

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Malczewskiego pt. „Modele i algorytmy głębokiego uczenia w analizie szeregów czasowych cen mleka w proszku”
przygotowanej pod kierunkiem naukowym dr hab. Zbigniewa Krysiaka, prof. SGH.

1. Podstawa prawna

Podstawą prawną wykonania recenzji jest decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Ekonomia i Finanse, Federacji Naukowej WSB-DSW Merito z dnia 9 grudnia 2023 r. Przedmiotem oceny jest maszynopis rozprawy doktorskiej, który łącznie z wykazem bibliografii liczy 197 stron tekstu. Oceniana rozprawa ma klasyczny układ obejmujący część wstępną, 3 rozdziały o charakterze teoretycznym i empirycznym, podsumowanie i wnioski oraz spisu ilustracji i tabel.

2. Ocena doboru tematu badawczego

Ponad dwie dekady temu profesor Leo Breiman zidentyfikował następujące dwie kultury w stosowaniu modelowania statystycznego (Leo Breiman. Statistical modeling: The two cultures with comments and a rejoinder by the author. Statistical science, 16(3):199–231, 2001).

Innymi słowy rozdzielił On statystykę na kulturę modelowania danych i kulturę algorytmiczną. Pierwsza z nich to tradycyjna analiza statystyczna stosowana w 2000 roku przez 98% statystyków (według szacunków profesora Breimana). W statystycznej analizie danych dostępne jest szerokie instrumentarium do tworzenia i oceny jakości zbudowanego modelu oraz wskazówki kiedy taki model może być przydatnym narzędziem do prognozowania.

Natomiast w kulturze modelowania algorytmicznego (modele sztucznej inteligencji) obowiązuje walidacja modelu oparta o niezależny zbiór danych. Co więcej aktualnie po 20 latach od tej ważnej dyskusji profesora Breimana z czołowymi profesorami z obszaru statystyki sytuacja znacząco się zmieniła. Mianowicie, w przypadku dużych zbiorów danych znaczna część badaczy używa coraz częściej metod uczenia maszynowego do analizy i prognozowania. Badania Doktoranta wpisują się więc w aktualny nurt wykorzystania metod AI do prognozowania zjawisk ekonomicznych.

Przedmiotem badań podjętych przez Autora była analiza zmian oraz przewidywanie cen odtłuszczonego mleka w proszku. Produkcja mleka ma bardzo duże znaczenie w ekonomice gospodarstw rolniczych oraz w strukturze konsumpcji. Wybór tematu przez Doktoranta uważam więc za w pełni uzasadniony i aktualny. Przewidywanie cen mleka, w tym także cen OMP powinno być procesem ciągłym, ponieważ na ich podstawie podejmowane są decyzje o zwiększaniu lub zmniejszaniu produkcji. Prognozowanie tego zjawiska nie jest procesem łatwym, ponieważ szeregi czasowe reprezentujące ceny mleka charakteryzują się, oprócz tendencji rozwojowej, sezonowością, wahaniami cyklicznymi i periodycznymi oraz nieliniowością i autokorelacją. Ponadto szeregi te są zazwyczaj niestacjonarne, co utrudnia bezpośrednie wykorzystanie statystycznych metod ilościowych. Stąd też wynikają trudności w wykorzystaniu konwencjonalnych algorytmów predykcyjnych. Jednym z możliwych rozwiązań, zaproponowanych przez Autora jest wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji do prognozowania cen surowców mleczarskich. Jest to ciągle nowatorskie podejście do prognozowania cen mleka, w tym także OMP. Reasumując, dobór tematu rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie. Wybrany przez Doktoranta problem naukowy i obszar badawczy jest interesujący, ważny i innowacyjny z perspektywy poznawczej i aplikacyjnej. Autor rozprawy doktorskiej wykazał się dobrą znajomością metod AI i ich aplikacji do prognozowania OMP. Przedstawiona praca mgr inż. Jarosława Malczewskiego cechuje się oryginalnością podjętej problematyki badawczej, nowoczesnym aparatem badawczym oraz wskazuje przydatność różnych metod rozwiązań w praktyce.

