



Dr hab. Inż. Radosław Juszcak, prof. nadzw.
Katedra Meteorologii
Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Poznań, 15 maja 2017 r

Recenzja

Pracy doktorskiej pt.: „Ocena zdolności retencyjnej gleb na podstawie ich charakterystyk spektralnych” wykonanej przez mgr Joannę Pastuszka-Woźniak z Instytutu Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie pod kierunkiem promotora dr hab. Piotra Baranowskiego, prof. IA PAN i promotora pomocniczego dra Jaromira Krzyszczaka.

Recenzję wykonano na prośbę prof. dr hab. Cezarego Sławińskiego, dyrektora Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie z dnia 3 kwietnia 2017 roku.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr Joanny Pastuszka-Woźniak dotyczy bardzo ambitnego i trudnego problemu badawczego jakim jest ocena charakterystyk wilgotnościowych wybranych gleb Polski na podstawie zobrazowań hiperspektralnych. Bezpośrednie pomiary charakterystyk wilgotnościowych gleb z wykorzystaniem tradycyjnych metod pozwalają na dokładny pomiar tychże właściwości, ale dla jednej próby, w jednym punkcie i na określonej z reguły głębokości. Wadą tych metod, poza dużą czasochłonnością jest także z całą pewnością ich punktowy charakter, a tym samym brak możliwości ekstrapolacji wyników celem oceny przestrzennej zmienności charakterystyk wilgotnościowych gleby dla większych powierzchni. Z tego też względu wykorzystanie nieinwazyjnych technik optycznych do oszacowania cech fizycznych i chemicznych gleby jest szczególnie pożądane, szczególnie ze względu na dynamicznie rozwijające się obecnie narzędzia teledetekcji lotniczej i satelitarnej, które zapewniają szybką i nieinwazyjną formę monitoringu stanu powierzchni gleby i ekosystemów oraz pozwalają na szacowanie charakterystyk fizycznych, biofizycznych i chemicznych powierzchni globu z coraz większą rozdzielczością przestrzenną i czasową. Jedynym warunkiem koniecznym do właściwej interpretacji sygnału spektralnego w zakresie VNIR i SWIR jest zrozumienie wpływu różnych cech badanych powierzchni na wartości mierzonego sygnału. Z uwagi na powyższe, w kontekście tematyki opisywanej w przedłożonej rozprawie doktorskiej, za niezmiernie celowe uważam podjęcie wielkiego wysiłku jakim była ocena wpływu składu granulometrycznego i gęstości gleb, powierzchni właściwej, zawartości materii organicznej i wilgotności gleb na charakterystyki spektralne wybranych gleb Polski i zależności tych charakterystyk z wybranymi właściwościami gleb.

Szczegółowa analiza pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska liczy 142 strony. Zawiera 55 tabel, 46 rysunków oraz 200 pozycji literaturowych, w zdecydowanej większości obcojęzycznych. Tytuł pracy sformułowany jest prawidłowo i trafnie odzwierciedla treści zawarte w pracy. Praca składa się z wykazu najważniejszych symboli oraz ośmiu rozdziałów obejmujących: wstęp, przegląd literatury, cel pracy i hipotezy badawcze, materiał i metody badań, wyniki, dyskusję, wnioski i bibliografię, spis rysunków i tabel oraz załączniki.

W krótkim *Wstępie* Doktorantka bardzo dobrze uzasadniła potrzebę podjęcia problematyki badawczej. Podkreśliła, że w okresie dynamicznego rozwoju teledetekcji lotniczej i satelitarnej to



właśnie te techniki i narzędzia służą i służyć będą do oceny przestrzennej zmienności niektórych właściwości gleb, a badania podjęte w pracy mogą dostarczyć niezwykle cennego materiału pozwalającego na właściwą interpretację obrazów hiperspektralnych. Autorka podkreśliła również, że tylko nieliczne ośrodki badawcze na świecie próbują określać krzywą retencji wodnej na podstawie charakterystyk spektralnych. W tym kontekście szczególnego podkreślenia wymaga fakt, że choć w skali globalnej podobne badania, jak te opisane w pracy są prowadzone przez inne ośrodki badawcze, to jednak liczba tych ośrodków jest niewielka, a w Polsce dotychczas nie przeprowadzono takich analiz w zakresie opisanym w pracy.

