

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Stróżeckiego pt. „WPŁYW ZREDUKOWANYCH SUM OPADÓW I PODWYŻSZONEJ TEMPERATURY NA WYMIANĘ NETTO STRUMIENI CO₂ I CH₄ NA TORFOWISKU W RZECINIE”

1. Informacje wstępne

Recenzję pracy doktorskiej wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu Pana prof. UPP dr. hab. inż. Jerzego Bykowskiego, działającego na podstawie uchwały Rady Wydziału z dnia 11. lipca 2019 r. Oceniana rozprawa została przygotowana na ww. Wydziale pod kierunkiem promotora prof. UPP dr. hab. inż. Radosława Juszczaaka oraz promotora pomocniczego dr. inż. Marka Urbaniaka.

2. Ogólna charakterystyka – zasadność podjęcia tematu

Zmiana klimatu to temat trudny i złożony, jednak skutki tego procesu obserwowane są w skali globalnej od wielu lat. Jak wskazuje w swych raportach Międzyrządowy Zespół do spraw Zmiany Klimatu IPCC kontynuacja emisji gazów cieplarnianych spowoduje dalsze ocieplenie, co przełoży się na zmiany wszystkich elementów systemu klimatycznego, w konsekwencji zwiększając prawdopodobieństwo dotkliwych i nieodwracalnych następstw dla gospodarki i ekosystemów. Dlatego też niezwykle ważnym jest rozpoznawanie procesów akumulacji i uwalniania węgla z naturalnych lub też przekształconych przez człowieka ekosystemów. Z tego też względu zaproponowana tematyka pracy idealnie wpisuje się w to zagadnienie. Torfowiska są bowiem ekosystemami uważanymi za znaczne magazyny węgla, przez co odgrywają znaczącą rolę w cyklu węglowym. Są jednak uznawane za jedno z najbardziej narażonych ekosystemów na skutki zmiany klimatu. Zmiana ta uwidacznia się poprzez wzrost średniej globalnej temperatury powietrza oraz przestrzenno-czasową zmienność opadów atmosferycznych, z jednej strony przejawiającą się większą częstością opadów ekstremalnych, z drugiej natomiast występowaniem okresów bezopadowych. W jej efekcie ekosystemy torfowisk z pochłaniaczy ditlenku węgla (CO₂) mogą zmienić się w emitery tego gazu. Z drugiej strony osuszenie torfowisk może skutkować zmniejszoną emisją metanu (CH₄) z ich obszaru. Z tego też względu niezbędne jest rozpoznanie mechanizmów funkcjonowania tych ekosystemów w warunkach prognozowanej zmiany klimatu i jej wpływu na bilans ww. gazów. Odpowiedzią na potrzebę pozyskania tej wiedzy jest oceniana rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Stróżeckiego pt. „Wpływ zredukowanych sum opadów i podwyższonej temperatury na wymianę netto strumieni CO₂ i CH₄ na torfowisku w Rzecinie”. Dotyczy ona oceny wpływu manipulacji elementami klimatu tj. opadem atmosferycznym i temperaturą powietrza na wielkość strumieni netto ditlenku węgla oraz metanu pomiędzy powierzchnią torfowiska a atmosferą oraz na bilans netto wymiany gazów szklarniowych w warunkach kontrolowanego eksperymentalnego modelowania. Manipulacja ta polegała na modyfikacji warunków termicznych i/lub opadowych poprzez podniesienie temperatury i/lub redukcji opadów atmosferycznych docierających do powierzchni torfowiska.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Stróżeckiego ma charakter pracy twórczej, ponieważ powstała na bazie wyników pomiarów prowadzonych w ramach polowych badań eksperymentalnych na torfowisku w Rzecinie w latach 2016-2017. Badania prowadzone były w ramach trzech projektów badawczych tj. 1) „*Central European Wetland Ecosystem Feedbacks to Changing Climate – Field Scale Manipulation*”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju z funduszy Polsko-Norweskiego Programu Badawczego; 2) „*Reakcja fluorescencji indukowanej promieniowaniem słonecznym oraz fotosyntezy roślinności torfowiska na stres wywołany symulowanym deficytem wodnym i podwyższoną temperaturą w warunkach klimatycznego eksperymentu manipulacyjnego*”

oraz 3) „Wpływ podwyższonej temperatury oraz zredukowanych opadów na emisję metanu (CH_4^{12}/CH_4^{13}) z torfowiska w warunkach klimatycznego eksperymentu manipulacyjnego”, oba finansowane przez Narodowe Centrum Nauki. Ciągłość finansowania tych badań świadczy jednoznacznie o trafności i ważności podjętych badań przez mgr. inż. Marcina Strożeckiego.

3. Struktura i zawartość pracy

Opiniowana rozprawa doktorska składa się ze 162 numerowanych stron, w tym 12 stron spisu literatury, 7 stron spisu tabel, rysunków i załączników oraz 12 stron załączników. Zasadnicza część pracy składa się z 6 rozdziałów, opatrzona jest 105 rysunkami i 25 tabelami, na 265 udokumentowanych pozycji literatury 246 wykazanych jest w języku angielskim.

