informacji na temat wilgotności, wykorzystywanych w procesach kalibracji modeli agrohdrologicznych. Generalnie przedstawiono dosyć złożony proces kalibracji, wymagający uwzględnienia wielu czynników i wskaźników. Proces ten wymaga zaawansowanej wiedzy oraz doświadczenia, dlatego powstaje pytanie czy jest możliwe aby uprościć proces kalibracji, nie tracąc jakości uzyskanych wyników? Jako bazę referencyjną danych wilgotnościowych gleby zastosowano dane satelitarne. Pomimo iż obszar badań był bardzo rozległy, powstaje pytanie czy Doktorant weryfikował niniejsze dane? W ramach publikacji (5) Doktorant badał możliwość zastosowania metod pośrednich oraz bezpośrednich do symulacji i projekcji suszy. Dlaczego do określania wskaźników suszy założono rozkład gamma skoro teoretycznie wskaźniki SPI oraz SRI bazują na rozkładzie normalnym? Czy zweryfikowano zgodność rozkładu gamma z obserwacjami? Czy badano normalność rozkładów analizowanych zmiennych? Doktorant również stwierdził że wraz z zwiększającym się czasem SPI zwiększa się dokładność odwzorowania przebiegu suszy. Brakuje pewnego wyjaśnienia co wpływa na takie rezultaty.

Należy podkreślić iż powyższe komentarze oraz zapytania mają tylko i wyłącznie charakter dyskusyjny oraz w żaden sposób nie podważają bardzo wysokiej, merytorycznej oceny wyników zaprezentowanych przez Doktoranta. Z całą pewnością można stwierdzić że recenzowana rozprawa doktorska cechuje się wieloma mocnymi stronami, które podkreślają wartość naukową i praktyczną badań zrealizowanych przez Doktoranta. Przede wszystkim, badania obejmują cały obszar Polski, w tym regiony transgraniczne, co umożliwia uzyskanie wszechstronnego obrazu suszy, jako całościowego zjawiska, oraz identyfikację obszarów szczególnie narażonych na to zjawisko (regionalizacja wskaźników suszy). Wykorzystanie różnych baz danych hydrometeorologicznych pozwoliło Doktorantowi na analizę różnic w wynikach oraz lepsze zrozumienie przyczyn tych zróżnicowań, co prowadzi do wskazania najbardziej rzetelnych baz. Dzięki temu możliwe jest dokładniejsze oszacowanie rozmiaru i skutków suszy. W ramach rozprawy Doktorant wykazał iż biegle posługuje się technikami satelitarnymi, co umożliwia precyzyjne

oraz szerokok zasięgowy pomiar opadów, co jest szczególnie istotne w trudno dostępnych regionach, takich jak obszary transgraniczne. Satelitarne dane opadowe dostarczają aktualnych informacji w czasie rzeczywistym, co jest niezbędne do skutecznego zarządzania kryzysowego w sytuacjach takich jak powódź czy susza. Doktorant również wykazał biegłą znajomość zaawansowanych modeli, takich jak SWAT+. Zidentyfikował główne problemy jego kalibracji oraz zaproponował podejścia jej poprawy (uwzględnienie satelitarnych danych wilgotnościowych), co pozwoliło na jeszcze dokładniejsze dostosowanie parametrów modelu do warunków terenowych. Generalnie bardzo mocną stroną rozprawy jest to że Doktorant nie skupił się tylko na jednym typie suszy tylko potraktował ją jako zjawisko wielowymiarowe. Takie podejście pokazuje, że Doktorant rozumie złożoność suszy. Dzięki temu możliwa była bardziej wszechstronna i dokładniejsza analiza, a także identyfikacja zależności między różnymi aspektami suszy. Ponadto, badania łączące aspekty meteorologiczne, rolnicze i hydrologiczne, co wymagało wiedzy z różnych dziedzin nauki. Świadczy to szerokim zakresem kompetencji Doktoranta i jego zdolności do integrowania wiedzy z różnych obszarów.

Mając na uwadze przedstawiony przez Doktoranta opis wyników z całą pewnością należy stwierdzić że tą część rozprawy przygotowano z należytą starannością. Opisane rezultaty w pełni umożliwiły zweryfikowanie hipotez badawczych postawionych przez Doktoranta. Wyniki opisano klarownie, jednoznacznie oraz w sposób w pełni zrozumiały. Stąd tą część rozprawy doktorskiej oceniono na poziomie bardzo dobrym.