Rozdział *Przegląd literatury* (str. 10-37) składa się z trzech części przedstawiających opis 1) najważniejszych właściwości fizykochemicznych gleby determinujących ich zdolność retencyjną, 2) krzywej retencji wodnej i innych charakterystyk wodnych gleb oraz 3) obrazów hiperspektralnych. Zakres poruszonej w tym rozdziale problematyki jest w pełni zgodny z tematyką pracy. Dostarcza szczegółowych informacji na temat pojęć stosowanych w pracy oraz opis stanu wiedzy w zakresie objętym badaniami. Pierwsze dwie części tego rozdziału dostarczają w dużej mierze podstawowej, głównie książkowej wiedzy z zakresu wpływu rozkładu granulometrycznego gleby, jej gęstości i porowatości, powierzchni właściwej i zawartości materii organicznej w glebie na jej charakterystyki wilgotnościowe. Informacje te są niezbędne w pracy. Pomimo znacznej złożoności opisywanej problematyki, doktorantka umiejętnie dobrała źródła informacji, przedstawiając to co najważniejsze w przejrzysty i zrozumiały sposób. Kolejna część tego rozdziału dotyczy szczegółowego opisu istoty obrazów hiperspektralnych, możliwości ich wykorzystania do opisu cech badanej powierzchni, wymagań sprzętowych i metodycznych związanych z kalibracją czujników radiometrycznych, standaryzacją metod pomiarowych i analizy sygnału uzyskiwanego nie tylko w pomiarach laboratoryjnych, ale także w ramach teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Z całą pewnością, przy dużej złożoności opisywanej problematyki, rozdział ten mógłby mieć nawet kilkadziesiąt stron, jednak ponownie podkreślenia wymaga fakt umiejętnego doboru literatury i poruszenia najistotniejszych tematów, dzięki czemu czytelnik uzyskuje tylko informacje niezbędne, właściwie wprowadzające w tematykę pracy. Doktorantka nie ustrzegła się jednak pewnych nieścisłości terminologicznych – dwukrotnie pisząc o pomiarach radiometrycznych widma promieniowania odbitego używa terminu „światło” (str. 20 i 21, w dalszej części pracy błąd ten jest powielany str. 35, 36, 42, 43, 59,61, 64,70,71,112,114,115), podczas gdy wiemy, że promieniowanie widzialne stanowi tylko część promieniowania elektromagnetycznego odbitego od danej powierzchni. Poza tym, zamiast terminu „promieniowanie przechodzące” proponowałbym jednak użycie terminu „promieniowanie przenikające”, a zamiast „promieniowanie emitowane” (str. 20) - „promieniowanie odbite”. Niezręcznością jest również stwierdzenie, że obrazowania hiperspektralne pozwalają na nieinwazyjną ocenę cech materiałów biologicznych, podczas gdy mogą one służyć również do opisu cech materii nieożywionej. W dalszych częściach rozdziału Doktorantka scharakteryzowała zakres przydatności i stosowalności obrazów hiperspektralnych gleby oraz związek charakterystyk spektralnych gleby z jej właściwościami fizyko-chemicznymi. Za szczególnie wartościowe uważam sumaryczne scharakteryzowanie indeksów spektralnych służących do wyznaczania zawartości wody w glebie, a przede wszystkim szczegółowo opisane w tab. 2.2 zestawienie metod analizy obrazów hiperspektralnych i ich weryfikacji, stosowanych w różnych ośrodkach badawczych w wielu krajach na świecie, celem określenia wilgotności gleb na podstawie ich charakterystyk spektralnych. Ta część rozdziału *Przegląd literatury* jest szczególnie ważna w pracy, moim zdaniem jest ona przygotowana wzorcowo, a płynność tekstu i zakres poruszonej tematyki, świadczy o genialnym opanowaniu przez Doktorantkę problematyki przedmiotu i znajomości aktualnej literatury światowej, co zresztą znajduje potwierdzenie w dalszych częściach pracy.



W kolejnym rozdziale przedstawiono cele i hipotezy badawcze pracy. Założono, że właściwości spektralne gleb w zakresie VNIR i SWIR są skorelowane z ich właściwościami retencyjnymi, a zastosowanie określonych długości fal promieniowania odbitego odpowiadającym pikom absorpcyjnym związanym z zawartością wody i siłą wiązania wody z glebą umożliwi modelowanie wilgotności gleb i ich potencjału wody glebowej. Jako cel wyznaczono sobie opracowanie modeli wilgotności gleby i potencjału wody glebowej na podstawie charakterystyk spektralnych powierzchni gleby i wybranych jej właściwości fizykochemicznych. Dodatkowo, wyznaczono cztery cele szczegółowe, którym podporządkowane są kolejne podrozdziały części wynikowej. Wyznaczony cel jest zgodny z tytułem pracy, a hipotezy postawione prawidłowo.