We Wprowadzeniu (rozdział 1) Autor zaprezentował uwarunkowania celowości podjęcia badań nad wpływem zmian temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na wymianę strumieni netto CO_2 i CH_4 na torfowisku z wykorzystaniem manipulacyjnych eksperymentów klimatycznych. Ich uzasadnieniem jest poszukiwanie odpowiedzi na pytanie jak tak złożone ekosystemy jak torfowiska będą funkcjonowały w warunkach wzrostu temperatury powietrza i przesuszenia ich powierzchni, co ma istotne znaczenie przy ocenie obiegu węgla w środowisku. W rozdziale tym Autor zdefiniował cel naukowy oraz w nawiązaniu do Raportu Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatu IPCC postawił dwie hipotezy badawcze, które pozwalają sobie przytoczyć:

1. Wzrost temperatury i redukcja opadów spowodują przesuszenie wierzchniej warstwy torfowiska, co skutkować będzie zwiększeniem emisji CO_2 do atmosfery. Z powodu przesuszenia wierzchniej warstwy torfowiska zmaleje strumień CH_4 emitowane do atmosfery. Jednocześnie, wraz ze wzrostem temperatury, produktywność torfowiska, wyrażona ilością CO_2 pochłoniętego w procesie fotosyntezy, zwiększy się.

2. Wzrost temperatury i redukcja opadów na torfowisku skutkować będą zmianą bilansu gazów szklarniowych wyrażoną wskaźnikiem globalnego ocieplenia (GWP). W strukturze bilansu gazów szklarniowych torfowiska zmaleje udział emisji netto CH_4 , a wzrośnie udział strumieni netto CO_2 , jednak wskaźnik GWP dla torfowiska poddanego manipulacjom nie zmieni się istotnie, a torfowisko będzie netto emitorem gazów szklarniowych do atmosfery.

Rozdział drugi, który jest dość obszernym opracowaniem, stanowi przegląd stanu wiedzy w zakresie problematyki poruszanej w rozprawie. Autor na 23 stronach zaprezentował szerokie spektrum tematycznej literatury głównie zagranicznej (ponad 170 pozycji), a także krajowej (12 pozycji). Dla większej przejrzystości prezentowanych zagadnień Autor podzielił treści tego rozdziału na pięć zasadniczych części. Pierwsza dotyczyła zagadnienia gazów szklarniowych i ich wpływu na zmianę klimatu, wraz ze wskazaniem jej najbardziej prawdopodobnych efektów. W drugiej i trzeciej części omówił klasyfikację terenów podmokłych oraz ich rolę w obiegu węgla, ze szczególnym uwzględnieniem torfowisk. Autor podkreślił rolę torfowisk jako pochłaniaczy węgla netto, umiarkowanego źródła metanu i nieznacznego źródła tlenu diazotu (N_2O). Wskazał jednak, że zarówno nieuniknione przemiany antropogeniczne torfowisk jak i zmiana klimatu, zwłaszcza wzrost średniej temperatury powietrza i redukcja opadów atmosferycznych przyczyniają się do przesuszania torfowisk, a w konsekwencji do ich zamiany z pochłaniaczy węgla w silne emitery. Podkreślił także istotność warunków hydrologicznych na terenach podmokłych w obiegu węgla. Natomiast w czwartej i piątej części Autor przedstawił najważniejsze z punktu widzenia swoich badań zagadnienia tj. klimatyczne eksperymenty manipulacyjne i techniki manipulacji klimatem oraz metody pomiarów wymiany gazów szklarniowych pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą. Wskazał, że pomimo wielu przeprowadzonych doświadczeń reakcje ekosystemów lądowych na zmianę klimatu pozostają zagadnieniem wciąż nie do końca poznanym, a dostępne możliwe do zastosowania techniki manipulacyjne pozwalają jedynie w pewnym stopniu zasymulować intensywność efektu szklarniowego. Autor nie pozostaje bezkrytyczny w stosunku do stosowanych metod manipulacji temperaturą oraz opadem atmosferycznych, jak również metod pomiarów wymiany gazów szklarniowych. Doktorant zwraca uwagę na stosowanie przez różne zespoły badawcze autorskich projektów komór przeznaczonych do badań w konkretnych warunkach. Takie podejście niestety nie pozwala na porównywalność otrzymanych wyników, kosztownych i niestandardowych, a jakże istotnych badań. Wynika to z faktu, że w dostępnych publikacjach naukowych brak jest szczegółowych

opisów stosowanej aparatury gotowej lub wytworzonej, co uniemożliwia jej powielenie w innych warunkach środowiskowych. Dodatkowym atutem Autora pracy jest porównawcze zestawienie przykładów stosowanych eksperymentów z wykorzystaniem różnych metod manipulacji temperaturą oraz opadem jak również automatycznych systemów komorowych w tabelach 2-6 oraz graficzna oprawa rozdziału. Zaprezentowane w rozdziale drugim informacje oraz forma ich przedstawienia świadczą o tym, że Autor posiada bardzo dobrą znajomość zagadnień związanych z tematyką poruszaną w rozprawie doktorskiej.