3.5. Dyskusja

W ramach przedstawionej rozprawy dyskusja wyników zaproponowana przez Doktoranta stanowi osobny rozdział. Podzielono ją na trzy sekcje, obejmujące doskonalenie symulacji za pomocą wskaźników suszy, zwiększenie jakości pracy modeli agro-hydrologicznych za pomocą danych hydrologicznych oraz detekcja suszy. Doktorant przedstawił wyniki dotyczące skuteczności wykorzystania wskaźników suszy meteorologicznej do symulowania wielkości plonów, suszy hydrologicznej i przepływu rzecznoego. Przedstawił wyniki badań innych autorów, przeprowadzonych dla Pakistanu, Iranu, Turcji, i innych regionów. Kolejno Doktorant przedyskutował zastosowanie danych satelitarnych do poprawy dokładności modeli agro-hydrologicznych, takich jak SWAT+. Doktorant opisał rezultaty innych autorów, dotyczących kalibracji modeli, poprzez wykorzystanie danych satelitarnych do oceny bilansu wodnego i detekcji wilgotności gleby. W ostatnim etapie dyskusji Doktorant przedyskutował wyniki dotyczące wykorzystania danych satelitarnych w różnych regionach świata, do identyfikacji suszy.

Generalnie dyskusja wyników badań przeprowadzona przez Doktoranta jest prawidłowa. Pewnym ograniczeniem jest to że Doktorant nie przedstawił wyników badań innych autorów dla regionu Europy Centralnej tylko dla różnych części świata. Stąd powstało pytanie, na ile porównanie wyników własnych dla obszaru Polski, z innymi regionami geograficznymi jest miarodajne. Ponadto dyskusje można było uzupełnić o fizyczną interpretację zjawisk opisanych w doktoracie, np. odpowiedzenie na pytanie z czego wynika zróżnicowany przebieg suszy meteorologicznej na obszarze Polski. Niemniej z całą pewnością należy podkreślić że przedstawiona przez Doktoranta dyskusja jest dogłębna. Potwierdza ona nie tylko zrozumieniem swoich badań ale także umiejętność umiejscowienia ich w szerszym kontekście naukowym. Odniesienie uzyskanych wyników do analiz przeprowadzonych na całym świecie pokazuje globalne spojrzenie Doktoranta na

zrealizowane badania. Z całą pewnością przedstawioną dyskusję należy ocenić na poziomie bardzo dobrym.

3.6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant stwierdził że wskaźniki suszy meteorologicznej, wyrażone przez SPI, mogą być stosowane do prognozowania suszy oraz plonów rolniczych. Wykazał iż integracja danych satelitarnych opisujących wilgotność gleby może z powodzeniem poprawiać jakość pracy modeli agro-hydrologicznych. Podkreślił że kalibracja wielocelowa oraz zastosowanie metod sztucznej inteligencji może usprawnić symulacje suszy meteorologicznej i hydrologicznej oraz symulacje wzrostu plonów rolniczych. Ponadto stwierdził iż wciąż istnieją wyzwania dotyczące wyboru danych satelitarnych do opisu przebiegu opadów, wykorzystywanych do określania wskaźników suszy oraz ich przestrzennego zróżnicowania. Doktorant podkreślił konieczność kontynuacji badań dotyczących wykorzystania danych satelitarnych w modelowaniu oraz prognozowaniu agro-hydrometeorologicznych. Wskazał również praktyczny aspekt pracy, tj. możliwość implementacji przedstawionych rezultatów przez sektory rządowe oraz jednostki administrujące gospodarką wodną i produkcją rolniczą dla wspierania kluczowych decyzji.

Przedstawione przez Doktoranta wnioski są klarowne oraz jednoznaczne. W pełni wynikają z przeprowadzonych badań oraz wspierają uzyskane rezultaty. Doktorant wykazał że potrafi efektywnie interpretować swoje wyniki co ma znaczenie dla dalszego planowania oraz rozwoju badań w przedstawionej tematyce oraz możliwości implementacji wyników do szeroko rozumianej praktyki. Z całą pewnością treść wniosków zaprezentowanych przez Doktoranta należy ocenić na poziomie bardzo dobrym.

