

**Dr hab. inż. Paweł Wielgosz, prof. UWM**

**Olsztyn, 27.06.2017r.**

Instytut Geodezji

Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Pani mgr inż. Kariny WILGAN**

**pt. „INTEGRACJA MODELI TROPOSFERY UZYSKANYCH Z DANYCH GNSS  
I METEOROLOGICZNYCH Z NUMERYCZNYMI MODELAMI PROGNOZY POGODY  
NA POTRZEBY PRECYZYJNEGO POZYCJONOWANIA”**

Podstawą formalną recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu nr IDDD0000.4000.142.2017 z dnia 28 kwietnia 2017 r.

***Struktura rozprawy***

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi spójny tematycznie zbiór czterech artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych:

1. **Wilgan K., Rohm W., Bosy J.** (2015) Multi-observation meteorological and GNSS data comparison with Numerical Weather Prediction model, *Atmospheric Research*, Vol. 156, s. 29-42, IF=3.377 (75%)
2. **Wilgan K.** (2015) Zenith total delay short-term statistical forecasts for GNSS Precise Point Positioning, *Acta Geodynamica Geomaterialia*, Vol. 12, s. 345-354, IF=0.561 (100%)
3. **Wilgan K., Hurter F., Geiger A., Rohm W., Bosy J.** (2017) Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-squares collocation of meteorological and GNSS data, *Journal of Geodesy*, Vol. 91, s. 117-134, IF=2.949 (60%)
4. **Wilgan K., Hadaś T., Horodyniec P., Bosy J.** (2017) Real-time precise point positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model, *GPS Solutions*, Vol. 23, s. 1341-1353, IF=4.061 (45%)

Wymienione artykuły zostały napisane w języku angielskim i ukazały się w bardzo dobrych czasopismach naukowych indeksowanych przez Journal Citation Reports, w tym w trzech z wysokim Impact Factor:

- *Atmospheric Research* IF=3.377,
- *Journal of Geodesy* IF=2.949,
- *GPS Solutions* IF=4.061.

Doktorantka występuje jako pierwsza/główna lub jedyna autorka tych prac. W pracach wieloautorskich wkład własny doktorantki jest dominujący i waha się od 45 do 75 %. Wkład ten został omówiony w streszczeniu rozprawy przedstawionym w języku polskim oraz angielskim.

### ***Omówienie prac składających się na cykl artykułów***

Pierwsza praca w cyklu pt. *“Multi-observation meteorological and GNSS data comparison with Numerical Weather Prediction model”* dotyczy wzajemnej walidacji parametrów meteorologicznych otrzymanych z różnych źródeł, tj. z modelu pogody COAMPS, obserwacji GNSS, danych meteorologicznych oraz radiosondaży. Doktorantka porównała całkowite opóźnienie troposferyczne sygnałów GNSS w kierunku zenitu (ZTD – *Zenith Total Delay*) otrzymane z modelu COAMPS, danych ze 121 stacji sieci ASG-EUPOS i 15 stacji sieci EPN oraz z 3 radiometrów. W pierwszej części pracy doktorantka omówiła źródła danych oraz przedstawiła szczegółowo zastosowaną metodę badań, w tym interpolację parametrów meteorologicznych, wyznaczania ZTD z numerycznych modeli pogody i danych meteorologicznych, sposób analizy wyników. Następnie na podstawie ok 100 dni obserwacji zgromadzonych w okresie pomiędzy 1 grudnia 2012 a 15 marca 2013 przeprowadziły testy ZTD otrzymanego z różnych źródeł, traktując oficjalne tygodniowe rozwiązanie EPN jako referencyjne. Otrzymane wyniki pozwoliły kandydatce sformułować wniosek, że numeryczne modele pogody (NWP) mają zbyt niską dokładność by stosować je bezpośrednio do poprawy pozycjonowania satelitarne. Z drugiej strony modele te charakteryzują się, dobrą rozdzielczością czasową i przestrzenną, stąd zaproponowanym przez doktorantkę rozwiązaniem powinna być integracja NWP z danymi GNSS w celu dostarczenia wysokiej jakości ZTD.