Rozdział trzeci zatytułowany Metodyka pomiarów obejmuje charakterystykę obiektu badawczego, opis klimatycznego eksperymentu manipulacyjnego, bardzo szczegółową charakterystykę automatycznego komorowego systemu pomiarowego wykorzystanego w badaniach terenowych oraz metodykę opracowywania danych pomiarowych pozyskanych z prowadzonego eksperymentu polowego. Badania intensywności wymiany strumieni CO₂ oraz CH₄ Doktorant prowadził na terenie torfowiska w Rzecinie, w północno-zachodniej części województwa wielkopolskiego. Były one wykonywane w ramach klimatycznego eksperymentu manipulacyjnego WETMAN w latach 2016-2017, w okresie od stycznia do grudnia. W celu zweryfikowania postawionych hipotez podnoszono temperaturę powierzchni torfu poprzez zastosowanie promienników podczerwieni oraz ograniczano ilość docierającego opadu do powierzchni torfowiska poprzez zastosowanie ruchomej markizy. Zakładano redukcję opadów nocnych na poziomie 30-35% rocznej sumy opadu. Eksperyment prowadzony był w czterech wariantach: kontrola – stanowisko niepoddane manipulacji, stanowisko ogrzewane, stanowisko ogrzewane z jednoczesną redukcją ilości opadów docierających do powierzchni torfowiska oraz stanowisko z redukcją ilości opadów docierających do powierzchni torfowiska, a każdy wariant zaplanowano w trzech powtórzeniach. Pomiary prowadzone były z wykorzystaniem autorskiego systemu pomiarowego, zaprojektowanego i zbudowanego przez pracowników Katedry Meteorologii Uniwersytetu w Poznaniu, będącego przedmiotem zgłoszenia patentowego, w którym, co należy szczególnie podkreślić, Doktorant ma również swój udział. Z tego też względu w tej części pracy w podrozdziałach 3.2 i 3.3 Autor dokonał opisów zarówno infrastruktury badawczej jak i pomiarowej, w tym elementów agro i hydrometeorologicznych tj. promieniowanie fotosyntetycznie aktywne, temperatura powietrza i gleby, sumy opadów atmosferycznych oraz poziom zwierciadła wody gruntowej, a także fizykochemicznych torfowiska. tj. pH i konduktywność w warstwie nienasyconej. Brakuje jednak uzasadnienia celowości tak szczegółowego opisu infrastruktury badawczej automatycznego systemu pomiarowego jak zaprezentowany na stronach 47-53 (podrozdziały 3.3.1-3.3.4), udokumentowanego znacząco ilością szczegółowych rycin (ryc. 36-48). Za zasadne i jednocześnie cenne uważam przedstawienie na schemacie blokowym (ryc. 45) sekwencji pomiarów na stanowisku badawczym. Taka forma porządkuje w jasny sposób kolejność operacji wykonywanych przez system pomiarowy, wynikających z zamieszczonych w tej części szczegółowych opisów. Opis budowy i wyposażenia zastosowanego systemu komór pomiarowych uważam za uzasadniony (podrozdział 3.3.5). Cenny jest podrozdział 3.3.7, w którym Autor omówił sposób pomiaru stężeń obu gazów z wykorzystaniem analizatorów gazowych z jednoczesną analizą przykładowego przebiegu pojedynczej iteracji pomiaru na stanowisku badawczym. Co ważne, zwrócił także uwagę na zachowanie dokładności pomiarów, którą zapewniała regularna kalibracja zastosowanych analizatorów. W celu zweryfikowania szczelności całego układu pomiarowego, która jest warunkiem koniecznym uzyskania wiarygodnych wyników, zaplanował i przeprowadził testy szczelności tego układu.

W dalszej części tego rozdziału (podrozdział 3.4) Autor zaprezentował szczegółowo kolejne etapy analizy pozyskanych danych pomiarowych tj.: 1) obliczanie strumieni CO₂ oraz ich modelowanie z podziałem na strumienie R_{eco} (oddychanie ekosystemu), GPP (produkcja pierwotna brutto) i NEE (wymiana ekosystemu netto) oraz 2) obliczanie strumieni CH₄ wraz z ich modelowaniem z rozdzieleniem na strumienie emitowane na drodze bąblowania i w procesach dyfuzji na podstawie ich zależności z temperaturą, z wykorzystaniem trzech modeli. Działania te miały na celu uzyskanie najbardziej dokładnego odwzorowania rocznej emisji tego gazu. Obliczenia prowadzono w oparciu o dostępny w literaturze skrypt opracowany przez Hoffmann'a z zespołem. Do wyznaczenia parametrów modelu R_{eco} Autor posłużył się zależnością wykładniczą z modelu Arrheniusa, natomiast do wyznaczenia parametrów modelu dla zależności GPP od strumieni promieniowania fotosyntetycznie aktywnego PPFD –

modelu opisanego równaniem Michaelisa-Mentena, co jest metodycznie uzasadnione i przyjęte w literaturze. Każdy z etapów opatrzony został stosownym opisem zarówno założeń jak i samego procesu obliczeń, wzbogaconym schematami je ilustrującymi. Analizy te poprzedziło zasadne opracowanie mechanizmu korekty promieniowania PPF, pomierzonego na stacji w Rzecinie, wykorzystywanego w procesie modelowania wymiany CO₂. Wynikało to z krytycznego podejścia Autora co do wyników pomiarów tego elementu z wykorzystaniem komory przezroczystej. Co ważne, przy tak dużej liczbie wykonanych pomiarów na przestrzeni lat 2016-2017 (około 60 tysięcy pojedynczych pomiarów strumieni CO₂ i CH₄), Doktorant każdorazowo dokonał także analizy jakościowej pozyskanych z pomiarów zbiorów danych strumieni CO₂ i CH₄. Przedstawiony na ryc. 60 procentowy udział pomiarów analizowanych gazów na poszczególnych stanowiskach badawczych w obu latach doświadczeń na zbliżonym poziomie, otrzymany pomimo okresowych zaburzeń pracy systemu, dowodzi powtarzalności prowadzonych pomiarów i można go uznać za kontrolowalny w wystarczającym stopniu.

