

dr hab. inż. Jacek Rapiński, prof. UWM
Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria lądowa, geodezja i transport

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Adama Fronia**

pt. „*Serwisy czasu rzeczywistego monitorowania TEC dla International Reference Ionosphere – IRI*”
powstałej pod opieką prof. dr hab. inż. Andrzeja Krankowskiego

Podstawa formalna wykonania recenzji

Podstawą formalną wykonania recenzji jest uchwała nr 10 Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 4 lipca 2023 roku.

Charakterystyka pracy

Rozprawę doktorską stanowi praca pisemna w formie monografii naukowej z 2023 r. pt. *Serwisy czasu rzeczywistego monitorowania TEC dla International Reference Ionosphere – IRI*. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, wprowadzenia oraz podsumowania. Zawiera również spis treści, spisy rysunków i tabel, wykaz literatury wykorzystanej w rozprawie oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera łącznie 116 stron. Spis literatury obejmuje 74 pozycji.

W swojej rozprawie Doktorant podjął próbę asymilacji parametrów VTEC (ang. *Vertical Total Electron Content*) otrzymywanych na podstawie obserwacji GNSS do modelu empirycznego modelu jonosfery IRI (ang. *International Reference Ionosphere*) aby poprawić w nim reprezentację parametrów klimatologicznych i obserwacyjnych. Model IRI (ang. *International Reference Ionosphere*) jest empirycznym modelem jonosfery, który zawiera miesięczne średnie takich parametrów, jak: gęstość elektronów, temperatura elektronowa, temperatura jonów.

W rozdziale 1 pt. „Globalny model jonosfery IRI” Doktorant opisał empiryczny globalny model ziemskiej jonosfery IRI. Rozdział składa się z dwóch podrozdziałów. W pierwszym Doktorant przybliżył dane, które są wykorzystywane w modelu IRI. W szczególności są to dane pochodzące z globalnych sieci jonosond, radarów niekoherentnego rozpraszania, satelitarnych sond górnych warstw atmosfery, satelitarnych pomiarów *in situ*, pomiarów rakietowych, wartości VTEC z pomiarów GNSS, pomiarów okultacyjnych, czy pomiarów absorpcji naziemnej. Ponadto, w podrozdziale tym Autor opisał parametry wejściowe modelu IRI, takie jak: indeksy słoneczne (R12 i F10.7), globalny indeks jonosond, indeksy geomagnetyczne (Kp, ap), czy parametry, które mogą być określone przez użytkownika. W drugim podrozdziale Doktorant szczegółowo opisał sześć warstw jonosfery wraz z wzorami odnośnie do ich wysokości i profili zwartości elektronów, rozszerzenie plazmosferyczne oraz sposób liczenia VTEC w modelu IRI.

W rozdziale 2 pt. „Asymilacja danych obserwacyjnych do modelu IRI” Doktorant opisał system mapowania w czasie rzeczywistym IRTAM (ang. *IRI Real-Time Assimilative Mapping*), w którym asymilowane są dane z pomiarów jonosond globalnej sieci GIRO do modelu IRI. Doktorant opisał i scharakteryzował algorytm stosowany w systemie IRTAM oraz wykorzystanie danych pomiarowych. Przedstawił również bazę danych GAMBIT (ang. *Global Assimilative Model of Bottomside Ionosphere Timelines*), która zapewnia dostęp do wyników IRTAM oraz globalnych map parametrów jonosferycznych w czasie rzeczywistym, i która umożliwia wizualizację tych danych.

W rozdziale 3 pt. „Wkład Jonosferycznej Grupy Roboczej IGS w rozwój metodologii opracowań TEC” Doktorant przedstawił grupę jonosferyczną IGS oraz omówił kombinowane produkty jonosferyczne IGS, sposób ich tworzenia, a także metodę walidacji generowanych produktów. Ponadto Doktorant omówił rozwiązania jonosferyczne tworzone przez cztery ośrodki obliczeniowe (w tym UWM we współpracy z Chińska Akademią Nauk) w czasie rzeczywistym oraz tworzone na ich podstawie testowy produkt kombinowany IGS RT-GIM.

W rozdziale 4 pt. „Projekt ARTEMIS” Doktorant przedstawił tytułowy projekt, który był realizowany przez pracowników UWM, w tym Autora rozprawy, we współpracy z Chińską Akademią Nauk (CAS). Doktorant opisał metodologię opracowania TEC, również w czasie rzeczywistym, a także przedstawił działanie serwisu jonosferycznego monitorowania VTEC w czasie rzeczywistym, który stworzył w ramach projektu.