W rozdziale 4 zatytułowanym *Materiał i Metody badań* przedstawiono wykorzystany w pracy materiał badawczy pochodzący ze 104 profili glebowych wykonanych na obszarze Polski w ramach prac nad tworzeniem Banku Gleb Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie (Bieganowski i in. 2013). Na potrzeby pracy wybrano materiał z około 10% profili glebowych opisanych w Banku Gleb IA PAN, co i tak, zważywszy na ogrom prac związanych z analizami laboratoryjnymi tego materiału i późniejszymi analizami olbrzymiej liczby zobrazowań hiperspektralnych, uważam za wielkie i bardzo ambitne osiągnięcie. Moim zdaniem, w tej części pracy brakuje jednak krótkiego uzasadnienia według jakich kryteriów dobierano materiał glebowy oraz jaka jest przestrzenna (w skali Polski) reprezentatywność analizowanych próbek. Co było kryterium decydującym o liczbie analizowanych profili glebowych dla poszczególnych rodzajów i gatunków gleb i dlaczego n -prób różni się dla każdego gatunku gleby? Choć nie ma to istotnego znaczenia dla pracy, to jednak uważam, że byłoby dobrze pokazać miejsca poboru próbek nanosząc punkty pomiarowe na mapę Polski (tak aby korespondowało to z pracą Bieganowskiego i zespołu z 2013r). Jako niezadawalający uznaję opis metod pomiaru charakterystyk fizykochemicznych gleby. Nie oczekiwałbym w tej części pracy szczegółowego opisu tych metod, skoro są one metodami standardowymi i powszechnie stosowanymi, ale nie jest jasne, czy analizy te były wykonywane przez Doktorantkę, z jej udziałem, czy przez specjalistyczne laboratorium IA, a zatem czy Doktoranta pracowała nad tym materiałem i go analizowała samodzielnie, czy wyłącznie przedstawiła w pracy wyniki tych analiz. Choć nie ma to wielkiego znaczenia to jednak uważam, że z tekstu pracy powinno wynikać jaki jest udział doktoranta w uzyskaniu materiału do badań. W kolejnym podrozdziale opisano stanowisko pomiarowe z dwiema kamerami hiperspektralnymi firmy SPECIM- jedną działającą w zakresie VNIR i drugą działającą w zakresie SWIR. Opis stanowiska pomiarowego jest stosunkowo krótki, ale dostarcza szczegółowych informacji na temat stosowanej metodologii pomiarów, charakterystyk kamer, jak i uzyskiwanych zobrazowań spektralnych. Nie jest to w pracy doprecyzowane, ale zakładam, że Doktorantka skorzystała z infrastruktury pomiarowej istniejącej w Instytucie, skąd inąd bardzo dobrze zaprojektowanej. Brak jakichkolwiek referencji wskazujących na opisywaną infrastrukturę mógłby jednak wskazywać, że system pomiarowy zaprojektowano i wykonano na potrzeby niniejszej pracy. Jeśli jednak nie, to uważam że dobrze byłoby wspomnieć w tekście w jakim celu powstał system pomiarowy i kto jest jego autorem. O skali wykonywanych analiz musi świadczyć fakt, że dla jednego skanowania kamerą VNIR otrzymywano 129 obrazów, a dla kamery SWIR aż 256 obrazów (dla każdej długości fali) o rozdzielczości przestrzennej powyżej 320x800. Jednocześnie każda z próbek była poddawana tej samej procedurze wielokrotnie przy różnych wartościach potencjału wody glebowej. Jeśli jeszcze uwzględnimy fakt, że dla każdego piksela takiego obrazu wygenerowano krzywą odbicia spektralnego przed i po kalibracji hiperspektralnej, to daje to obraz ogromu danych, analiz i pracy, które musiała wykonać Doktorantka. W pracy analizowano średnie wartości charakterystyk spektralnych dla badanych próbek, które poddawano transformacjom polegającym na obliczaniu pochodnej z logarytmu dziesiętnego, celem linearyzacji korelacji między charakterystyką spektralną gleby a jej właściwościami fizykochemicznymi oraz redukcji zakłóceń



związanych ze zmianami oświetlenia podczas kolejnych pomiarów (str.45). Nasuwają się jednak pytania dlaczego intensywność oświetlenia miała się zmieniać skoro warunki w laboratorium były kontrolowane?. Jeśli warunki oświetlenia mogły być zmienne i wpływać na wyniki, czy wykonywano powtórzenia pomiarów tych samych próbek dla tych samych wartości potencjału wody glebowej? W następnym etapie szukano korelacji między charakterystykami spektralnymi, a fizykochemicznymi cechami gleby. Stwierdzono brak istotnych statystycznie zależności z gęstością gleby i jej powierzchnią właściwą. W wypadku korelacji z wilgotnością gleby, zawartością węgla organicznego i składem granulometrycznym uznano, że dla wartości współczynnika korelacji powyżej 0,2 zależności są istotne statystycznie. W ten sposób wyselekcjonowano 142 pojedynczych długości fal skorelowanych z wilgotnością gleby, 67 skorelowanych z zawartością węgla organicznego i 78 skorelowanych ze składem granulometrycznym. Łącznie, spośród 385 zobrazowań w zakresie VNIR (129) i SWIR (256) wyselekcjonowano 191 niepowtarzalnych długości fal, dla których wartości współczynnika odbicia traktowano jako zmienne niezależne podczas dalszej analizy. Celem dalszej redukcji liczby zmiennych zastosowano model regresji wielokrotnej krokowej z wilgotnością gleby jako zmienną zależną i wyselekcjonowanymi długościami fal jako predyktorami modelu. W ten sposób liczbę zmiennych niezależnych ograniczono do 19 długości fal, które najlepiej korelowały z wilgotnością gleby, jej składem granulometrycznym, powierzchnią właściwą i zawartością węgla organicznego. Na podstawie uzyskanych wyników, w celu oszacowania wilgotności objętościowej gleby lub potencjału wody glebowej, zbudowano cztery liniowe modele regresji wielokrotnej z 19-toma wybranymi długościami fal (model1), który rozszerzono o skład granulometryczny, powierzchnię właściwą, gęstość i zawartość materii organicznej (model 2), lub potencjał wody glebowej/wilgotność objętościową (w zależności od zmiennej zależnej) – model 3, oraz model 4 integrujący wszystkie te zmienne niezależne. Taki sposób postępowania, bardzo mocno uzasadniony przeprowadzonymi analizami statystycznymi, uważam za bardzo poprawny i logiczny. Szczególnie pozytywnie oceniam zastosowanie w pracy metod klasyfikacji nadzorowanej (statystycznych, logistycznych, wektorów nośnych i sieci neuronowych), szczegółowo opisanych na str. 52-53. Posługiwanie się tak skomplikowanymi narzędziami statystycznymi z całą pewnością wymagało od Doktorantki zdobycia bardzo szerokiej wiedzy teoretycznej na temat funkcjonowania tych modeli i umiejętności właściwego wnioskowania na podstawie uzyskiwanych wyników. Zważywszy na skalę trudności było to zajęcie wymagające dużego zaangażowania, ale też i przygotowania merytorycznego. Podsumowując opis tego rozdziału, dodać muszę że doktorantka nie ustrzegła się drobnej pomyłki, która jednak jest usprawiedliwiona ze względu na podobny wygląd krzywych na wykresie. Na rys. 4.6 zamiast współczynników odbicia dla różnych wartości pF gleby powinny być pokazane współczynniki odbicia dla różnych gatunków gleb, ale przy stałym pF4.2.