Zaprezentowany program badań i analiz jest logiczny i poprawny, a opisy uwarunkowań prowadzenia eksperymentu świadczą o wiedzy i dużych umiejętnościach organizacyjnych Autora w zakresie prowadzenia doświadczenia polowego oraz logicznej interpretacji przyjętych rozwiązań.

Kolejny rozdział piąty zatytułowany Wyniki oraz dwa kolejne szósty Dyskusja i siódmy Wnioski stanowią najistotniejszy element tej rozprawy doktorskiej.

Rozdział Wyniki podzielony został na sześć zasadniczych podrozdziałów, obejmujących łącznie 48 stron, w których Autor opisał uzyskane wyniki pomiarów i modelowania strumieni CO₂ i CH₄ oraz własne przemyślenia, uzupełnione bogatym materiałem graficznym i tabelarycznym (41 rysunków i 18 tabel). Opis ten Autor rozpoczął od charakterystyki warunków opadowych, termicznych torfu i powietrza, promieniowania PPF oraz głębokości zalegania zwierciadła wody gruntowej, a także odczynu wody torfowej podczas trwania eksperymentu. Autor dokonał porównania efektów stosowanej manipulacji opadem, wskazując na osiągnięty wynik jego redukcji na poziomie 38% w 2016 r. i 24% w 2017 r. dotyczącej tylko okresu od kwietnia do października, co wynikało z przyjętych założeń metodycznych. Doktorant wskazał, że w efekcie zastosowanych manipulacji temperaturą uzyskano różnice jej średnich rocznych wartości na głębokości 2 cm pomiędzy stanowiskami ogrzewanymi a kontrolnym średnio na poziomie 1,0 i 0,7°C odpowiednio w 2016 i 2017 r. Stwierdził także wyższą efektywność ogrzewania stanowisk podczas nocy oraz w miesiącach zimowych. Można zatem stwierdzić, że pomimo pewnych ograniczeń zastosowanych systemów zarówno ogrzewania stanowisk jak i redukcji opadów uzyskał zamierzony efekt w zakresie manipulacji temperaturą i opadem atmosferycznym. W kolejnym podrozdziale 4.3 zasadnym było opracowanie zestawu 144 współczynników korekcyjnych dla promieniowania PPF pomierzonego poza komorą (Tab. 8) (dla poszczególnych miesięcy w latach prowadzenia eksperymentu polowego, przy różnych stopniach zachmurzenia nieba w ich obrębie, z jednoczesnym rozdzieleniem na godziny przed i popołudniowe), wykorzystywanego w dalszym procesie modelowania wartości GPP przy wyznaczaniu parametrów modelu, co Doktorant potwierdził przykładem wymodelowanych dobowych wartości GPP z i bez stosowania odpowiednich korekt. W kolejnych dwóch podrozdziałach 4.4 oraz 4.5 Autor przedstawił wyniki dotyczące pomierzonych i oszacowanych wielkości strumieni tj. CH₄, R_{eco}, GPP oraz NEE w zależności od wariantu doświadczenia, zgodnie z metodyką zaprezentowaną w rozdziale 3.4. Autor wykazał, że w 2016 r. pomierzone wielkości strumieni CH₄, najlepiej korelowały z temperaturą torfu na głębokości 2 cm, za wyjątkiem stanowiska z redukowanym opadem, natomiast w 2017 r., za wyjątkiem stanowiska ogrzewanego, z temperaturą na głębokości 5 cm (ryc. 83). Doktorant stwierdził brak korelacji pomierzonych wartości strumieni ww. gazu z głębokością zalegania zwierciadła wody gruntowej, a za najbardziej prawdopodobną przyczynę takiego stanu wskazał strukturę budowy geologicznej torfowiska, powodującą, że bez względu na zmienność poziomu wody nie zmienia się jej dostępność dla roślin torfowiska. Autor wykazał, że torfowisko w Rzecinie jest emitentem tego gazu do atmosfery, a zastosowane manipulacje temperaturą i opadem wpłynęły na wielkość skumulowanej rocznej emisji CH₄ do atmosfery. Ich efekt był wyraźnie widoczny w 2016 r., w którym zastosowane modyfikacje skutkowały wzrostem emisji CH₄ do atmosfery od 24 do 28% w stosunku do stanowiska kontrolnego. Autor nie stwierdził zależności udziału poszczególnych źródeł emisji CH₄ od rodzaju zastosowanej manipulacji. W podrozdziale 4.5.1 na podstawie analizy porównawczej pomierzonych wartości R_{eco} na poszczególnych stanowiskach