Druga praca cyklu pt. *“Zenith total delay short-term statistical forecasts for GNSS Precise Point Positioning”* przedstawia propozycję predykcji ZTD dostarczanego w czasie prawie rzeczywistym na podstawie opracowania danych GNSS ze stacji ASG-EUPOS w postaci modelu IGGZH-G. Doktorantka stosuje tu metody AR i ARMA, a wyniki porównuje do ZTD otrzymanego z parametrów meteorologicznych z modeli GPT2 i COAMPS. Prognozę przeprowadza na okres 5 godzin w dwóch wariantach – lokalnym, oddzielnie dla każdej stacji oraz globalnym – we wspólnym modelu dla wszystkich

stacji. Analizy przeprowadza na tym samym, ok 100-dniowym zestawie danych wykorzystanym do badań w pierwszej pracy. Uzyskane wyniki potwierdzają przewagę modeli statystycznych i niezłą dokładność modelu COAMPS. GPT2 ze względu na dobową rozdzielczość czasową wypada wyraźnie najłabiej. Co ciekawe, oba warianty, lokalny i globalny, pozwalają uzyskać bardzo zbliżone, dobre wyniki (średni bias poniżej 1 mm i std poniżej 7 mm). Doktorantka podkreśla, że badania dotyczą tylko sezonu zimowego i ciekawe byłoby przeprowadzenie tego typu badań w innych okresach, szczególnie w letnim ze względu na większą wilgotność atmosfery.

W trzeciej pracy z cyklu pt. *“Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-squares collocation of meteorological and GNSS data”* doktorantka podjęła próbę opracowania modelu troposfery na podstawie integracji danych z różnych źródeł. Do integracji danych wykorzystowała metodę kolokacji najmniejszych kwadratów zaimplementowaną w oprogramowaniu naukowym COMEDIE (TU Zurich). Testy przeprowadziła dla obszarów Szwajcarii i Polski, które są przykładami regionów typowo górskich i nizinnych. Na obszarze Szwajcarii doktorantka wykorzystowała obserwacje ze stacji meteorologicznych oraz dane GNSS i przeprowadziła obliczenia w kilku wariantach. W tym przypadku przeprowadziła badania dla 3-letniego okresu danych. Wybór tak długiego okresu pozwala już na solidną analizę statystyczną obejmującą zróżnicowane stany troposfery. Największą zgodność z pomiarami radiometrycznymi (profile refrakcyjności) uzyskała integrując obserwacje meteorologiczne i GNSS. Co ciekawe, dodanie informacji o gradientach opóźnienia troposferycznego nie poprawiło wyników. Na obszarze Polski doktorantka dodatkowo wykorzystowała dane z modelu NWP WRF. Badania przeprowadziła dla okresu 5-miesięcznego obejmującego okres wiosenny i letni. Tym razem wyniki porównała nie tylko z radiosondażami, ale i z danymi referencyjnymi ZTD z pomiarów GNSS (ZTD-GNSS). Najlepszą zgodność z radiosondażami oraz ZTD-GNSS uzyskała integrując dane z WRF i GNSS, dodanie naziemnych obserwacji meteorologicznych nie poprawiło wyników. Jak słusznie zauważa, może to wynikać z faktu, że stacje meteo w Polsce znajdują się generalnie na zbliżonej wysokości. W konkluzji stwierdza, że integracja NWP i GNSS-ZTD jest koniczna w przypadku budowy dokładnych modeli troposfery.

Zwieńczeniem badań doktorantki jest czwarta publikacja pt. *“Real-time precise point positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model”*, w której przeprowadziła niezależną walidację opracowanego zintegrowanego w precyzyjnym pozycjonowaniu absolutnym PPP. W tym celu wykorzystowała znane oprogramowanie naukowe GNSS-WARP opracowane w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki UPWr. Zgodnie z wynikami wcześniejszych prac, walidacji poddała własny model troposfery oparty o NWP i dane GNSS, z tym że dodatkowo zagęściła

siatkę i poziomy wysokości wykorzystanego tu modelu WRF. Tym razem do badań wybrała 3 tygodniowe okresy z różnych pór roku i o różnej zmienności ZTD, a obliczenia przeprowadziła dla 14 polskich stacji EPN. Dla porównania wykorzystwała również popularne modele UNB3m i VMF1-FC. Co więcej, przetestowała kilka popularnych funkcji odwzorowujących zenitalne opóźnienie troposferyczne (*mapping functions*) wraz z własną funkcją opartą o metodę raytracing i model WRF. W sumie wygenerowała wyniki pozycjonowania PPP w 6 wariantach w trybie kinematycznym jak i statycznym. W przeprowadzonych analizach wyników porównała uzyskane współrzędne stacji testowych do oficjalnych rozwiązań EPN, ponadto przeprowadziła analizy czasu zbieżności rozwiązania. W konkluzjach potwierdza przewagę własnego modelu regionalnego opartego o model WRF i dane GNSS wraz z własną funkcją odwzorowującą, który pozwala na uzyskanie współrzędnych najbardziej zbliżonych do rozwiązania referencyjnego oraz na najkrótszy czas zbieżności rozwiązania.

