

oddziałuje na temperaturę powietrza i wody, zwiększa parowanie oraz intensywność opadów atmosferycznych, i w związku z tym, również ma wpływ na częstość występowania, intensywność i wielkość hydrologicznych zjawisk ekstremalnych. Istotnym problemem badawczym jest określenie zarówno wielkości wpływu jak i niepewności związanych ze zmianami klimatu na podstawowe komponenty cyklu hydrologicznego bliskiej (do 2050 roku) jak również w dalekiej (do 2100 roku) przyszłości. Wiedza na temat zmian w składnikach bilansu wodnego pozwoli na określenie przyszłych zmian ekstremalnych zjawisk hydrologicznych przy wykorzystaniu w tym celu deterministycznych i stochastycznych modeli matematycznych.

Celem rozprawy doktorskiej było określenie potencjalnego wpływu zmian klimatu na ekstrema hydrologiczne oraz oszacowanie niepewności dla wybranych quasi-naturalnych zlewni w Polsce i Norwegii. Rozprawa, jak wspomniano wcześniej, została oparta na czterech publikacjach z listy filadelfijskiej.

W pracy przeanalizowano trendy projekcji zmiennych klimatycznych i hydrologicznych oraz ciągów ich wartości ekstremalnych za pomocą metod statystycznych, tj. nieparametrycznego testu Manna-Kendalla i jego zmodyfikowanej wersji (MMK) jak również wykorzystując podejście oparte na dyskretnej transformacji falkowej (DWT) i dynamicznej regresji harmonicznej (DHR). Doktorant przeprowadził badania w wybranych zlewniach rzek polskich i norweskich w ramach polsko-norweskiego projektu CHIHE (Climate Change Impact on Hydrological Extremes). Badania wykazały, że trendy w analizowanych zmiennych losowych zależą od specyficznych meteorologiczno-klimatycznych warunków w zlewni oraz reżimu hydrologicznego rzeki. W zlewniach o deszczowym reżimie powodzi, wzrost wysokości opadów prowadzi do wzrostu przepływów średnich i wysokich oraz silnych zmian sezonowych. Natomiast w zlewniach o powodziach związanych z topnieniem śniegu, wzrostowi średnich przepływów nie towarzyszy wzrost przepływów wysokich, a może nawet występować obniżenie maksymalnych rocznych przepływów. Niskie przepływy wskazują dodatni trend w większości badanych rzek polskich, natomiast w Norwegii większość badanych zlewni pokazuje ujemny trend.

Doktorant wykonał również analizę symulacji wystąpienia suszy, stosując następujące wskaźniki: SPI (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) oraz SRI (Standardized Runoff Index). Wskaźnik SPEI wskazał na najbardziej suche warunki w zlewniach w dalekiej przyszłości (2071-2100) w porównaniu z pozostałymi dwoma wskaźnikami.

W pracy Doktorant zbadał trzy możliwości wystąpienia niepewności związanych z określaniem charakterystyk hydrologicznych zjawisk ekstremalnych, wykorzystując w tym celu projekcje przyszłego klimatu. Pierwsza z nich to niepewność w estymacji parametrów przyjętych modeli hydrologicznych typu opad-odpływ, druga to niepewność predykcji zmian klimatu w modelach klimatycznych a trzecia to niepewność związana z doбором poprawnego modelu statystycznego - teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa dla zmiennych ekstremalnych. Doktorant przyjął do badań rozkład GEV (Generalized Extreme Value) określając kwantyle o różnym okresie powtarzalności (prawdopodobieństwie przewyższenia) dla dwóch serii przepływów o różnych liczebnościach. Do określenia niepewności parametrów modelu hydrologicznego zostało wykorzystane podejście GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) przy dwóch odrębnych kryteriach dla przepływów