pomiarowych Doktorant wskazał na dużą zmienność strumieni emisji CO₂, która z jednej strony wynikać mogła np. ze zróżnicowania gatunkowego porastających roślin na poszczególnych polach, jak i warunków hydrometeorologicznych panujących w latach prowadzenia eksperymentu. Zgodnie z założoną metodyką Autor wyznaczył parametry modelu R_{eco} - R_{ref} i E₀ wykorzystując wartości temperatury torfu na głębokości 2 i 5 cm, a jego weryfikacja potwierdziła bardzo dobre dopasowanie wartości wymodelowanych do rzeczywiście pomierzonych (podrozdział 4.5.2). Zamodelowane wartości strumieni CO₂ emitowanych z torfowiska w Rzecinie wskazały na wyraźny wzrost emisji CO₂ trwający od marca do połowy lipca. Autor stwierdził, że w obu latach prowadzenia eksperymentu zastosowane manipulacje temperaturą oraz temperaturą i opadem w 2017 r. nie wpłynęły istotnie na ilość wyemitowanego do atmosfery CO₂, co nie potwierdziło zakładanej przez Niego hipotezy, że wraz ze wzrostem temperatury zwiększy się emisja CO₂ z torfowiska. Natomiast w efekcie ograniczania opadu docierającego do powierzchni otrzymane wartości strumieni R_{eco} były istotnie niższe w odniesieniu do stanowiska kontrolnego. Autor dokonał też oceny zależności pomierzonych wartości strumieni NEE z ilością promieniowania PPFd docierającego do komory. Doktorant zwrócił uwagę, że uzyskał niższe wartości współczynników determinacji dla każdego ze stanowisk w odniesieniu do spotykanych w literaturze, ale też przedstawił logiczne uzasadnienie przyczyn tych różnic. Na podstawie wymodelowanych wartości strumieni GPP (podrozdział 4.5.5) Autor stwierdził, że w obu latach zastosowane manipulacje samą temperaturą jak i temperaturą i opadem nie wpłynęły istotnie na zmianę produktywności torfowiska. Natomiast samo przesuszenie jego powierzchni na skutek redukcji opadu skutkowało zmniejszeniem się jego produktywności, o czym świadczą otrzymane istotnie niższe roczne wartości GPP. Najcenniejszy jest podrozdział 4.5.6., w którym Autor ocenił wpływ zastosowanych manipulacji temperaturą i opadem na wielkość NEE. Na podstawie wymodelowanych rocznych wartości NEE dla poszczególnych wariantów eksperymentu wykazał, że bez względu na zastosowane manipulacje i rok badań torfowisko pochłonęło więcej CO₂ niż wyemitowało do atmosfery, co jest dobrą perspektywą, jednak zastosowane modyfikacje warunków termiczno-opadowych miały wpływ na strumienie netto i bilans wymiany netto CO₂ torfowiska. W kolejnym podrozdziale 4.6 Doktorant dokonał oceny wpływu zastosowanych manipulacji na bilans netto wymiany gazów szklarniowych torfowiska, co uważam za bardzo cenne, wskazując, że w zakładanym 100-letnim horyzoncie czasowym torfowisko będzie miało negatywny wpływ na klimat. Autor za najbardziej prawdopodobny scenariusz zmiany wskazał jednoczesny wzrost temperatury i redukcję opadów powodujący wzrost GWP o 30% i 10% w odniesieniu odpowiednio do 2016 i 2017 r. W świetle przeprowadzonych analiz bilans wymiany GHG na torfowisku w Rzecinie jest i będzie zdominowany przez strumienie metanu.

Zaprezentowane w rozdziale czwartym treści świadczą o dużych umiejętnościach Doktoranta w zakresie prowadzenia analiz materiałów pomiarowych jak i wymodelowanych wartości oraz logicznego łączy faktów. Dowodem na to są podejmowane przez Niego liczne konfrontacje otrzymanych wyników z bogatymi źródłami literaturowymi i podejmowane próby logicznego uzasadniania otrzymywanych różnic, bądź potwierdzania podobieństw. Treści te w połączeniu z przedstawioną w rozdziale piątym dyskusją dowodzą dobrego warsztatu analitycznego. Rozdział ten Autor podzielił na trzy części. Obejmowały one: ocenę funkcjonowania eksperymentu manipulacyjnego WETMAN, ocenę funkcjonowania wykorzystywanego automatycznego systemu komorowego i, co bardzo cenne, ocenę wpływu manipulacji na bilans netto wymiany CO₂, CH₄ i gazów szklarniowych ogółem. Jednak myślę, że Autor postawił na tym etapie przed sobą trudne zadanie, ponieważ pewną formę dyskusji wyników i ich oceny przedstawił już w rozdziale czwartym.

W rozdziale szóstym zatytułowanym Wnioski Autor na podstawie przeprowadzonych badań i dokonanych analiz sformułował osiem wniosków, z czego dwa mają charakter dość rozbudowany.