3. Cele pracy oraz sformułowanie hipotez badawczych

Podstawowym celem pracy było zaprojektowanie oraz implementacja autorskiego algorytmu predykcji cen odtłuszczonego mleka w proszku według kultury algorytmicznej. W tym celu skonstruowano algorytm numeryczny wraz z jego weryfikacją na podstawie szeregu czasowego danych tygodniowych cen mleka w proszku od 2000 do 2020 roku.

W rozprawie sformułowano cztery hipotezy badawcze:

Hipoteza 1: Algorytmy sztucznej inteligencji są właściwym narzędziem służącym do konstrukcji i implementacji przewyższających rozwiązania konkurencyjne systemów prognozowania cen odtłuszczonego mleka w proszku.

Hipoteza 2: Metody rekonstrukcji sygnałów niepełnych są właściwym narzędziem służącym do wyeliminowania immanentnego szumu obciążającego próbki szeregów czasowych cen mleka w proszku.

Hipoteza 3: Szeregi czasowe cen mleka w proszku są realizacją niestacjonarnego procesu.

Hipoteza 4: Szeregi czasowe cen mleka w proszku nie można sprowadzić do postaci stacjonarnej w drodze różnicowania.

Dwie pierwsze hipotezy nie budzą zastrzeżeń, sformułowano je w sposób czytelny, jednoznacznie wskazując dużą przydatność algorytmów sztucznej inteligencji do prognozowania cen mleka w proszku. Doktorant wykazał się tu znajomością warsztatu metodycznego i zaawansowaniem naukowym kształtując cele rozprawy i formułując hipotezy w oparciu o istniejący stan wiedzy z zakresu metod prognozowania cen mleka i jego przetworów. Wyodrębnienie 2 pozostałych hipotez budzi moje wątpliwości. Po pierwsze hipoteza 3) jest częścią składową hipotezy 4), a co więcej nie są one w pracy w pełni weryfikowane odpowiednimi testami statystycznymi, m.in. testem DF, ADF czy testem KPSS. Dodatkowo sformułowano 6 celów szczegółowych i 4 pytania szczegółowe. Cele szczegółowe pracy i sformułowane pytania są zbyt rozbudowane a ich redukcja lub całkowite pominięcie nie wpłynęłaby na jakość i wartość pracy. Większość pytań szczegółowych jest powtórzeniem problematyki wcześniej określonej w celach szczegółowych.

Główny cel i hipotezy badawcze zostały określone w pracy w sposób ambitny i wskazują one na teoretyczno - empiryczny charakter pracy. W celu pracy należy wyróżnić trzy podstawowe elementy, które wyznaczają obszar problemowy. Pierwszym jest zaprojektowanie i budowa autorskiego algorytmu predykcyjnego opartego o wielowarstwowe sieci neuronowe. Drugim jest wykorzystanie sieci splotowych łącznie z eliminacją krótkookresowych wahań wartości (wykorzystanie metodologii próbkowania oszczędnej procedur odszumiania) szeregów czasowych cen OMP. Trzecim elementem celu pracy jest implementacja algorytmu wraz z weryfikacją i analizą porównawczą z dotychczasowymi statystycznymi metodami prognozowania powszechnie stosowanymi na rynkach rolnych. Powyższe obszary wskazują, że zakwalifikowanie pracy do dyscypliny ekonomii i finansów jest w pełni uzasadnione.