Najbardziej obszerny rozdział piąty *Wyniki* podzielony jest na sześć podrozdziałów. W pierwszym scharakteryzowano właściwości fizykochemiczne analizowanych gleb mineralnych Polski. Podano, wartości minimalne, maksymalne i średnie oraz SD dla wilgotności gleby, jej gęstości, zawartości węgla organicznego, powierzchni właściwej i składu granulometrycznego gleby z uwzględnieniem rodzajów (3) i gatunków (9) analizowanych gleb Polski. W następnym podrozdziale przedstawiono i omówiono widma promieniowania odbitego w zakresie VNIR oraz SWIR dla 9-ciu gatunków gleb mineralnych i dla dwóch wartości potencjału wody glebowej: 0 i 4.2, potwierdzając, że niezależnie od uwilgotnienia gleb wszystkie gatunki gleb mają dwa bardzo silne pasma absorpcyjne z pikami absorpcyjnymi dla fal 1452 i 1940 nm. Na podstawie zależności pomiędzy wilgotnością gleby dla różnych wartości pF, a współczynnikami odbicia dla obu tych fal wykazano, że niezależnie od rodzaju badanej gleby oraz analizowanego pasma absorpcyjnego wraz ze wzrostem potencjału wody glebowej rośnie też współczynnik odbicia promieniowania. Co więcej wykazano, że zależność tą bardzo dobrze opisuje prosty model wykładniczy, który objaśniał od 51% do 79% zmienności wilgotności gleby



za pomocą wartości współczynników odbicia dla fali 1452nm i od 52% do 75% dla fali o długości 1940nm. Uśredniona wilgotność gleby była ujemnie skorelowana z odpowiednią wartością współczynnika odbicia dla obu fal (1452nm i 1940nm), a model eksponencjalny dopasowany do tego zbioru danych wyjaśniał od 74% do 98% zmienności wilgotności badanych gleb. Wyniki te wskazują na wielki potencjał możliwości wykorzystania obu długości fal odpowiadających pasmom absorpcyjnym wody do szacowania wilgotności gleb mineralnych. W kolejnej części rozdziału przedstawiono krzywe retencji wodnej analizowanych gleb, których przebieg w procesie osuszania, zgodnie ze stanem wiedzy, jest indywidualny dla każdej z gleb i wykazuje ujemną korelację wilgotności i potencjału wody glebowej. Dla analizowanych 8 wartości potencjału wody glebowej przeanalizowano zmienność współczynników odbicia w zakresie VNIR i SWIR dla poszczególnych gatunków gleb. Potwierdzono, że niezależnie od gatunku gleby, niższym wartościom wilgotności odpowiadają wyższe wartości współczynników odbicia, a co więcej, że im mniejsza wilgotność gleby tym bardziej spłycają się głębokość pików absorpcyjnych. Po szczegółowej analizie widm promieniowania odbitego dla poszczególnych gleb wyodrębniono typowe dla gatunków gleb bardzo słabe piki absorpcyjne związane z wodą występującą w glebie, spośród których piki dla długości fali około 750nm i 840 nm wskazano dla 6 z 8 analizowanych gleb.