4. Wartość naukowa rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr. inż. Marcina Stróżeckiego prezentuje aktualne kierunki i tendencje badań, jakie są wyznaczane na Świecie w zakresie wpływu przewidywanej zmiany klimatu na funkcjonowanie naturalnych ekosystemów. W tym kontekście tworzone hipotezy należy weryfikować poprzez planowanie i realizowanie eksperymentów w warunkach naturalnych i jest to z pewnością metoda naukowa, będąca najlepszym narzędziem poznawania środowiska przyrodniczego.

Podjętą przez Doktoranta tematykę oceniam bardzo wysoko. Niekwestionowana jest rola terenów podmokłych w procesie wycofywaniu węgla z obiegu w przyrodzie, jednakże funkcjonowanie torfowisk, które są ekosystemami wrażliwymi zarówno na zmiany temperatury jak i reżimu hydrologicznego, może ulec przekształceniu. Przeprowadzony terenowy eksperyment manipulacyjny, wykorzystujący autorski system pomiarowy, pozwolił na modyfikację obu tych czynników i, w efekcie, na pozyskanie bardzo cennych informacji ilościowych, jak te ekosystemy mogą zachować się w aspekcie wymiany netto strumieni CO_2 i CH_4 w takich warunkach. Eksperymenty manipulacyjne są z założenia dużymi i kosztownymi wyzwaniem, a i torfowisko nie jest obiektem łatwym do prowadzenia badań terenowych, biorąc pod uwagę możliwości techniczne oraz konieczność częstego nadzoru i kontroli prowadzonych w systemie ciągłym pomiarów. Co prawda badania o tej tematyce podejmowane są na świecie od lat, jednak w skali kraju zaprezentowany eksperyment jest ewenementem. Na podkreślenie zasługuje poniesiony przez Doktoranta nakład pracy na pozyskanie olbrzymiej ilości danych w warunkach terenowych, ich przetwarzanie, jakościowa analiza oraz duża ilość wielowariantowych obliczeń, co pozwoliło na uzyskanie interesujących wyników w efekcie zastosowania eksperymentu manipulacyjnego na torfowisku w Rzecinie.

Do najważniejszych osiągnięć ocenianej rozprawy zaliczam:

- osiągnięcie zamierzonego celu z wykorzystaniem aktywnego systemu manipulacyjnego, w którym zastosowano promienniki podczerwieni oraz technikę markizy, tj. uzyskanie wzrostu temperatury o około $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ i redukcję opadów nocnych zbliżoną do zakładanego poziomu 30-35% rocznej sumy opadu - średnio dla obu lat 31%. Pozwoliło to na określenie wpływu manipulacji klimatem na bilans wymiany netto CO_2 i CH_4 oraz gazów szklarniowych torfowiska;
- opracowanie zestawu współczynników niezbędnych do korekty wielkości promieniowania PPFd wykorzystywanego w dalszym procesie modelowania strumieni GPP; ten etap analiz dowodzi krytycznego podejścia Doktoranta zarówno do zastosowanego systemu pomiarowego, jak również umiejętności poprawnej interpretacji czynników środowiskowych;
- wymodelowanie strumieni CH_4 oraz CO_2 z ich rozdzieleniem na R_{eco} , GPP oraz NEE, co pozwoliło wyznaczyć roczne bilanse wymiany każdego z ww. gazów w efekcie zastosowanych modyfikacji w odniesieniu do warunków termiczno-opadowych;
- wykazanie, że ocieplenie wierzchniej warstwy torfu na torfowisku w Rzecinie wpłynie na zwiększenie emisji CH_4 do atmosfery; natomiast jej przesuszenie nie wpłynie istotnie na zmniejszenie emisji ww. gazu do atmosfery, co jednocześnie nie potwierdziło stawianej hipotezy;
- wykazanie, że na torfowisku w Rzecinie wzrost temperatury nie spowoduje zwiększenia emisji CO_2 do atmosfery na skutek oddychania ekosystemu, podobnie jak przesuszenie wierzchniej warstwy torfu na skutek redukcji opadów może nie wpływać na zmianę emisji CO_2 do atmosfery, z zaznaczeniem torfowisk składających się z pływającego pła, co nie potwierdziło stawianej hipotezy;
- wykazanie, że przesuszenie wierzchniej warstwy torfowiska na skutek redukcji opadów może skutkować istotnym statystycznie zmniejszeniem jego produktywności, natomiast efekt ten nie będzie widoczny w przypadku jednoczesnego wzrostu temperatury i redukcji opadu,
- wykazanie, że zastosowane manipulacje temperaturą i opadem miały wpływ na strumienie netto i bilans wymiany netto CO_2 torfowiska w Rzecinie, w szczególności, że: przesuszenie wierzchniej warstwy torfowiska na skutek redukcji opadów skutkowało może zmniejszeniem emisji CO_2 do atmosfery, ale też i jednoczesnym spadkiem produktywności torfowiska; natomiast jednoczesny wzrost temperatury i redukcja opadów może wpływać pozytywnie na bilans CO_2 poprzez zredukowanie ilości wyemitowanego CO_2 przy jednoczesnym utrzymaniu produktywności torfowiska; samo podniesienie temperatury torfowiska może nie mieć istotnego wpływu na bilans CO_2 ;
- wykazanie, że niezależnie od przyjętego scenariusza zmian klimatu, torfowisko w Rzecinie będzie netto źródłem gazów szklarniowych emitowanych do atmosfery, a bilans ten będzie zdominowany przez strumienie metanu.

