Poznań, dnia 28 maja 2015 r.

Prof. dr hab. inż. Marek Marciniak
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Marii Grodzkiej-Łukaszewskiej pt.:

„Modelowanie numeryczne interakcji wód powierzchniowych i podziemnych"

1. Wstęp

Magister Maria Grodzka-Łukaszewska podejmuje problematykę modelowania matematycznego dynamiki wód podziemnych, w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. Autorka porównuje i ocenia przydatność dwóch metod modelowania filtracji określanych w literaturze jako *Head Oriented Approach* (HOA) oraz *Velocity Oriented Approach* (VOA). Podjęty problem jest z pogranicza hydrogeologii, matematyki i metod numerycznych, dlatego jest trudny i rzadko obecnie podejmowany. Utrwaliło się bowiem przekonanie, że narzędzia informatyczne w zakresie modelowania matematycznego filtracji wód podziemnych zostały już wystarczająco dopracowane przez światowe koncerny oferujące profesjonalne oprogramowanie w tym zakresie. Tymczasem Autorka prezentuje w swojej dysertacji doktorskiej odmienne stanowisko.

2. Charakterystyka formalna pracy

Rozprawa doktorska mgr Marii Grodzkiej-Łukaszewskiej liczy 106 stron tekstu, zawiera 38 rycin oraz 13 tabel. Spis literatury liczy 52 pozycje, w tym 36 pozycji anglojęzycznych. Nie wszystkie pozycje literaturowe zostały zacytowane. W pracy brakuje spisu rysunków i spisu tabel. Pod względem językowym praca jest napisana zwięźle, jasno i, co warte podkreślenia, prawie bezbłędnie. Rysunki i tabele zostały zredagowane czytelnie, choć można by lepiej dobrać skale na niektórych rysunkach (7, 13, 14, 16, 23, 24).

3. Merytoryczna ocena pracy

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera 13 rozdziałów, przy czym układ pracy jest logiczny i przejrzysty.

We **wstępie** Doktorantka stawia tezę, że numeryczna realizacja modelu teoretycznego VOA spełnia wymagania dużej dokładności oszacowania wektorowego pola prędkości filtracji. Jako cel naukowy Doktorantka stawia porównanie wyników modelowania dwóch koncepcyjne różnych modeli fizyczno-matematycznych przepływu wód podziemnych – modeli HOA oraz VOA, na przykładzie wybranej, rzeczywistej sytuacji hydrogeologicznej.

W rozdziale drugim omówione zostały przyrodnicze uwarunkowania interakcji wód powierzchniowych i podziemnych. Autorka w syntetycznej formie dokonuje przeglądu literatury oraz omawia procesy fizyczne zachodzące podczas drenażu wód podziemnych przez rzeki oraz podczas infiltracji wód powierzchniowych do wód podziemnych. Sygnalizuje też różne skale omawianego problemu i deklaruje, że dalsze rozważania będą dotyczyły skali lokalnej. Wskazuje też na aspekty prawne i gospodarcze omawianego problemu.

Rozdział trzeci poświęcono omówieniu metody HOA, która we współczesnej hydrogeologii stanowi standard w zakresie modelowania filtracji wód podziemnych. Podano pełny opis matematyczny dla przepływu trójwymiarowego wraz z warunkami granicznymi. Następnie uproszczono schemat filtracji do przepływu dwuwymiarowego, wystarczającego dla analizowania współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych w skali lokalnej. Omówiono też numeryczną realizację modelu HOA w wersji oferowanej przez oprogramowanie Visual MODFLOW oferowanym przez Waterloo Hydrogeologic (obecnie Schlumberger Water Services). Autorka zwraca uwagę na znaczenie doboru kroku siatki dyskretyzacyjnej w modelowaniu metodą HOA oraz problemy ze zbieżnością algorytmu podczas stosowania modułu *Rewetting*, co w dalszych badaniach okaże się istotne dla oceny modeli HOA oraz VOA.