minimalnych i maksymalnych. Badanie wrażliwości z zastosowaniem analizy wariancji ANOVA wskazuje, że niepewność związana z parametrami modelu hydrologicznego może być większa od pozostałych źródeł niepewności dla przepływów minimalnych, natomiast dla przepływów maksymalnych większa niepewność związana jest z dopasowaniem rozkładu prawdopodobieństwa i modelami klimatu niż z parametrami modelu hydrologicznego. Na podstawie wykonanych analiz Doktorant wykazał, że brak uwzględnienia któregokolwiek z badanych źródeł niepewności może prowadzić do dużego ryzyka w procesach decyzyjnych związanych z działaniami dla potrzeb adaptacji do zjawisk ekstremalnych oraz w planowaniu i zarządzaniu zasobami wodnymi w inżynierii i gospodarce wodnej. Ponadto Doktorant wykazał, że analiza względnych zmian w projekcji przyszłych zjawisk ekstremalnych z wykorzystaniem 30-letnich ciągów czasowych może prowadzić do błędnych oszacowań, które nie są zauważalne w 130-letnich ciągach projekcji.

Poniżej scharakteryzowane zostały pokrótce poszczególne rozdziały rozprawy:

Rozdział 1

Rozdział 1 stanowi przegląd dotychczasowego polskiego i międzynarodowego dorobku badawczego w zakresie wpływu zmian klimatu na środowisko przyrodnicze, społeczeństwo i gospodarkę oraz metod oceny i weryfikacji tego wpływu na występowanie i przebieg hydrologicznych zjawisk ekstremalnych (wezbrania-powódzie, niżówki-susze). Doktorant wykonał studia literaturowe i postawił podstawowe pytania istotne z punktu widzenia prowadzonych przez Niego prac badawczych, dotyczące następujących problemów:

- obszarowej i czasowej zmienności hydrologicznych i klimatycznych charakterystyk,
- metod wykrywania trendów w zmiennych hydrologicznych i klimatycznych,
- wielkości wpływu zmian klimatu na występowanie hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych,
- oceny wpływu długości ciągów pomiarowych przepływów na oszacowanie statystycznych charakterystyk przepływów, tj. kwantyli - przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia uwzględniając horyzont czasowy 30 i 130 lat,
- określenia źródeł niepewności w ocenie charakterystyk zdarzeń ekstremalnych,
- wyboru metod oceny przewidywanych w przyszłości wystąpień zdarzeń ekstremalnych z punktu widzenia metodologicznego.

W rozprawie Doktorant podjął próbę rozwiązania powyższych problemów, bazując na polskich i norweskich zlewniach wybranych w ramach realizacji projektu CHIHE.

Rozdział 2

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił metodologię oceny i modelowania (rys. 1 str. 13) przewidywanych zmian występowania zdarzeń ekstremalnych w bliskiej i dalekiej przyszłości. Doktorant zaproponował następujące główne kroki postępowania:

- Analiza obszarowej i czasowej zmienności danych wejściowych w modelu klimatycznym.
- Korekta błędów modelu klimatycznego dla potrzeb modelowania hydrologicznego.
- Kalibracja i walidacja modelu hydrologicznego.
- Oszacowanie i kwantyfikacja wpływu zmian klimatu na hydrologiczne zdarzenia ekstremalne (duże wezbrania i głębokie niżówki) wykorzystując w tym celu modele opad-odpływ.

- Kwerendowanie przewidywanej (prognozowanej) zmienności hydro-klimatycznych wskaźników – adaptacja i łagodzenie wpływu zmian.
- Oszacowanie niepewności w występowaniu przyszłych zdarzeń ekstremalnych - ujęcie ilościowe (wielkość i zasięg).

Rozdział 3

W rozdziale trzecim Doktorant sformułował podstawowy cel badawczy jakim jest ocena i oszacowanie ilościowe wpływu zmian klimatu na hydrologiczne zdarzenia ekstremalne na podstawie doświadczeń zebranych podczas przeprowadzonych badań dla wybranych polskich i norweskich rzek z uwzględnieniem towarzyszącej niepewności oceny i oszacowania tego wpływu, wykorzystując:

- klimatyczne prognozy programu EURO-CORDEX w ramach World Climate Research,
- modele procesów hydrologicznych: HBV i GR4J,
- metody analizy trendów: dyskretnej transformacji falkowej DWT, dynamicznej regresji harmonicznej DHR i zmodyfikowanego testu Manna-Kendalla MMK,
- symulację wystąpienia suszy przy zastosowaniu wskaźników: SPI (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) oraz SRI (Standardized Runoff Index),
- ocenę niepewności wynikającej z estymacji parametrów modelu procesów hydrologicznych, predykcji zmian klimatycznych oraz doboru poprawnego teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa dla zmiennych ekstremalnych.