W kolejnych częściach rozdziału Doktorantka przedstawiła szczegółowe wyniki modelowania wilgotności (rozdz. 5.6.2) i potencjału wody (rozdz. 5.6.3) gleb Polski wykonanych za pomocą modelu regresji wielokrotnej krokowej i wybranych metod klasyfikacji nadzorowanej. Analizy przeprowadzono dla czterech zbiorów danych: dla wszystkich gleb razem i osobno dla gleb piaszczystych, gliniastych i ilastych. W sposób losowy wyodrębniono zbiór danych uczących obejmujący 70% danych i zbiór danych testujących (30%), na podstawie których dokonano walidacji modelu. W każdym wypadku, wzrost stopnia złożoności modelu i wprowadzenie do niego kolejnych zmiennych niezależnych poza wyodrębnionymi 19-toma długościami fal, zwiększał poprawność predykcyjną modeli, które tłumaczyły od 73% do 85% zmienności wilgotności gleb (dla wszystkich gleb razem) i od 65% do 89% zmienności wilgotności, gdy każdy rodzaj gleb traktowany jest z osobna. Z przeprowadzonych analiz wynika, że na zmianę wilgotności gleb największy udział mają fale o długościach 1534, 1546 i 1584 nm, a fala o długości 1546 nm wykazywała najwyższą korelację cząstkową z wilgotnością gleby. Wprowadzenie do modelu dodatkowych zmiennych niezależnych – analizowanych cech fizycznych i chemicznych gleb nie zmieniło istotnie wnioskowania. Ale uwzględnienie w modelu regresji wielokrotnej potencjału wody glebowej, skutkowało tym, że to właśnie ten parametr wyjaśniał najwięcej, bo aż 42% wariacji wilgotności gleby, a z 19 długości fal tylko 8 było istotnych statystycznie. Po uwzględnieniu w modelu wszystkich danych spektralnych, potencjału wody glebowej i cech fizyko-chemicznych gleby liczba zmiennych niezależnych w modelu zmalała do 10 (w tym 6 długości fal). Wykazano, że potencjał wody glebowej wyjaśnia aż 71% wariacji wilgotności próbek gleby i tylko 35% zmienności po uwzględnieniu wpływu innych zmiennych modelu. Najbardziej istotne zmienne niezależne – długości fal 1402, 1890 nm, gęstość gleby i ilość zawartego w niej piasku wyjaśniały od 8 do 12% zmienności wilgotności próbek gleby. Liczba istotnych statystycznie zmiennych niezależnych wchodzących w skład modelu, jak i ich udział w wyznaczaniu wilgotności gleb i współczynniki korelacji cząstkowej (przedstawione w tabelach 5.19 do 5.30), są jednak różne dla różnych rodzajów analizowanych gleb i trudno doszukiwać się w tych wynikach prawidłowości, poza tym, że liczba zmiennych wchodzących w skład modelu maleje po uwzględnieniu w modelu zmiennych opisujących charakterystyki fizyczne i chemiczne gleby, a w modelach złożonych uwzględniających wszystkie zmienne, potencjał wody glebowej jest zmienną, która wyjaśnia w największym stopniu zmienność wilgotności próbek gleby. Co więcej, we wszystkich modelach regresji wielokrotnej występują jako zmienne niezależne współczynniki odbicia dla fal 1402 nm i 1890 nm związanych z absorpcją wody i



1847 nm, która jest związana ze składem granulometrycznym. Podkreślenia wymaga fakt, że w pracy wykazano, że model regresji wielokrotnej oparty jedynie na 19 umiejętnie wyselekcjonowanych długościach fal pozwala na przewidywanie wartości wilgotności gleb mineralnych z zadawalająco dobrą dokładnością, szczególnie dla gleb o pF od 0 do 3,2, choć wartości oszacowane wilgotności mogą być zawyżone dla gleb o pF powyżej 3,2 (pytanie dlaczego?). Wprowadzenie do modelu innych zmiennych opisujących cechy fizyczne i chemiczne gleby istotnie poprawia wyniki modelowania i zwiększa zgodność pomiędzy wartościami pomierzonymi a wymodelowanymi ($R=0.92$).

Podobne wyniki, choć nie w każdym przypadku, uzyskano stosując metody klasyfikacji nadzorowanej do szacowania wilgotności gleb. W modelach, w których wykorzystano wyłącznie dane spektralne współczynnik korelacji wahał się od 0,79 dla metody Procesów Gaussowskich (GP) do 0,86 w metodzie sieci neuronowych (MLP). Po dodaniu wybranych właściwości fizycznych gleby współczynniki te nieznacznie zwiększyły się odpowiednio z 0,79 do 0,81 dla metody GP i z 0,86 do 0,92 dla metody MLP, jeszcze wyższe wartości uzyskano dodając do modelu potencjał wody jako zmienną niezależną, a najwyższe po uwzględnieniu wszystkich analizowanych zmiennych. W tym ostatnim wypadku współczynniki korelacji były bardzo wysokie i osiągały wartości od 0,93 dla metod GP i Partial Least Squares Classifier (PLS), 0,94 dla metody Radial Basis Function Regressor (RBF) i aż 0,97 dla metody MLP. Znamienne jednak, że wartości tego współczynnika w zdecydowanej większości modeli były niższe dla pliku walidacyjnego, niż dla pliku testującego i np. dla ostatniej grupy modeli wykorzystujących wszystkie dane współczynnik korelacji wahał się od 0,82 dla MLP do 0,94 dla GP. Podkreślenia wymaga fakt, że uzyskano wysoką zgodność pomiędzy rzeczywistą i wymodelowaną zawartością wody w glebie wyznaczoną dla metody GP na podstawie danych spektralnych ($R=0,82$) oraz po zastosowaniu wszystkich zmiennych niezależnych ($R=0,94$). W pierwszym jednak przypadku model niedoszacowywał wartości wilgotności gleb dla pF powyżej 3,2 i zaniżał dla pF=0 (dlaczego?). Choć zastosowano tu te same proporcje 70% do 30% danych dla pliku uczącego i testującego, to jednak niejasne jest czy plik testujący obejmował te same próby które wykorzystano testując modele regresji liniowej wielokrotnej?