Zasadniczą teoretyczną część pracy stanowi **rozdział 4**. Autorka przedstawia model VOA jako podstawę modelowania interakcji wód powierzchniowych i podziemnych. Podstawy teoretycznej tej metody opracowali Nawalny & Zijl i opublikowali w roku 1993 w monografii zatytułowanej „Natural Groundwater Flow". Stosując odpowiednie podstawienia Doktorantka przekształca równanie trójwymiarowego przepływu wód podziemnych (HOA) w układ trzech równań, w których zmienną zależną są składowe przestrzenne wektora prędkości (VOA). Dzięki takiemu podstawieniu może wykorzystać algorytm numerycznego rozwiązania modelu HOA do rozwiązywania składowych wektora prędkości w metodzie VOA. Doktorantka formułuje też odpowiednie warunki graniczne dla modeli VOA.

Rozdział piąty poświęcony został porównaniu modeli HOA oraz VOA. Porównania dokonano na uproszczonym przykładzie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych dla przypadku rzeki infiltrującej. Wybrano półprzekrój rzeki i fragmentu warstwy wodonośnej, na którym modelowano dwuwymiarowy przepływ z rzeki do warstwy wodonośnej. Sformułowano dość skomplikowane warunki graniczne, które zdaniem recenzenta zostały niewystarczająco wyjaśnione. Dyskusji wymaga też decyzja o przyjęciu modelu odniesienia, na podstawie którego oceniano efektywność modeli HOA oraz VOA. Jako rozwiązanie odniesienia przyjęto „dość złożony trójwymiarowy model analityczny". Jak wykazał Nawalany (1993) „model VOA przybliża pole przepływu 3D niemal tak dokładnie jak model analityczny 3D ... co upoważnia stosowanie modelu VOA jako modelu odniesienia". Z metodycznego punktu widzenia modelem odniesienia powinno być rozwiązanie analityczne, do którego porównywane byłyby modele HOA oraz VOA.

Ciekawym rozwiązaniem postawionego zadania okazała się implementacja oprogramowania rozwiązującego równania typu HOA do modeli VOA, co Doktorantka przedstawiła w **rozdziale szóstym**. Autorka bardzo skrótowo przedstawia stosowane procedury obliczeniowe ograniczając się właściwie tylko do podania warunków brzegowych. Tymczasem wykonanie niezbędnych obliczeń za pomocą oprogramowania Visual MODFLOW było zapewne bardzo pracochłonne i wymagało przygotowania własnego algorytmu postępowania. Tego algorytmu Autorka nie pokazuje w pracy, zachowując go zapewne do opracowania (wspólnie ze Schlumbergerem) nowych procedur w interfejsie użytkownika VisualMODFLOW. Porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych za pomocą obu modeli HOA oraz VOA zostało przedstawione w sposób niezbyt przejrzysty, że względu na brak jednolitych skal na rys.13 i 14, a zwłaszcza na rys.16.

Rozdział 7 zawiera opis eksperymentu terenowego przeprowadzonego przez zespół naukowców holenderskich Rozemeijera i Van der Velde'a w zlewni rzeki Hupsel. Doktorantka w ramach współpracy międzynarodowej uzyskała zgodę na wykorzystanie wyników tamtych badań do testowania własnych algorytmów obliczeniowych modeli HOA oraz VOA. Badania terenowe zawierały komplet danych umożliwiających zweryfikowanie bilansu dopływu wody z warstwy wodonośnej do kanału. W tym rozdziale analizowano zatem przypadek rzeki drenującej. Obserwacje terenowe prowadzone były w okresie od 1.01.2007 do 15.12 2008, przy czym nie przez cały ten okres obserwowano wszystkie parametry potrzebne do zbilansowania dopływu wody z warstwy wodonośnej do kanału. Do analizy Doktorantka wybrała krótki fragment obserwacji pomiędzy 1.11.2007, a 12.15.2007, podczas którego zachowane były wszystkie założenia dotyczące schematu warunków hydrologicznych

i hydrogeologicznych. Umożliwiło to pominięcie ewapotranspiracji oraz udziału drenów w kształtowaniu przepływu wód podziemnych.