Rozdział 4

Rozdział czwarty poświęcony jest omówieniu wyników przeprowadzonych przez Doktoranta badań, które szczegółowo zostały zaprezentowane w 7 artykułach naukowych, których Doktorant jest współautorem. Sześć artykułów zostało opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach posiadających tzw. *Impact Factor*, a jeden stanowi rozdział w monografii. Cztery artykuły spośród powyższych, przytoczone *in extenso* w 4 załącznikach (A,B,C i D), stanowią podstawę recenzowanej rozprawy doktorskiej. Są to:

1. Romanowicz R.J., Bogdanowicz E., Debele S.E., Doroszkiewicz J., Hisdal H., Lawrence D., **Meresa H.K.**, Napiórkowski J.J., Osuch M., Strupczewski W.G., Wilson D. & Wong W.K., 2016. *Climate Change Impact on Hydrological Extremes: Preliminary Results from the Polish-Norwegian Project*. Acta Geophysica 64 (2), 477-509. (Załącznik A)
2. **Hadush K. Meresa**, Marzena Osuch and Renata Romanowicz, 2016. *Hydro-Meteorological Drought Projections into the 21-st Century for Selected Polish Catchments*. Water 2016, 8(5), 206; doi: 10.3390/w8050206 (Załącznik B)
3. **Hadush K. Meresa**, Renata J. Romanowicz, Jaroslaw J. Napiorkowski, 2017. *Understanding changes and trends in projected hydroclimatic indices in selected Norwegian and Polish catchments*. Acta Geophys. AGPH-S-17-00103-1. DOI 10.1007/s11600-017-0062-5. (Załącznik C)
4. **Hadush K. Meresa** and Romanowicz, R.J., 2017. *The critical role of uncertainty in projections of hydrological extremes*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 4245–4258. (Załącznik D).

Doktorant omówił po krótko poszczególne artykuły. Pierwszy z nich prezentuje procedury zastosowane do wyboru zlewni do przeprowadzenia badań wpływu zmian klimatu w trakcie realizacji polsko-norweskiego projektu CHIHE. Drugi prezentuje projekcje zmian meteorologicznych i hydrologicznych susz do końca 21 wieku. Trzeci dotyczy analizy trendów metodami dyskretnej transformacji falkowej DWT, dynamicznej regresji harmonicznej DHR i zmodyfikowanego testu Manna-Kendalla MMK. Czwarty artykuł prezentuje analizę czułości i niepewności projekcji hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych w zlewni rzeki Biała Tarnawska.

Rozdział 5

W tym rozdziale Doktorant podsumował przeprowadzone i opisane w 4 artykułach badania. W konkluzjach Doktorat stwierdził, że temperatura powietrza i opad atmosferyczny, które są powszechnie używane jako wskaźniki charakteryzujące klimat, wykazują dużą zmienność w skali zlewni oraz rosnące trendy w przyjętych do badań zlewniach. Ponadto wpływ na przewidywane projekcje przepływu rzecznoego mają nie tylko zmiany klimatu, ale także ukształtowanie powierzchni zlewni, rodzaje gleb, zagospodarowanie terenu i szata roślinna. Zauważył również, że symulacje opadu i temperatury z modeli klimatycznych obciążone są błędami, które powinny być skorygowane, a techniki używane w tym celu mogą zaburzać oryginalny wpływ zmian klimatu.