Poczynione przez Autora spostrzeżenia oraz uzyskane w efekcie przeprowadzonych bardzo rozległych obliczeń i wnikliwych analiz wyniki ilościowe są bardzo cenne i pozwolą na uzupełnienie o jeszcze jeden wskaźnik modeli bilansu gazów cieplarnianych.

5. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

1. Nieco razi mnie zaprezentowana w rozdziale 3.1.2 bardzo pobieżna charakterystyka warunków pogodowych w latach 2016-2017, w których to prowadzone były pomiary intensywności wymiany CO₂ oraz CH₄ na tle wielolecia 1951-2000. Dlaczego jako okres odniesienia (normatywny) Autor wybrał właśnie to wielolecie? Interesująca jest również informacja według jakiej klasyfikacji dokonano oceny warunków termiczno-opadowych lat, w których prowadzono badania? Jak to się ma do graficznej interpretacji tych czynników zaprezentowanych na ryc. 24, obejmujących lata 2008-2017? W mojej ocenie zaprezentowana charakterystyka, zwłaszcza warunków opadowych, jest zbyt ogólna i nie odnosi się do dostępnej klasyfikacji zgodnie ze stosowanymi i przyjętymi powszechnie standardami. Odstępstwo od tej zasady może być przyczyną tego, że Autor niewłaściwie i niejednoznacznie interpretuje zmierzone sumy opadu np.: str. 37, 2 w. od dołu - lata 2016 i 2017 definiowane są jako wilgotne, następnie 2017 r. jako bardzo mokry, str. 72, 4-5 w. od dołu - lata 2016 i 2017 definiowane są przez Autora jako mokre, na str. str. 94, 9 w. od dołu - 2016 r. sklasyfikowany został jako umiarkowany a 2017 r. jako ekstremalnie mokry. Informacje te z pewnością mają znaczenie przy stosowanych manipulacjach i wpływają na modyfikację choćby temperatury torfu i powietrza na zmanipulowanych stanowiskach. Eksperyment prowadzono w pewnych uwarunkowaniach pogodowych, czy zatem omawiane charakterystyki termiczne torfu i powietrza byłyby możliwe do uzyskania gdyby rok był np. skrajnie suchy, normalny, wilgotny, ciepły, chłodny itp.?
2. W pracy Doktorant zamieścił bardzo dużo, bo aż 105 rycin. Część z nich, dotyczy to zwłaszcza fotografii i schematów zamieszczonych w rozdziale 3.2 i 3.3, ze względu na rozmiar jest mało czytelna (np. ryc. 34, 38, 39) lub wręcz moim zdaniem niepotrzebna (np. ryc. 35, 36, 37, 40, 41). Przygotowując rozprawę do druku proponuję Autorowi dla większej przejrzystości i zrozumienia działania autorskiego systemu pomiarowego zamieścić opisy na rysunkach technicznych. Obydwa rzuty rysunku technicznego powinny znajdować się na tym samym arkuszu. Opis eksperymentu zyskałby na przejrzystości, gdyby Autor zamieścił całościową mapę obrazującą rozplanowanie przestrzenne eksperymentu. Brakuje schematu ideowego układu pomiarowego, co mogłoby w wystarczającym stopniu zastąpić mało czytelne opisy, odwołujące się z kolei do równie mało czytelnych zdjęć, wówczas chociażby ułatwiłoby to zrozumienie np. treści: *„Ze względu na bardzo długi czas reakcji (będącej konsekwencją bardzo niskiego przepływu powietrza przez komorę analizatora) analizator został podłączony poprzez tzw. bypass, co pozwoliło na wyrównanie czasu reakcji obu analizatorów oraz ułatwiło późniejszą synchronizację danych pomiarowych”* (str. 56, 4 wiersze od dołu).
3. Uważam, że należałoby doprecyzować, czego dotyczy pomiar spektralny wykazany na ryc. 45. Ze schematu wynika, że wykonywany był pomiar czujnikiem spektralnym poprzedzający o jeden takt pomiar komorą przezroczystą, natomiast nie znalazłam odniesienia w pracy do tego czujnika oraz wykonywanych za jego pomocą pomiarów.
4. Z czego wynika zróżnicowany czas pomiaru obiema komorami i czy jest on wystarczający?
5. Autor w podrozdziale 4.1.2 wprowadził podział okresu badawczego w każdym z analizowanych lat na poszczególne miesiące oraz dwa główne okresy: wegetacyjny tzn. od kwietnia do października oraz poza sezonem wegetacyjnym: od stycznia do marca i od listopada do grudnia, które traktuje łącznie. Natomiast w dalszej części pracy posługuje się także innymi określeniami, które nie do końca oddają wprowadzony na tym etapie podział, a mianowicie zima, lato (ryc. 82) czy pora letnia i zimowa (str. 97, 4 wiersz od góry). Jak należy je rozumieć?
6. Jak należy rozumieć przytoczoną treść ze strony 57, w. 3-4 od dołu: *„...pomiar komorą nieprzezroczystą trwał niemal trzykrotnie dłużej niż wykonywany komorą przezroczystą”*, co pozostaje w sprzeczności z czasem pokazanym na schemacie blokowym przedstawionym na ryc. 45?
7. Na ile sposób instalacji deszczomierza na niestandardowej wysokości i w bliskim sąsiedztwie elementów konstrukcji, w tym głównie promienników podczerwieni, mógł mieć wpływ na wielkość rejestrowanej sumy opadu?
8. Dlaczego w rozdziale 4.1.2 pominięto charakterystykę temperatury torfu na głębokości 5 i 10 cm? W dalszej części pracy temperatura na głębokości 5 cm wykorzystywana jest przy ocenie zależności strumieni CH₄ oraz R_{eco} od temperatury torfu oraz do modelowania R_{eco}: str. 89, 99, 103.
9. Tytuł podrozdziału 4.4.2 jest nieprecyzyjny – brak analizy zależności strumieni CH₄ od opadu.