Na podstawie dostępnych danych terenowych zarejestrowanych w zlewni rzeki Hupsel sformułowano model konceptualny interakcji wód powierzchniowych i podziemnych, który przedstawiono w **rozdziale 8**.

Rozdział 9 poświęcono metodyce kalibracji modeli matematycznych. Omówiono zasady oraz parametry oceny kalibracji metodą prób i błędów oraz kalibracji automatycznej.

Brakującą daną do modelowania okazał się rozkład przestrzenny współczynnika filtracji, któremu poświęcono **rozdział 10**. Braki te uzupełniono poprzez zastosowanie kombinowanej procedury kalibracyjnej łączącej kalibrację metodą prób i błędów z kalibracją automatyczną. Recenzent (ze zrozumiałych jak sądzę powodów) opowiadałby się raczej za wykonaniem polowych badań współczynnika filtracji. Dotyczy to zarówno współczynnika filtracji warstwy wodonośnej jak i współczynnika filtracji osadów dennych w kanale. Ze względów organizacyjnych takie badania prawdopodobnie nie były możliwe i dlatego Autorka zdecydowała się na dyskusyjną kalibrację. Wyniki tej kalibracji wydają się niedoszacowane w przypadku współczynnika filtracji osadów dennych i przeszacowane w przypadku współczynnika filtracji warstwy wodonośnej. Nie dyskwalifikuje to jednak przydatności analizowanego przykładu do oceny efektywności modeli HOA oraz VOA. Oceniając dopasowanie potencjału hydraulicznego modeli HOA należy uznać, że błąd RMS na poziomie 14,1 cm (dla 2381 piezometrów) oraz 7,1 cm (dla 31 piezometrów) jest niewielki, a dopasowanie modelu do obiektu badań co najmniej dobre. Taką ocenę uzasadnia także porównania zaobserwowanych i obliczonych stanów wód podziemnych pokazane na rys. 34.

W **rozdziale 11** zamieszczono wyniki modelowania dopływu wody z warstwy wodonośnej do kanału. Dla modelu HOA wykonano jedno obliczenie dopływu nieustalonego z dobowym krokiem czasowym i z warunkami granicznymi zadanymi na podstawie obserwacji terenowych (zwłaszcza opadu). Obliczona wielkość dopływu wody do kanału okazała się jednak zawyżona o 63% w stosunku do pomiarów dopływu wykonanych w kanale. Następnie wykonano 138 modeli stacjonarnych (46 dni * e_x, e_y oraz q_z) i na podstawie obliczonych e_x, e_y oraz q_z obliczono dopływ wody do kanału. Tym razem wartość dopływu była przeszacowana tylko o 19%. Uzyskano zatem wynik znacznie bardziej zbliżony do obserwacji terenowych, za cenę pracochłonnych obliczeń. Obliczenia te można zapewne zalgorytmizować i oprogramować w formie przyjaznego interfejsu użytkownika, czym może być zainteresowana korporacja Schlumberger, dystrybuująca oprogramowanie VisualMODFLOW.

W **rozdziale 12** porównanie wyników modelowania metodą HOA oraz VOA ograniczono do zestawienia sumarycznych objętości wody w jaką warstwa wodonośna zasiliła kanał w okresie, dla którego przeprowadzono obliczenia. Warto by zapytać jak wygląda porównanie pola wektorowego prędkości filtracji obliczone metodą VOA, z wektorowym polem prędkości obliczanym metodą HOA przez jedną z procedur programu VisualMODFLOW. Należy jednak wyrazić obawę, że na obecnym etapie oprogramowania metody VOA będzie to chyba niemożliwe.