W rozdziale 5 pt. „Metodologia asymilacji danych GNSS TEC do IRI w ramach IRTAM i GAMBIT” Doktorant opisał sposób tworzenia globalnych map średniej miesięcznej (klimatycznych) VTEC oraz map TEC czasu rzeczywistego na potrzeby serwisu IRTAM i bazy danych GAMBIT. Mapy średnie oraz czasu rzeczywistego tworzone są za pomocą oprogramowania napisanego przez Autora rozprawy. Doktorant przedstawił również możliwości wykorzystania swoich map w programie GAMBIT, a w szczególności wizualizację klimatycznego VTEC i porównanie z wartościami NmF2 z modelu IRI, wizualizację parametru ekwiwalentnej grubości warstwy jonosfery oraz wizualizację odchyień pomiędzy wartościami map czasu rzeczywistego i klimatycznych.

W rozdziale 6 pt. „Ocena asymilacji danych GNSS TEC do modelu IRI” Doktorant porównał wartości VTEC własnych produktów (klimatycznego i czasu rzeczywistego) względem siebie oraz względem modelu IRI. Doktorant porównał zarówno szeregi czasowe VTEC w wybranych lokalizacjach oraz globalne mapy jonosferyczne. Porównanie objęło warunki zarówno burzy geomagnetycznej, jak i spokojnej jonosfery.

W ostatnim rozdziale (Podsumowanie) Doktorant zawarł najważniejsze wyniki i wnioski swojej rozprawy.

W mojej ocenie ogólna struktura rozprawy jest prawidłowa. Praca zawiera wszystkie niezbędne elementy. Przegląd literatury jest również prawidłowy. Niemniej strukturę niektórych rozdziałów należałoby lepiej przemyśleć. Na przykład podrozdział 1.1 i rozdział 4 zawierają tylko po jednym podrozdziale; w takim przypadku lepiej by było ich nie wyodrębnić.

Cel rozprawy, ocena części merytorycznej

Doktorant sformułował hipotezę badawczą następująco: „asymilacja produktów GNSS VTEC do modelu IRI pozwala na istotną poprawę reprezentacji parametrów klimatologicznych i obserwacyjnych i stwarza nowe możliwości badawcze”.

Aby udowodnić postawioną tezę Doktorant opracował dwa produkty GNSS VTEC: (1) globalne mapy średnie (klimatyczne) jonosfery i (2) globalne mapy jonosfery czasu rzeczywistego, które poddał dalszej analizie. Powyższe mapy tworzone są za pomocą oprogramowania Doktoranta.

Doktorant do tworzenia globalnych map średniej miesięcznej VTEC (mapy klimatyczne) wykorzystuje kombinowane mapy IGS Rapid, które uśrednia w interwale 30 dni. Na potrzeby systemu GAMBIT Doktorant przedstawił je w nowej rozdzielczości przestrzennej ($8^{\circ} \times 4^{\circ}$ zamiast $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) oraz zmienił zakres maksymalnych szerokości geograficznych ($\pm 86^{\circ}$ zamiast $\pm 87.5^{\circ}$), wykorzystując do tego celu algorytm interpolacji, którego jest współautorem. Doktorant również wspominał w rozprawie, że na potrzeby systemu GAMBIT średnie mapy przygotowuje z rozdzielczością czasową 15 minut. Byłoby wskazane gdyby Doktorant bardziej przybliżył 15 minutowy produkt IGS, który wykorzystuje do tego celu (na podstawie ilu i których centrów analiz IGS jest tworzony?), ponieważ na stronach IGS można znaleźć głównie produkt IGS rapid z rozdzielczością 2-godzinną. Ponadto, czy Doktorant widziałby celowość w wykorzystaniu map IGS Final (kombinowanych bądź poszczególnych centrów analiz) do tworzenia map średniej miesięcznej VTEC i asymilacji ich (po odpowiednim dostosowaniu) w systemie GAMBIT?

Drugim produktem VTEC stworzonym i wykorzystanym przez Doktoranta są mapy czasu rzeczywistego. Mapy te zostały stworzone na podstawie parametrów VTEC, które są wyznaczone przez Autora w projekcie ARTEMIS (wspólny projekt Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego i Chińskiej Akademii Nauk (CAS)) z wykorzystaniem własnego oprogramowania. Jest to produkt bazujący na obserwacjach multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) pochodzących ze strumienia danych NTRIP. Algorytm stosowany przez Autora do wyznaczenia VTEC w czasie rzeczywistym jest prawidłowy. Mapy czasu rzeczywistego VTEC są tworzone w interwałach 5-minutowych, a na potrzeby systemu GAMBIT są uśredniane do interwału 15 minut (i konwertowane przestrzennie podobnie jak w przypadku produktu klimatycznego). Doktorant wspominał również w rozprawie, że IGS tworzy kombinowany produkt w czasie rzeczywistym. Czy ten produkt był testowany przez Autora pod kątem asymilacji w GAMBIT?