10. Zamieszczony opis na str. 89 do tab. 12 z nią nie koresponduje.
11. Część treści zawartych w rozdziale Dyskusja treści jest dosłownym powtórzeniem tych przytaczanych we wcześniejszej części pracy, co w mojej jest zbędne, ponieważ nie wnosi nic nowego. Dlatego na etapie przygotowywania rozprawy do druku proponowałabym wyłączenie części dotyczącej dyskusji wyników z rozdziału czwartego i zawarcie jej w pełnym zakresie w rozdziale piątym - Dyskusja.
12. Mimo dużego wkładu w redakcję pracy daje się zauważyć pewne usterki redakcyjne:
- brak w spisie literatury lub błędne odwołanie do następujących pozycji cytowanych w tekście pracy: Robine i in. 2007 (str. 14, 12 w. od góry), Lopez 2017 (str. 19, źródło ryc. 9), Chojnicki i in. 2018 (str. 22, 2 w. od góry, źródło ryc. 11), Welshofer i in. 20017 (str. 24, 8 w. od góry), van Meeteren i in. 2007 (str. 26, tab. 5), Koskinen i in. 2013 (str. 30, 22 w. od góry), Hoffmann 2018 (str. 31, źródło ryc. 18), Görres i in. 2016 (str. 31, 9 w. od dołu), Aubinet 2012 (str. 33, 18 w. od góry), Baldocchi 2005 (str. 34, 12 w. od dołu), Chojnicki 2010 (str. 34, 5 w. od dołu), Wojterska 2001 (str. 37, źródło ryc. 23), K. Ziemblińska (str. 48 i 49, źródło ryc. 38 i 39), Urban i in. 2012 (str. 61, 6 w. od góry, str. 142, poz. 243), Lay 2009 (str. 77, 7 w. od góry), Hargreaves z zespołem 2001 (str. 91, 8 od góry), Laanbroek 2010 (str. 95, w. 12 od dołu, str. 124, 1 w. od dołu), Strack i in. 2005 (str. 96, 3 w. od góry), Beckmann i in. 2004 (str. 96, 4 w. od góry), Goodrich i in. 2011 (str. 96, 5 w. od góry, 7 w. od góry), Juszczak i in. 2012 (str. 101, 1 w. od dołu);
 - brak odwołania w tekście do tab. 2, 3, 4, 5, ryc. 12, 13, 89;
 - błędne odwołanie w tekście do ryc. 55b (str. 58, 13 w. od dołu), 102 (str. 116, 11 w. od góry), 105 (str. 119, 6 w. od dołu), do tab. 20 (str. 107, 1 w. od góry), do tab. 23 (str. 111, 14 w. od góry),
 - na str. 76 w. 1 od góry powinno być „*Temperatura powietrza na wysokości 50 cm...*”;
 - uważam za bardziej zasadne umieszczenie spisu symboli i pojęć na początku pracy;
 - w pracy należy ujednoczyć jednostki dla strumieni GPP, GP_{max} , NEE czy PPF;D;
- Proszę, aby Doktorant nie ustosunkowywał się do uwag redakcyjnych zamieszczonych w pkt. 12 podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

6. Ocena końcowa

Przedstawione w recenzji uwagi nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Stróżeckiego. Recenzowana rozprawa posiada dużą wartość naukową i użyteczną, została opracowana na podstawie wnikliwych analiz w oparciu o dobrze zaplanowaną metodykę zarówno badań terenowych jak i etapów analiz, z wykorzystaniem autorskiej, nowoczesnej aparatury pomiarowej, co należy szczególnie podkreślić. Wykazuje istotne cechy aplikacyjne dla problematyki mieszczącej się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w zakresie szeroko pojętej dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a uzyskane rezultaty w efekcie niejako „przyspieszenia natury” pozwoliły na rozpoznanie już dziś możliwych mechanizmów funkcjonowania torfowiska w Rzecinie w warunkach prognozowanych zmian klimatu.

Biorąc pod uwagę znaczenie badań, dobrą znajomość Doktoranta w zakresie podjętej tematyki, umiejętność pozyskiwania i analizowania danych, konfrontacji uzyskanych wyników i umiejętność krytycznego do nich podejścia oraz prawidłowego wyciągania wniosków stwierdzam, że recenzowana praca w pełni spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określonym w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595, z 2003 r. z późn. zmian.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu o jej wyróżnienie.

Margareta Zimna-Preióg