Następnie Doktorant odniósł się kolejno do badanych zagadnień dotyczących:

1. Przewidywanych zmian temperatury i opadu, do oceny których zostały użyte: scenariusz emisji RCP4.5 i siedem globalnych i regionalnych modeli klimatycznych. Projekcje wiązkowe temperatury i opadu wykazały, że w Polsce w dalekiej przyszłości (2071-2100) maksymalna temperatura wzrośnie o 1,3 do 3°C. Natomiast różnica w średniej rocznej temperaturze między okresem referencyjnym (1971-2000) a bliską przyszłością (2021-2050) będzie wahać się w zakresie od 0,5 do 1,5°C. W przypadku rocznych sum opadu relatywne różnice między okresem referencyjnym a bliską przyszłością wahają się od 0,01 do 17%, a dla dalekiej przyszłości od 2 do 20% i są większe w zlewniach nizinnych a mniejsze w zlewniach górskich. Dla zlewni norweskich stwierdzono trendy rosnące w rocznych maksymalnych i średnich opadach stosując metody DWT i MMK, a nie stwierdzono żadnych trendów stosując metodę DHR.
2. Przewidywanych zmian w hydrologicznych zdarzeniach ekstremalnych, które sięgają nawet 800% w przypadku przepływów maksymalnych rocznych dla okresu dalekiej przyszłości dla rzek polskich. Dla niektórych zlewni odnotowano rosnące trendy w przepływach minimalnych, a dla niektórych malejące. Metoda DHR nie wykazała trendów. W zlewniach norweskich odnotowano wzrost przepływów maksymalnych rocznych zarówno w bliskiej jak i dalekiej przyszłości. Przepływy minimalne roczne wykazywały trendy rosnące i malejące w zależności od reżimu rzeki.
3. Przewidywanych zmian w meteorologicznych i hydrologicznych suszach. Przyjęte do badań wskaźniki dla 12 miesięcy SPI-12 i SRI-12 wskazują na przewagę okresów mokrych w przyszłości, zaś wskaźnik SPEI-12 na przewagę suchych okresów. Zaobserwowano dużą zmienność czasową wskaźników i ich zależność od prognozowanych projekcji opadu i temperatury. Nie odnotowano dużej zmienności obszarowej. Dla dalekiej przyszłości wskaźnik SPEI wskazuje na warunki suche i różni

się w ocenie od SPI i SRI. Według Doktoranta wynika to z przewidywanego globalnego ocieplenia, które ma wpływ na wzrost temperatury powietrza a w konsekwencji na ewapotranspirację.

4. Oceny niepewność ekstremów. Niepewność predykcji modelu hydrologicznego ma istotny wpływ na wielkość przepływów minimalnych zaś niepewność predykcji modelu klimatycznego wpływa poważnie na wielkość przepływów maksymalnych. Symulacje wykazały, że rezultaty predykcji na podstawie 30 letnich ciągów są obarczone dużą niepewnością i dają niewiarygodne oszacowania.

Rozdział 6

W tym rozdziale Doktorant podał rekomendacje dotyczące kierunków dalszych badań, które chce prowadzić w przyszłości, mianowicie: zastosowanie lepszych metod korekcji błędów w modelach klimatycznych; wykorzystanie modeli lepiej opisujących procesy hydrologiczne, na przykład modeli o parametrach rozłożonych; uwzględnienie w większym stopniu w dalszych badaniach zależności (korelacji) między zmianami klimatu a użytkowaniem terenu zlewni; zwiększenie długości ciągów, na podstawie których dokonuje się predykcji przyszłych zmian zjawisk ekstremalnych.

Analiza krytyczna rozprawy doktorskiej

Uwagi ogólne

- Tytuł rozprawy jest adekwatny do treści pracy.
- Tezy i cele przedstawione w rozdziałach 1 i 3 rozprawy sformułowane są poprawnie, pozwala to na łatwe śledzenie ich realizacji w opublikowanych artykułach.
- Struktura pracy jest przejrzysta, choć zdaniem recenzenta cele badawcze (Rozdział 3) powinny być podane przed metodologią badań (Rozdział 2).
- Mimo, że praca ma typowy format dla rozpraw doktorskich to podstawę rozprawy stanowi *de facto* zbiór 4 artykułów naukowych z przypisanymi im oznaczeniami załączników (A,B, C (brak przypisania str. 23) i D).
- Artykuły nie są jednak zamieszczone w załącznikach, a ich kolejność zamieszczenia nie jest zgodna z deklarowanymi na stronie 32 oznaczeniami załączników, co wprowadza pewien chaos i stanowi wraz z uwagą poprzednią bałagan edytorski rozprawy.
- Praca napisana jest językiem jasnym i zrozumiałym.
- Umieszczenie rysunków w tekście wyraźnie ułatwia czytanie i śledzenie wyników pracy.
- Wnioski z przeprowadzonych badań i opisanych w poszczególnych artykułach są sformułowane poprawnie.
- Podsumowanie w rozdziale 4 uzyskanych wyników jest właściwe, a konkluzje prezentowane w rozdziale 5 zgodne z doświadczeniami innych autorów.
- Rekomendacje prezentowane w rozdziale 6 świadczą o świadomości Doktoranta, że nie wszystko udało się rozwiązać w pracy oraz dobrze roszą co do Jego dalszego naukowego rozwoju w przyszłości.