3.7. Pozostałe osiągnięcia

Uzupełnieniem przedstawionej rozprawy doktorskiej było zestawienie pozostałych osiągnięć naukowych Doktoranta. Jego zainteresowania skupiają się głównie na temacie szeroko pojętej gospodarki wodnej. Doktorant brał czynny udział w szeregu konferencji naukowych, zarówno o zasięgu lokalnym jak i międzynarodowym. Zrealizował trzy staże naukowe: jeden we Włoszech oraz dwa w Niemczech. Należy podkreślić że rozprawę doktorską przygotowano w ramach projektu PRELUDIUM BIS-1, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Wskazuje to na doświadczenie Doktoranta przy realizacji projektów naukowych. Oprócz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej, Doktorant wykazał że jest współautorem 9 innych których tematyka dotyczyła szeroko pojętej hydrometeorologii. Prace te opublikowano w bardzo prestiżowych czasopismach naukowych, zarówno z bardzo wysokim Impact Factor jak i punktacją MNiSW.

Przedstawione pozostałe osiągnięcia przez Doktoranta wykazują że już przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora zdobył ogromne doświadczenie naukowe. Doktorant wykazuje umiejętności zarówno w prezentowaniu wyników badań, poprzez konferencje, jak i prace w zespołach badawczych realizujących projekty naukowe. Publikowanie wyników badań w prestiżowych czasopismach naukowych świadczy o tym że prace badawcze w których Doktorant brał udział spełniają wysokie standardy naukowe, są innowacyjne, mają istotny wkład w daną dziedzinę i są warte uwagi szerokiej społeczności naukowej. Generalnie, Doktorant posiada wszystkie cechy jakie są pożądane wśród naukowców dlatego jego pozostałe osiągnięcia ocenia się na poziomie bardzo dobrym.

3.8. Literatura

Zakończeniem rozprawy doktorskiej był spis literatury. Doktorant zacytował 63 pozycje naukowe, z czego zdecydowaną większość stanowią najnowsze publikacje naukowe. Doktorant również cytował podręczniki jak oraz raporty naukowe. Generalnie, cytowane źródła naukowe dobrano bardzo starannie a ich tematyka jest bezpośrednio związana z przeprowadzonymi badaniami.

3.9. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona przez Doktoranta tematyka rozprawy jest niezwykle istotna dla szeroko rozumianej dyscypliny inżynieria środowiska. Przede wszystkim precyzyjne pomiary opadów są kluczowe dla zrozumienia oraz prognozowania zjawisk agro-hydrometeorologicznych. Satelitarne dane opadowe mogą być stosowane do monitorowania przebiegu opadów na obszarach o różnych skalach powierzchni, w tym również tam gdzie dostęp do takich danych jest znacznie ograniczony. Poprawa jakości modeli agro-hydrologicznych poprzez ich efektywną kalibrację istotnie wpływa na wyniki ich symulacji, bezpośrednio przekładając się do bardziej precyzyjnych prognoz hydrologicznych oraz rolniczych. Może to mieć wpływ na efektywne zarządzanie gospodarką wodną oraz sektorem rolnictwa, w tym do przeciwdziałania negatywnym skutków suszy. Ponadto wykorzystanie przez Doktoranta zaawansowanych narzędzi badawczych do interpretacji przebiegu suszy jest kluczowe, w kontekście globalnych zmian klimatu oraz wyzwań związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa żywnościowego oraz dostępu do zasobów wodnych. Przedstawione przez Doktoranta badania są interdyscyplinarne, łączące ze sobą zarówno inżynierię środowiska jak i rolnictwo. Połączenie ze sobą tych dyscyplin umożliwiło Doktorantowi kompleksowe zrozumienie powiązań pomiędzy suszą a produkcją rolniczą. Przeprowadzone badania mają również bardzo wysoki potencjał wdrożeniowy. Uzyskane wyniki z całą pewnością mogą być kierowane do różnych grup praktyków takich jak przedsiębiorstwa rolne, administracja publiczna, decydenci polityczni, instytucje badawcze czy też społeczności lokalne. Badania mogą również stanowić podstawę do rozwiązywania istotnych problemów związanych z produkcją rolno-spożywczą i ochroną środowiska oraz wspierać zrównoważony rozwój społeczno-ekonomiczny. Najważniejszymi osiągnięciami Doktoranta jest wykazanie przydatności wskaźników suszy oraz integrację danych satelitarnych w poprawie dokładności modeli agro-hydrologicznych, a także zidentyfikowanie wyzwań związanych z danymi opadowymi i różnicami w rozkładzie susz w różnych regionach.