W kolejnym podrozdziale przedstawiono wyniki modelowania potencjału wody glebowej. Analizy wykonano analogicznie jak dla wilgotności objętościowej gleby, z tym że w tym wypadku to właśnie wilgotność gleby była jednym z predyktorów modeli (w dwóch z czterech). Wykorzystanie dziewiętnastu długości fal promieniowania odbitego wyjaśniało od 74% (dla wszystkich gleb razem) do 78% (gleby pylaste) zmienności potencjału wody w glebie. Podobnie jak w poprzednich analizach, po wprowadzeniu do modelu innych zmiennych niezależnych – właściwości gleby, wilgotności i wszystkich predyktorów razem, wzrastała wartość współczynnika korelacji danego modelu. Wilgotność gleby poprawiała zdolność do szacowania przez model potencjału wody glebowej o około 7% przy istotnym zmniejszeniu liczby zmiennych w modelu. Model regresyjny wykorzystujący wszystkie zmienne pozwalał na wyjaśnienie od 86% (dla wszystkich gleb razem) do 89% (dla gleb pylastych) zmienności potencjału w glebie. Za najcenniejsze osiągnięcie Doktorantki uznaję wykazanie faktu, że stosunkowo proste modele regresji wielokrotnej wykorzystującej jedynie wyselekcjonowane dane spektralne pozwalają na oszacowywanie potencjału wody w glebie ze stosunkowo dużą dokładnością, a nawet bardzo dużą szczególnie dla gleb o pF około 2. Doktorantka uzyskała bardzo dobre odwzorowanie krzywej retencji gleb, szczególnie dla glin piaszczystych, choć niezależnie od gatunku gleby, model oparty na danych spektralnych niedoszacowywał wartości potencjału dla gleb o pF od 2,7 do 4,2 i przeszacowywał wartości potencjału wody dla gleb o wyższej zawartości wody (od pełnego nasycenia po połowę pojemność wodną).

W ostatnim podrozdziale części wynikowej omówiono wyniki szacowania potencjału wody glebowej z wykorzystaniem wybranych metod klasyfikacji nadzorowanej. Analizy wykonano stosując metody



Naive Bayes (NB), Sequential minimal optimisation (SMO), Logistic regression (LOG), Multilayer perceptron (MLP) i Random Forest (RF), nie jest jasne jednak czym się kierowano dokonując właśnie takiego doboru metod. Dlaczego metody te były inne niż te zastosowane do szacowania wilgotności objętościowej gleby? Dlaczego w tabelach od 5.52 do 5.55 nie podano współczynnika korelacji i determinacji, a podano procent prób poprawnie sklasyfikowanych? Moim zdaniem, celem właściwej interpretacji wyników modelowania, zarówno w tabelach 5.52-5.55, jak i 5.31-5.34 powinny być zestawione te same parametry statystyczne (choć rozumiem, że w części dotyczącej potencjału wody, wartości te byłyby podane dla każdej wartości pF, co sprawiłoby że tabele byłyby mniej przejrzyste). Podobnie jak poprzednio, zbiór danych podzielono na plik uczący (70%) i testujący (30%), przy czym oba zbiory były identyczne z tymi które wykorzystano szacując wilgotność gleby. Niezależnie od metody, w większości analizowanych przypadków procent poprawnie sklasyfikowanych próbek był niższy dla pliku testującego, podobnie jak miało to miejsce przy szacowaniu wilgotności gleby. Czy może to być spowodowane jednak cały czas zbyt dużą liczbą uwzględnianych w modelu zmiennych i być może przetrenowaniem modeli? Wykazano, że metoda LOG jest najlepszą metodą klasyfikacji gleb, bez względu na to, które dane zastosowano jako predykatory w modelu. Po uwzględnieniu w modelu danych spektralnych, wilgotności gleb i innych analizowanych cech fizykochemicznych gleb metoda ta klasyfikowała poprawnie aż 65% wszystkich gleb, co wykazano stosując macierz kontyngencji. Ograniczenie liczby predyktorów wyłącznie do danych spektralnych spowodowało spadek liczby prawidłowo sklasyfikowanych próbek do 54%. Najwięcej przypadków błędnie sklasyfikowanych wartości potencjału wody glebowej wystąpiło dla sąsiadujących wartości klas potencjału. Ponieważ dostrzegam pewną symetrię w analizach wykonanych z wykorzystaniem metod klasyfikacji nadzorowanej (przy szacowaniu wilgotności gleby i potencjału wody w glebie), zastanawiam się dlaczego nie zdecydowano się na podobny sposób prezentacji wyników analizy w obu przypadkach.