4. Ocena doboru literatury, metod i zastosowanych narzędzi badawczych

Teoretyczne elementy recenzowanej rozprawy doktorskiej zostały przygotowane na podstawie szerokich studiów literatury zarówno polskiej jak i angielskojęzycznej. W trakcie badań literaturowych wykorzystano 337 pozycji bibliograficznych, na które złożyły się publikacje książkowe, artykuły naukowe oraz akty prawne i pozycje internetowe. Zdecydowaną większość pozycji bibliograficznych stanowią publikacje w języku angielskim. Oceniając ten aspekt pracy

należy stwierdzić, że wykorzystano w pracy liczne, dobrze dobrane pozycje bibliograficzne z zakresu metod prognozowania, szczególnie metod uczenia maszynowego (sztucznej inteligencji) oraz z zakresu przetwórstwa mleka.

Empiryczna część pracy opracowana została na podstawie danych tygodniowych cen OMP od 2010 do 2020 roku dostarczonych przez Global Dairy Trade. Do analizy danych empirycznych i prognozowania Doktorant, zastosował przede wszystkim autorski hybrydowy algorytm predykcyjny wykorzystujący wielowarstwowe sieci neuronowe. Cennym wkładem Doktoranta jest zaprojektowanie i zaimplementowanie w środowisku Matlab Mathworks algorytmu predykcyjnego. Podkreślenia wymaga także fakt, że po raz pierwszy w obszarze predykcji cen zastosowano splotowe (konwolucyjne) sieci neuronowe, dotychczas stosowane w obszarze klasyfikacji obrazów i dźwięków. Opracowany algorytm predykcyjny poddano w pracy restrykcyjnym testom wydajnościowym, a osobnej analizie poddano techniki odsumiania wektorów uczących. Szkoda, że Doktorant nie przedstawił wstępnej charakterystyki danych empirycznych, wykazałaby ona jakimi elementami i ich wielkościami charakteryzował się szereg czasowy cen OMP. W części weryfikacyjnej wyników porównano kilka statystycznych metod predykcyjnych z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu autorskiego algorytmu predykcyjnego. Co było podstawą wyboru tych a nie innych statystycznych metod (por. np. tab. 2.2, s. 145 i tab. 2.3, s. 146) do analizy porównawczej wartości błędów z wielkością błędu predykcji przy wykorzystaniu sieci neuronowych?. Tym bardziej, że Doktorant wcześniej skoncentrował się tylko na modelach autoregresyjnych, tj. AR, MA, ARMA, ARIMA, ARDL a nie ARX, TAR, STAR (por. tab. 1.1, s. 30). Jaki przyjęto do analizy i jak określono stopień różnicowania dla modeli ARIMA oraz rząd opóźnień (p i q) dla pozostałych modeli autoregresyjnych?

Z perspektywy przyjętych celów pracy dobór danych empirycznych do badań oraz zastosowane metody i narzędzia badawcze oceniam jako właściwe. Wykorzystanie danych empirycznych pozwoliło na weryfikację poprawności i skuteczności skonstruowanego algorytmu. Należy w tym miejscu podkreślić staranność i przejrzystość opisu proponowanego algorytmu AI. Część metodyczną pracy uznaję za poprawną.

5. Ocena układu, wartości naukowej i oryginalności rozprawy

Strukturę pracy oceniam pozytywnie. Recenzowana praca posiada układ, w którym występuje część wstępna, teoretyczna i empiryczna. Pracę rozpoczyna prezentacja koncepcji badań, następnie mamy zbyt rozbudowany rozdział teoretyczny, który dotyczy prezentacji i omówienia podstawowych modeli analizy szeregów czasowych łącznie z budową i architekturą sieci neuronowych (ok. 113 stron). Kolejny, najważniejszy, rozdział empiryczny to wykorzystanie autorskiego algorytmu predykcyjnego do prognozowania cen mleka i analiza jego skuteczności w porównaniu ze statystycznymi metodami prognozowania (ok. 36 stron). Ostatnią częścią pracy jest podsumowanie i wnioski. Układ pracy w mojej ocenie jest logiczny i spójny w zakresie struktury głównie z punktu widzenia kolejności poruszanych problemów. Wskazuje to na gruntowne i odpowiednie przemyślenie treści rozprawy. Poszczególne rozdziały pracy charakteryzują się jednak zbyt zróżnicowaną objętością. Analizując możliwość udoskonalenia struktury pracy wydaje się, że można byłoby rozdział pierwszy podzielić na dwie części: pierwsza dotyczyłaby metod analizy statystycznej stosowanych w prognozowaniu, druga obejmowałaby podstawy teoretyczne sieci neuronowych.