Podczas publicznej rozprawy doktorskiej prosiłbym aby Doktorant odniósł się do następujących kwestii: (i) Dlaczego do analizy przebiegu suszy meteorologicznej zastosowano wskaźnik SPI a nie SPEI? Jaka jest przewaga SPI nad SPEI? (ii) Do określania wskaźników SPI zastosowano rozkład gamma pomimo iż wskaźnik jest oparty na założeniach normalności rozkładu zmiennych losowych. Czy Doktorant badał zgodność rozkładu gamma ze zmiennymi losowymi? Czy rozkład ten był lepiej dopasowany niż normalny? (iii) Jakie są główne czynniki wpływające na jakość danych satelitarnych opisujących przebieg opadów atmosferycznych? (iv) Modelowanie przepływów za pomocą modelu SWAT+ przeprowadzono m.in. dla zlewni Welna. Jest ona nizinna, gdzie przepływy są w miarę wyrównane. Czy na jakość modelu SWAT+ może wpływać reżim hydrologiczny? Jak model ten mógłby pracować w zlewniach górskich o większym zróżnicowaniu przepływów? (v) Dlaczego produkty PERSIANN nie są satysfakcjonujące jako sygnał wejściowy do modeli hydrologicznych skoro wykazano że dane z tej bazy są zbliżone do referencyjnych baz opadowych? (vi) Czy w ramach przeprowadzonych badań

uwzględniono potencjalne zmiany w potrzebach wodnych roślin uprawnych które stanowiły by dostosowanie się takich roślin do zmian klimatycznych? (vii) Czy dokonano weryfikacji satelitarnych danych opisujących wilgotność podłoża glebowego, wykorzystywanych do optymalizacji procesów kalibracji modeli agro-hydrologicznych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest przygotowana bardzo starannie. Artykuły naukowe stanowiące jej podstawę opublikowano w bardzo prestiżowych czasopismach naukowych, co świadczy o tym że badania stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny agro-hydrologii. We wstępie Doktorant zdefiniował główny problem badawczy oraz uzasadnił podjęcie celu badawczego. Hipotezy badawcze przedstawiono w sposób jasny i klarowny, jednoznacznie wskazując na główne kierunki analiz. Założona metodyka w pełni pozwoliła na realizację postawionego celu pracy. Wyniki badań przedstawiono w sposób bardzo klarowny, umożliwiając ich interpretację. Dokonano ich szerokiej dyskusji, opierając się na najnowszej literaturze naukowej. Wnioski wynikają tylko z uzyskanych rezultatów badań. Poprzez pozostałe osiągnięcia naukowe, takie jak udział w konferencjach, staże zagraniczne, udział w projektach oraz publikacje w prestiżowych czasopismach naukowych Doktorant wykazał że już jest doświadczonym naukowcem oraz posiada wszystkie cechy oraz umiejętności jakie stawia się takim osobom. Mając powyższe na uwadze pozytywnie oceniam przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską, podkreślając jej bardzo wysoki poziom.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, w formie cyklu pięciu monotematycznych publikacji naukowych jest oryginalnym podejściem do rozwiązania problemu naukowego w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, jakim jest modelowanie przebiegu suszy. Doktorant przy zastosowaniu zaawansowanych technik badawczych zaplanował oraz zrealizował cel pracy. Wykazał się wiedzę teoretyczną oraz umiejętność rozwiązania problemów badawczych. Przedstawiona do recenzji rozprawa z całą pewnością stanowi wyróżniające się opracowanie naukowe, świadczące o wybitnym przygotowaniu merytorycznym Doktoranta. Uzyskane rezultaty przyczyniają się do rozwoju dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka poprzez pozyskanie nowej wiedzy na temat szeroko rozumianego modelowania przebiegu suszy.

Na podstawie wykonanej recenzji stwierdzam że rozprawa doktorska Pana Mohammadreza Einikarimkandi spełnia wymagania stawiane takim opracowaniom, według Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742 ze zm.). Dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie o dopuszczenie Pana Mohammadreza Einikarimkandi do publicznej obrony oraz dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Mając na uwadze bardzo wysoki poziom merytoryczny badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej, doskonały warsztat badawczy, wyróżniającą prezentację wyników w formie artykułów naukowych opublikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych, a także wpływ uzyskanych rezultatów na rozwój dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, wnioskuję o przyznanie Panu Mohammadreza Einikarimkandi wyróżnienia za rozprawę pt. „*Enhancing the accuracy of process-based and data-driven models for predicting drought*”.

Kraków, 14.06.2024 r.
Dariusz Mójński