Zastanawiam się również, dlaczego mając tak bogaty zbiór danych hiperspektralnych nie pokuszono się w pracy o analizę możliwości szacowania charakterystyk wilgotnościowych gleby na podstawie powszechnie stosowanych indeksów spektralnych (zestawionych przez Doktorantkę w tabeli 2.1), lub nie próbowano poszukiwać własnych indeksów, co z całą pewnością zwiększyłyby jeszcze bardziej rangę przeprowadzonych analiz. Pomimo tej drobnej uwagi, chciałbym podkreślić, że bardzo wysoko oceniam analizy statystyczne wykonane w pracy, jak i sposób prezentacji wyników i w niczym nie umniejsza to osiągnięć Doktorantki, ani nie wpływa na ogólną bardzo pozytywną ocenę części wynikowej pracy.

Dalsza część pracy poświęcona jest Dyskusji wyników i wnioskom. Autorka używając właściwej argumentacji odnosi wyniki swoich badań do osiągnięć innych zespołów znanych z literatury światowej. Umiejętnie przedstawia najważniejsze osiągnięcia pracy i podkreśla aspekty nowości i innowacyjności, zarówno w odniesieniu do zastosowanej metody, jak i uzyskanych wyników. Rozdział ten stanowi bardzo mocną część pracy. Choć wydaje się stosunkowo krótki (zaledwie 6 stron), to jednak jest napisany bardzo poprawnie, wręcz nawet wzorcowo, syntetycznie odnosząc się do najważniejszych wyników i osiągnięć pracy na tle osiągnięć znanych z literatury. Styl i forma w jakim Doktorantka opracowała ten rozdział jednoznacznie podkreśla doskonałą znajomość problematyki tematu, pewność w formułowaniu stwierdzeń i jednocześnie obrony uzyskanych wyników.

Wnioski sformułowano w formie opisowej. Każdy z dziewięciu akapitów odpowiada jednemu wnioskowi. Wnioski są poprawnie sformułowane i bardzo trafnie podsumowują najważniejsze osiągnięcia pracy.



Podsumowanie

Do najważniejszych osiągnięć Autorki przedstawionych w pracy zaliczyłbym:

1. Nowatorskie i pionierskie powiązanie charakterystyk hiperspektralnych gleby z potencjałem wody glebowej.
2. Wykazanie, że na podstawie umiejętnie wyselekcjonowanych 19 długości fal promieniowania odbitego w zakresie VNIR i SWIR, które najlepiej korelują z wilgotnością gleby, jej składem granulometrycznym i materią organiczną w glebie, możliwe jest szacowanie wilgotności objętościowej gleby i jej potencjału wodnego z bardzo dużą dokładnością, często lepszą od bardziej złożonych modeli wykorzystujących dane o cechach fizykochemicznych gleby, których pozyskanie jest kosztowne i czasochłonne. Modele oparte na wieloczynnikowej analizie regresji pozwoliły na wyjaśnienie 73% procent zmienności wilgotności objętościowej gleb i 74% zmienności potencjału wody glebowej.
3. Fakt, że za pomocą zaledwie 19 długości fal promieniowania odbitego można z zadowalającą dużą dokładnością szacować charakterystyki wilgotnościowe gleby może mieć wielkie znaczenie praktyczne – spektralne urządzenia skanujące stosowane do wyznaczania tych cech gleby mogą być bowiem urządzeniami multispektralnymi, a przez to mogą być znacznie tańsze w porównaniu do bardzo drogich kamer hiperspektralnych.
4. Przeprowadzenie analiz na bardzo szerokiej grupie gleb mineralnych występujących w Polsce obejmującej 9 różnych gatunków i o zróżnicowanej wilgotności odpowiadającej aż 8 różnym wartościom potencjału wody glebowej w zakresie od pF0 do pF4.2 – według mojego stanu wiedzy badania w takim zakresie nie były dotychczas nigdzie prowadzone w tak szerokim zakresie. W Polsce badania te mają charakter pionierski.
5. Wykazanie, że poprzez właściwy i merytorycznie uzasadniony dobór zmiennych modelu, niezależnych od rodzaju gleby, możliwe jest prognozowanie za pomocą jednego „uniwersalnego” modelu krzywej retencji wodnej różnych rodzajów gleb (piaszczystych, gliniastych oraz ilastych).
6. Wykazanie, że transformacja pierwszej pochodnej logarytmu dziesiętnego jest najbardziej odpowiednią metodą wstępnego przetwarzania danych hiperspektralnych i pozwala wyraźnie zróżnicować spektra różnych gatunków gleb oraz wyróżnić piki absorpcyjne dla wody. Zaproponowana metoda optymalizacji liczby wykorzystywanych danych spektralnych jest innowacyjna i ma wielki potencjał praktyczny.