Wartość naukowa rozprawy wynika z zawartości merytorycznej poszczególnych rozdziałów. W części wstępnej Doktorant uzasadnia wybór problematyki badawczej, formułuje cel i zakres badań oraz hipotezy badawcze. Omawia także materiał empiryczny i źródło jego pochodzenia. Pierwszy obszerny rozdział zawiera omówienie wybranych statystycznych metod wykorzystywanych do prognozowania cen OMP na rynku, jest opracowany on na podstawie literatury i w mojej opinii mógłby być znacznie krótszy. Analiza składowych szeregu czasowego, w rozbiciu na trend, wahania sezonowe i periodyczne oraz wyodrębnienie punktów przełamania (np. testem Bai Perrona) niewątpliwie wzbogaciłaby analizę szeregu czasowego. W rozdziale tym Doktorant, w pierwszej kolejności omawia statystyczne metody analizy szeregów czasowych a w dalszej przybliży problematykę metody uczenia maszynowego, szczególnie sieci neuronowej i filtracji cyfrowej. Wśród statystycznych metod prognozowania Doktorant koncentruje się tylko na modelach autoregresyjnych i wybranych modelach trendu bez podania uzasadnienia ich wyboru.

W podejściu statystycznym wybieramy z rodziny rozkładu pewien model, następnie na podstawie próby estymujemy jego parametry metodą ML lub OLS i testujemy czy dokonaliśmy dobrego wyboru modelu na podstawie teoretycznej funkcji strat. Natomiast w algorytmicznym podejściu na zbiorze uczącym poszukujemy modeli z bardzo wieloma zmiennymi na podstawie

empirycznej funkcji strat. Do porównania skuteczności tych dwóch podejść należy wybrać i precyzyjnie określić tzw. funkcję straty.

W kolejnym obszernym rozdziale istotną jego częścią jest konstrukcja i weryfikacja autorskiego algorytmu predykcyjnego (podrozdziały od 1.4.1, do 1.4.4 nie wnoszą nic nowego, są teoretyczne i powszechnie znane z literatury). Bardzo cennym fragmentem pracy jest wykorzystanie sieci pamięci długoterminowej (LSTM) oraz głębokich sieci splotowych. Do weryfikacji skuteczności prognozowania Autor wykorzystał dane o średnich tygodniowych cenach OMP. Dane empiryczne, zgodnie z wymogami CNN poddano standaryzacji. Mam tu wątpliwości czy ten sposób normalizacji jest odpowiedni, szereg czasowy cen OMP, jak wcześniej Doktorant zaznaczył, charakteryzuje się nieliniowością, autokorelacją, brakiem stacjonarności a więc także innym rozkładem niż rozkład normalny. Odpowiedniejszą metodą normalizacji byłaby tutaj np. unitaryzacja. Badania dotyczyły jednowymiarowego szeregu czasowego a skonstruowany model CNN wymaga co najmniej dwóch wektorów wejściowych. W moim przekonaniu korzystniejsze byłoby chyba brane również przez Autora, wykorzystanie dwóch wektorów, np. średniej ceny OMP i wolumenu sprzedaży. Doktorant wybrał inne rozwiązanie, dopuszczalne w literaturze, sekwencję jednowymiarową podzielił na wiele wejść (próbek) wykorzystując opracowany algorytm w MATLAB-ie. Natomiast do oceny precyzji prognozowania słusznie wykorzystano te same miary skuteczności algorytmów, od prostych miar, tj. RMSE, MAPE, MSPE określających błąd predykcji ex post, aż do określenia statystycznie istotnych różnic w wielkości błędu predykcji, gdzie pomiędzy różnymi metodami zastosowano statystykę Diebolda – Mariano (DM). Na jakim zestawie danych (zbiór uczący, walidacyjny, czy testowy i w jakiej proporcji zostały one wydzielone z całej próby badawczej?) dokonano oceny wykorzystanych w pracy metod predykcji?