Obydwa produkty mogą być wykorzystane przez użytkowników w programie GAMBIT do asymilacji z modelem IRI oraz do wizualizacji poszczególnych map VTEC i badania jonosfery. Doktorant

wykonał szereg porównań, w których wykazał, że modele VTEC lepiej reprezentują stan jonosfery niż model IRI. Szczególnie Doktorant zwrócił uwagę na mniejszą dokładność modelu IRI po stronie nocnej, a także na niedoszacowanie wartości VTEC przez ten model. Należy także podkreślić, że Doktorant zmodyfikował procedurę do obliczania VTEC w modelu IRI-2020, aby można je było lepiej porównać z wartościami GNSS. Autor wykazał również, że model czasu rzeczywistego daje możliwość wykrywania nawet niewielkich zaburzeń jonosferycznych. Ciekawym rezultatem asymilacji map klimatologicznych w programie GAMBIT jest także możliwość policzenia grubości warstwy jonosfery.

W mojej ocenie, przeprowadzone przez Doktoranta analizy oraz interpretacje uzyskanych wyników są prawidłowe. Doktorant przygotował w sposób właściwy niezbędne mapy jonosfery i wykonał prawidłowe analizy pod kątem weryfikacji hipotezy badawczej. Doktorant wykazał się również bardzo dobrą umiejętnością samodzielnej pracy naukowej i wyciągania wniosków wynikających z przeprowadzonych badań. Według mnie zaproponowane przez Doktoranta w rozprawie rozwiązanie jest oryginalne i potwierdza postawioną hipotezę.

Na uwagę zasługuje również fakt, że stworzone przez Doktoranta mapy jonosfery czasu rzeczywistego mają duże znaczenie praktyczne. Poza wykorzystaniem ich do badania jonosfery, mogą być również stosowane w geodezji do pozycjonowania GNSS w czasie rzeczywistym (np. do wyznaczania poprawek jonosferycznych pierwszego i wyższych rzędów, wspomagania wyznaczania nieoznaczoności fazy).

Należy podkreślić również bogatą współpracę międzynarodową Doktoranta w ramach społeczności IGS i IRI.

Uwagi szczegółowe

Na stronie 20 Doktorant powinien powołać się na rysunek o numerze 1.2 (jako przedstawiający zależność przebiegu profilu dolnej części regionu F2 w zależności od przyjętych wartości B0 i B1), a nie na rysunek o numerze 1.3.

Doktorant w rozdziale 1 wymienia nazwy plików z danymi (ig_rz.dat, apf107.dat) i procedurą w języku FORTRAN (iritec.f) z modelu IRI. Nazwy te pojawiają się nagle, bez wprowadzenia (warto by było podać konkretny adres skąd można je pobrać), co utrudnia rozumienie czytanego tekstu.

Na stronie 81 w podpisie do rysunku 6.5 powinno być „do 12:00 UT” a nie „do 22:00 UT”.

Doktorant mógł lepiej dopracować zapis wzorów matematycznych w rozdziale 1 oraz zadbać o spójność zapisu parametrów we wzorach (pisane kursywą) i tekście głównym (pisane czcionką prostą). Z kolei funkcje matematyczne we wzorach należałoby pisać czcionką prostą (w systemie Latex, który Doktorant używał, słowa kluczowe funkcji poprzedza się ukośnikiem wstecznym). Są to uwagi techniczne, ale może przydadzą się Autorowi podczas pisania przyszłych tekstów. Ponadto, parametr B1 we wzorach (1.23) lub (1.27) jest zapisany na wysokości licznika, co może powodować nieporozumienia w rozumieniu tych wzorów. Parametr ten powinien być zapisany jako potęga do wyrażenia w nawiasie.

Powyższe nieścisłości nie mają istotnego wpływu na badania i wyniki zamieszczone w rozprawie.

Wnioski końcowe

Na podstawie analizy przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Fronia stwierdzam, że Doktorant w sposób oryginalny rozwiązał problem naukowy oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Doktorant wykazał się również wiedzą teoretyczną na wysokim poziomie. Wyniki rozprawy mają duże znaczenie naukowe w zakresie badania stanu jonosfery oraz praktyczne, w pozycjonowaniu GNSS. W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Adama Fronia „*Serwisy czasu rzeczywistego monitorowania TEC dla International Reference Ionosphere – IRI*” spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce¹ (Dz.U. 2018 poz. 1669). Wniosuję zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Fronia oraz dopuszczenie jej do dalszych czynności w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora i publicznej obrony.

Tomasz Dłwoż