Po szczegółowym zapoznaniu się z rozprawą doktorską stwierdzam, że nie znajduję słabych stron pracy, może poza brakiem jednoznacznego zdefiniowania w części *Materiał i Metody* w jakim zakresie analizy gleby, których wyniki są jednak jednym z kluczowych elementów pracy, były wykonane przez Doktorantkę, z jej udziałem, a w jakim przy pomocy zewnętrznych laboratoriów. W pracy znalazłem też wiele literówek, niezręczności związanych z używaniem terminu „światło”, a nade wszystko zbyt małą liczbę przecinków.... Nie zmienia to jednak ogólnego wrażenia, że mamy do czynienia ze świetnie przygotowaną rozprawą naukową, w której zaprezentowano wyjątkowo cenne dane dotyczące spektralnych analiz charakterystyk wilgotnościowych gleby, które powinny uzupełnić zbiór danych opisujących gleby zgromadzone w Banku Gleb Instytutu Agrofizyki w Lublinie. Wyniki tego eksperymentu powinny zostać jak najszybciej opublikowane w najlepszych czasopismach indeksowanych ze względu na wiele aspektów innowacyjności i bardzo szeroki zakres analiz. Czytając pracę ma się przekonanie, że eksperyment którego wyniki są podstawą pracy, został świetnie zaplanowany i konsekwentnie wykonany i z całą pewnością jest to zasługa samej Doktorantki, ale przede wszystkim Promotorów tworzących warsztat badawczy Doktorantki. Przejrzystość metod i



bardzo wysoki stopień analiz statystycznych niezbędnych do właściwej interpretacji uzyskiwanych wyników są bardzo mocną stroną pracy. Niezmiernie wysoko oceniam zastosowanie bardzo zaawansowanych metod klasyfikacji nadzorowanej, które choć nie przynoszą istotnej poprawy wyników modelowania względem znacznie prostszej metody regresji wielokrotnej, to jednak dostarczają cennych informacji o potencjale wykorzystania tych metod w predykcji właściwości wilgotnościowych gleb. Pomimo kilku krytycznych uwag zawartych w niniejszej recenzji, podkreślenia wymaga fakt, że podjęte przez Autorkę problemy badawcze mają charakter innowacyjny i pionierski w skali Polski (niektórych analiz w ogóle nie wykonywano jeszcze na świecie). Doktorantka z całą pewnością podjęła się bardzo trudnego zadania stawiając sobie ambitne cele naukowe i użyteczne. Wszystkie cele pracy zostały osiągnięte, a hipotezy badawcze zweryfikowane. W mojej ocenie wyniki badań wnoszą istotnie dużo w rozwój dyscypliny naukowej. Przy bardzo szerokim zakresie stosowalności technik obrazowania hiperspektralnego do opisu różnych cech fizycznych i chemicznych gleby, cały czas brak jest dużej zgodności pomiędzy pomiarami laboratoryjnymi i polowymi cech gleb, a wynikami obrazowania spektralnego. Poważnym problemem są też często różne standardy i protokoły pomiarowe stosowane przez poszczególne zespoły badawcze. Stąd też szczególnie ważne jest aby kontynuować badania nad zależnościami mierzonych charakterystyk spektralnych, a właściwościami fizykochemicznymi reprezentatywnych zbiorów gleb, celem tworzenia globalnej bazy danych cech spektralnych różnych gleb o znanych charakterystykach fizykochemicznych.

Uwagi edytorskie i propozycje korekty drobnych błędów, które pojawiły się w tekście pracy, przedstawiono w osobnym dokumencie załączonym do niniejszej recenzji.

Praca stanowi oryginalne rozwiązania problemu badawczego, a przedstawione w pracy informacje i sposób ich prezentacji wskazuje na bardzo szeroką wiedzę teoretyczną kandydatki na doktora oraz jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Z uwagi na powyższe stwierdzam, że Pani mgr Joanna Pastuszka-Woźniak spełnia wymogi Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. „O stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 z 2003 r, poz. 595) z późniejszymi zmianami (Dz. U. Nr 164, poz. 1365 z 27 lipca 2005 oraz Dz. U. Nr 253, poz. 2125 z 27 lipca 2005 r, Dz. U. 2011 nr 84 poz. 455 z 21 kwietnia 2011, Dz.U. 2017 nr 0, poz. 859) i przedkładam wniosek Wysokiej Radzie Naukowej Instytutu Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN w Lublinie o dopuszczenie Jej do publicznej obrony pracy.**

Z uwagi na poziom prezentowanych w pracy badań, a także rangę i nowatorskość przedstawionych wyników zwracam się również z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy doktorskiej stosowną nagrodą.

Dr hab. inż. Radosław Juszcak, prof. nadzw.