Skuteczność proponowanej metody CNN z wbudowaną procedurą odszumiania, (nie do końca wiadomo jak Doktorant definiuje procedurę odszumiania – czy to jest dekompozycja szeregu czasowego w ujęciu statystycznym czy dotyczy to tylko zachowania się składnika losowego w czasie?) oceniono na tle uzyskanych wyników z innych metod. Doktorant nie wyjaśnia doboru tych metod prognozowania przyjętych do analizy porównawczej (czy analiza porównawcza dotyczyła szeregu czasowego oczyszczonego z wahań sezonowych i periodycznych?). Uzyskane wyniki wymagają szerszego wyjaśnienia, nie jest też w pełni zrozumiana punktowa ocena wybranych metod predykcji (tab. 2.3, s. 146), jakiego okresu predykcji dotyczy?. Doktorant skoncentrował się na predykcji punktowej, a więc pominął prognozowanie przedziałów ufności zmiennej przy zadanym prawdopodobieństwie. Brakuje także szerszego omówienia wielkości błędów (RMSE) dla autorskiego algorytmu i innych rozważanych metod

dla przypadków prognozowania o k kroków w przód i co oznacza M w tabelach 2.9 – 2.12, s. 156 – 159 ?

W zakończeniu pracy (streszczenie) sformułowano wnioski, które nie dotyczą badanej problematyki. Doktorant nie analizował mechanizmów rynkowych kształtowania cen na rynku mleka. Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie autorskiego algorytmu predykcyjnego. Praca przed ewentualną publikacją powinna być poddana wnikliwej redakcji. Zawiera bowiem bardzo wiele nieścisłości, pomyłek, brak jest podania źródeł pod tabelami, itp.

Podsumowując ocenę merytoryczną przedstawionej rozprawy stwierdzam, że Doktorant przedstawił interesującą koncepcję badawczą spełniającą przyjęte standardy w warstwie merytorycznej.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Autor podjął się bardzo trudnego i obszernego problemu badawczego. Próba rozwiązania go wymagała od Doktoranta dużej wiedzy z zakresu budowy modeli ekonometrycznych oraz sieci neuronowych do prognozowania zjawisk gospodarczych. W pracy zauważalne jest dobre przygotowanie merytoryczne Autora oraz umiejętności posługiwania się przez niego informacją i jej przetwarzaniem. Doktorant poprawnie selekcionuje informacje, formułuje wnioski oraz zmierza w kierunku uzyskania finalnego rezultatu. Podejście doktoranta do badanej problematyki w świetle aktualnej wiedzy jest właściwe. Doktorant przedstawił problem badawczy, sformułował hipotezy badawcze i dokonał przeglądu dotychczasowego dorobku naukowego w tym zakresie. Zaletą pracy jest dobra znajomość omawianych zagadnień, poparta połączeniem teorii z wynikami empirycznymi. Praca doktorska ma walory poznawcze, analityczne oraz aplikacyjne.

Biorąc pod uwagę ocenę formalną, metodyczną i merytoryczną pracy należy stwierdzić, że odpowiada ona wymaganiom stawianym pracom doktorskim w dyscyplinie ekonomia i finanse. Reasumując, uważam, że recenzowana praca spełnia stawiane wymogi i wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.

Bolesław Borkowski