### **Omówienie przedstawionej rozprawy**

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy interdyscyplinarnych zagadnień związanych z precyzyjnym modelowaniem troposfery – opóźnienia zenitalnego i refrakcyjności. Należy podkreślić, że w najbardziej precyzyjnych zastosowaniach GNSS to właśnie refrakcja troposferyczna sygnałów satelitarnych jest głównym czynnikiem limitującym dokładność. Przedstawione badania wpisują się w aktualne programy europejskie – E-GVAP oraz akcję COST ES1206 GNSS4SWEC, w które zaangażowane jest międzynarodowe środowisko naukowe, w tym polskie ośrodki jak UPWr, UWM i WAT. Prace z przedstawionego cyklu układają się w logiczny ciąg myślowy. Doktorantka zaczęła badania od analizy źródeł danych meteorologicznych. Następnie podjęła próbę predykcji opóźnienia troposferycznego estymowanego w czasie prawie rzeczywistym, by uzyskać ZTD dostępne w czasie rzeczywistym, przeprowadzając analizy różnych metod prognozowania. W kolejnej pracy, w oparciu o wyniki wcześniejszych badań, doktorantka podjęła próbę opracowania modelu troposfery na podstawie integracji danych z różnych źródeł odpowiedniego dla różnych obszarów. Model ten przetestowała używając wieloletnich zbiorów danych obserwacyjnych. Po wybraniu optymalnej metodologii przeprowadziła z sukcesem walidację modelu w precyzyjnym pozycjonowaniu GNSS.

Publikacje składające się na rozprawę zostały wydane w latach 2015 [1, 2] i 2017 [3, 4]. W ostatnich pracach widać coraz większą dojrzałość doktorantki, która przedstawia coraz to bardziej zaawansowane metody i analizy. Na najwyższe uznanie zasługuje fakt wydania najnowszych prac w prestiżowych czasopismach - Journal of Geodesy i GPS Solutions. Należy podkreślić, że przedstawiane przez doktorantkę wyniki są przedmiotem zainteresowania międzynarodowego środowiska naukowego.

Międzynarodową rozpoznawalność potwierdza fakt, że mimo krótkiego czasu od ukazania się jej publikacji, prace te były już cytowane 29 razy (wg. WoS).

W czasie publicznej obrony chciałbym uzyskać odpowiedzi na następujące pytania:

- Czy według doktorantki opracowany model troposfery oparty o WRF i ZTD z GNSS może być zastosowany w pozycjonowaniu metodą RTK, a w szczególności, czy może posłużyć do zwiększenia zasięgu tej metody?
- Czy opracowany model troposfery będzie dostępny operacyjnie w czasie rzeczywistym, jakie bariery należy jeszcze pokonać?
- Dlaczego doktorantka uważa, że porównanie rozwiązań w pracy [4] z warunkami nałożonymi na parametr ZTD/ZWD (COMEDIE) i bez warunków (VMF1-FC i WRF) jest zasadne?

***Podsumowanie recenzji:***

Do głównych osiągnięć doktorantki należy zaliczyć opracowanie autorskiej metody modelowania troposfery z wykorzystaniem modelu WRF i integracji ZTD otrzymanego z opracowania obserwacji GNSS oraz wykazanie przewagi nowej metody w stosunku do istniejących rozwiązań. Przedstawiony zintegrowany model troposfery może być z powodzeniem stosowany do poprawy precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego. Ponadto autorka wykazała się bardzo szeroką wiedzą z zakresu modelowania troposfery oraz numerycznych modeli pogody. Przedstawiona w rozprawie metodologia jak i wyniki badań nie budzą żadnych wątpliwości. Tym bardziej, że zostały one już wcześniej wielokrotnie zrecenzowane przez recenzentów zagranicznych w prestiżowych czasopismach.

W mojej ocenie przedstawiona przez mgr inż. Karinę Wilgan rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 z późn. zm.).