Ostatni, **13 rozdział** dysertacji doktorskiej zawiera wnioski i podsumowanie. Autorka stwierdza, że postawiona teza została dowiedziona, a porównanie wyników modelowania wykazało większą zgodność modelu VOA z obserwacjami terenowymi. Autorka wskazuje też inne zagadnienia hydrogeologiczne, w rozwiązaniu których modelowanie metodą VOA mogłoby znaleźć zastosowania.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr Marii Grodzkiej-Łukaszewskiej podejmuje trudne zagadnienia z pogranicza matematyki i metod numerycznych w zastosowaniach do hydrogeologii. Doktorantka wykazała się nieprzeciętną znajomością aparatu matematycznego oraz wyjątkowymi umiejętnościami operowania algorytmami numerycznymi. Ponadto wykazała się znajomością i dogłębnym zrozumieniem procesów hydrogeologicznych zachodzących w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. Potrafiła też pozyskać (zapewne nie bez wsparcia Promotora) wyjątkowo cenne obserwacje terenowe przeprowadzone przez badaczy holenderskich Rozemeijera i Van der Velde'a w zlewni rzeki Hupsel. Ocena przydatności obu analizowanych algorytmów modelowania HOA oraz VOA dokonana poprzez porównanie wyników modelowania z rzeczywistymi, bardzo rzetelnymi obserwacjami terenowymi nadaje pracy walor dużej wiarygodności oraz przydatności w gospodarce wodnej. Wymienione wyżej walory upoważniają do bardzo wysokiej oceny opiniowanej dysertacji doktorskiej.

Praca została napisana jasno, ładnym językiem i bardzo starannie sprawdzona, o czym świadczy brak jakichkolwiek literówek. W ocenie recenzenta walorem pracy jest również jej zwięzłość i syntetyczny styl, choć nie każdemu czytelnikowi taki skrótowy opis może odpowiadać.

4. Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

Do obowiązków recenzenta należy wskazanie usterek i błędów dostrzeżonych podczas oceny pracy. Nieliczne błędy literowe, redakcyjne i graficzne zaznaczyłem na marginesach tekstu w recenzowanym egzemplarzu rozprawy. Poniżej chciałbym wskazać kilka spraw dyskusyjnych wymagających korekty, albo uzasadnienia.

W spisie symboli dwa razy pojawia się określenie: miąższość warstwy wodonośnej, przy symbolach D_a oraz m.

W objaśnieniach wzoru (29) na str. 66 powinno być: R – infiltracja efektywna [mm/rok]. Wskaźnik infiltracji jest iloczynem współczynników α, β, γ oraz δ.

Czy strefowość współczynnika filtracji pokazana na rys.33 znajduje uzasadnienie w rozpoznaniu hydrogeologicznym?

Dlaczego zarówno model HOA jak i model VOA dają zawsze wyniki zawyżone w stosunku do obserwacji terenowych zarejestrowanych w zlewni rzeki Hupsel?

Powyższe uwagi krytyczne i wątpliwości nie zmieniają wysokiej oceny pracy.

5. Podsumowanie i wnioski

Po uważnym przestudiowaniu rozprawy doktorskiej mgr Marii Grodzkiej-Łukaszewskiej stwierdzam, co następuje:

1. Doktoranta zrealizowała cel swoich badań określony we wstępie.
2. W swoich badaniach zastosowała właściwie dobrane metody i wykazała, że opanowała trudną sztukę modelowania procesów hydrogeologicznych.
3. Uzyskane wyniki badań upoważniają do opracowania procedur poszerzających możliwości programów modelujący procesy filtracji wód podziemnych takich jak VisualMODFLOW.

Za najważniejsze osiągnięcie recenzowanej rozprawy uważam wykazanie, że wykorzystanie modelu VOA do analizy pola filtracji wód podziemnych prowadzi do uzyskania dokładniejszych wyników w porównaniu do modelu HOA.

Mgr Maria Grodzka-Łukaszewska przedstawiła rozprawę doktorską, która stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Ponadto w pracy tej wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie modelowania matematycznego, metod numerycznych i hydrogeologii oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Dlatego stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu „Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003 (Dz. U. Nr 65, poz.595). Wnioskuję zatem o dopuszczenie mgr Marii Grodzkiej-Łukaszewskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.