Uwagi szczegółowe

- Rys. 4 str. 21 prezentuje zmienność wskaźników SPI, SPEI i SRI od przepływów średnich rocznych SQ, choć artykuł poświęcony jest niżówkom (przepływowi minimalnemu NQ). Czy zależność powyższych wskaźników od NQ jest taka sama jak dla SQ?

- Które wskaźniki są według Doktoranta bardziej miarodajne? SPI i SRI wskazują na występowanie mokrych lat w bliskiej i dalekiej przyszłości, a wskaźnik SPEI na suche lata.
- Czy analiza trendów metodami dynamicznej regresji harmonicznej DHR w świetle uzyskanych wyników przedstawionych na rys. 6 str.24 (duże różnice w przebiegu między sygnałem modelowanym (data), a estymowanym sygnałem z modelu DHR) jest dobrym narzędziem do oceny występowania trendu?
- Jakie kryteria wyboru rozkładu GEV zostały zastosowane w projekcjach przepływów ekstremalnych (Załącznik D str. 4250)?
- Jakimi przesłankami kierowano się przy wyborze kwantyla Q_{T30} o okresie powtarzalności $T=30$ lat (prawdopodobieństwo przewyższenia $p=3,3\%$) w analizach niepewności (Załącznik D str. 4254)?
- Między rys. 7 (Załącznik D str. 4254) a rys.7 str. 26 występuje niezgodność w ocenie źródła niepewności dla przepływów minimalnych.
- Istnieje również sprzeczność w interpretacji głównego źródła niepewności przepływów maksymalnych przedstawionego na rys. 7 str. 26 (niepewność związana z doбором rozkładu prawdopodobieństwa) z jednej strony, a opisem rysunku 7 na str. 26 i zapisami konkluzji dotyczącej niepewności przepływów ekstremalnych na str. 29 z drugiej (niepewność związana z projekcjami z modelu klimatycznego). Niezgodność ta występuje również między rys. 7a i 8a (Załącznik D str. 4254) dla kwantyla Q_{T30} .
- W artykułach Doktorant wykorzystuje do symulacji projekcji przepływów 2 modele hydrologiczne o parametrach skupionych: HBV (14 parametrów) i GR4J (7 parametrów). Czy zatem postulat Doktoranta w konkluzjach (Rozdział 6) wykorzystania modeli lepiej opisujących procesy hydrologiczne, na przykład modeli o parametrach rozłożonych, a więc modeli bardziej złożonych z większą liczbą parametrów, będących w funkcji charakterystyk fizycznogeograficznych zlewni, ma sens z punktu widzenia niepewności uzyskanych symulacji?

Podsumowanie oceny rozprawy

Doktorant w pełni zrealizował postawione sobie cele badawcze. Praca dowodzi umiejętności prowadzenia przez mgra Hadush Kidane Meresa badań naukowych. Mimo, że prezentowane w rozprawie artykuły są współautorskie Doktorant wykazał, że większość pracy w przygotowaniu badań, opracowaniu wyników i opublikowaniu artykułów wykonał samodzielnie.

Wniosek końcowy

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pt. „Modelling of Hydrological Extremes under the Influence of Future Climate Change” spełnia warunki określone w art.13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2014 r. poz. 1852 ze zm.) stawiane pracom doktorskim. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgra Hadush Kidane Meresa do obrony publicznej recenzowanej rozprawy.

Bogdan Ojca-Zieliński