

Kielce, 24.01.2022r.

Dr hab. inż. Hanna Koshlak, prof. PŚk
Katedra Fizyki Budowli i Energii Odnawialnej
Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki
Politechnika Świętokrzyska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Teresy Kurek
pt.: „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci
Ciepłowniczej”**

Podstawa opracowania

Podstawę formalną do opracowania niniejszej recenzji stanowią:

- Pismo Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego z dnia 29 listopada 2021 roku (nr ewid. ISGiE/138/2021;)
- Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Teresy Kurek pt.: „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”, załączonej do ww. pisma;

Promotorom rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Teresy Kurek pt.: „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”, są Pan prof. dr hab. inż. Konrad Świrski, promotor pomocniczy - Pan prof. dr hab. inż. Konrad Wojdan.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Ciepłownictwo systemowe odgrywa istotną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego polskim aglomeracjom. Na obszarach miejskich o dużym zagęszczeniu zapotrzebowania na ciepło najbardziej racjonalnym i ekonomicznym sposobem zaopatrzenia w ciepło mieszkańców są sieci ciepłownicze. Modelowanie i symulacja inteligentnych systemów energetycznych do prognozowania zapotrzebowania na ciepło odgrywa ważną rolę w rozwoju sektora energetycznego, kształtowaniu polityki i zarządzaniu tymi systemami. Jednym z kierunków działań w tym zakresie jest wdrażanie technologii informatycznych i opracowanie strategii operacyjnych w celu zoptymalizowania kosztów i poprawy ogólnej

 1

pracy sieci. Wykorzystanie prognozy zapotrzebowania na ciepło w inteligentnych sieciach ciepłowniczych pozwoli obniżyć i zoptymalizować koszty dystrybucji ciepła, zmniejszyć straty oraz polepszyć parametry eksploatacji sieci. W ten właśnie obszar wpisuje się recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Teresy Kurek pt.: „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”. Rozprawa doktorska obejmuje badania dotyczące stworzenia systemu prognozowania zapotrzebowania na ciepło z wykorzystaniem wybranych modeli prognostycznych. Istotne znaczenie ma to, że algorytmy wyznaczające wartości prognoz zostały stworzone na podstawie modeli uczenia maszynowego, w oparciu o dane dotyczące pomiarów konsumpcji ciepła oraz dane pogodowe pozyskane z Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej. Te dane zawierały pomiary z 15600 węzłów cieplnych, rejestrowanych z rozdzielczością godzinową. Stworzone w oparciu o te dane modele zostały wdrożone przez Warszawską Sieć Ciepłowniczą przyczyniając się do optymalizacji funkcjonowania. W tym kontekście, podjęte w recenzowanej pracy badania są ważne zarówno z naukowego jak i użytecznego punktu widzenia i w istotny sposób mogą przyczynić się do poszerzenia wiedzy w zakresie możliwości efektywnego planowania oraz eksploatacji systemu ciepłowniczego. Tematyka rozprawy jest więc aktualna na tle obecnego stanu wiedzy i potrzeb energetyki cieplnej.

Pracę doktorską przygotowano w postaci manuskryptu liczącego 149 stron tekstu, 63 rysunki i 27 tabel. Bibliografia obejmuje 80 pozycji literaturowych z liczących się czasopism krajowych i zagranicznych. Rozprawa obejmuje:

- streszczenie w języku polskim i angielskim,
- spis treści,
- rozdziały:
 1. Wprowadzenie, składające się z trzech ponumerowanych podpunktów. W skład wprowadzenia wchodzi: cel, zakres pracy, tezy, układ rozprawy doktorskiej.
 2. Prognozowanie szeregów czasowych
 3. Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło w sieciach ciepłowniczych
 4. Metodologia budowy systemów opartych na technikach uczenia maszynowego
 5. Warszawska Sieć Ciepłownicza
 6. System prognozowania zapotrzebowania na ciepło dla warszawskiej sieci ciepłowniczej
 7. Wyniki wdrożenia w systemie wsparcia decyzji (SWD)
 8. Podsumowanie
- Dodatek A - Wkład osób trzecich w rozwój systemu prognostycznego
- Bibliografię

Należy zaznaczyć, że treść pracy zgodna z jej tytułem „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”.

Analiza i ocena pracy

Rozdział 1 „Wprowadzenie”

W rozdziale 1 Doktorantka scharakteryzowała obszar tematyczny pracy oraz przedstawiła uzasadnienie podjęcia tematu. Umieściła w tym rozdziale również cel, zakres pracy i tezy rozprawy. Uzasadniając potrzebę prowadzenia badań Doktorantka wykazała, że trendy zmian dla przyszłych zrównoważonych systemów ciepłowniczych wiążą się z wyzwaniem dotyczącym wprowadzenia efektywnego sposobu planowania i eksploatacji systemów energetycznych w oparciu o dane dotyczące zapotrzebowania i charakteru odbioru ciepła.



Wskazała jednocześnie na potrzeby tworzenia systemów informatycznych służących prognozowaniu zapotrzebowania na ciepło co również pozwoli na optymalizację pracy sieci ciepłowniczej, w tym dostarczania ciepła zgodnie z oczekiwaniami indywidualnych odbiorców, przy jednoczesnej minimalizacji strat.

Jako obiekt badań Doktorantka wybrała warszawski system ciepłowniczy, który jest największym systemem scentralizowanym w kraju i jednym z największych w Europie.

W podpunkcie 1.1 Doktorantka przedstawiła cel i zakres pracy. Celem badawczym było opracowanie systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG) dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej (WSC), służącego optymalizacji pracy niniejszej sieci ciepłowniczej. System ten powinien zapewnić tworzenie prognozy zapotrzebowania na ciepło dla całej sieci jak i obszarów sieci oraz prognozę zapotrzebowania na ciepło dla zadanego horyzontu czasowego wraz z przedziałami ufności. W celu realizacji tego systemu niezbędne było stworzenie następujących warstw: warstwa wczytywania danych, warstwa walidacji oraz uzupełnienia brakujących danych, warstwa agregacji danych, warstwa wyznaczająca prognozy.

Podpunkt 1.2 obejmuje tezy pracy. Autorka rozprawy sformułowała, że celem pracy jest udowodnienie tezy głównej oraz tez pobocznych. Praca mieści jedną tezę główną i dwie tezy poboczne. Główną tezę pracy jest stwierdzenie, że „możliwe i konieczne jest stworzenie SPROG dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej na podstawie danych pomiarowych z systemu telemetrii oraz danych pogodowych”. Teza ta kształtuje sposób prowadzenia pracy, ma wpływ na jej treści oraz postać formułowanych zadań cząstkowych. Tezy poboczne wskazują na to, że prognozowanie zapotrzebowania na ciepło dla obszarów sieci możliwe przy wykorzystaniu telemetrycznych pomiarów z węzłów cieplnych oraz uzyskanie wysokiej dokładności prognoz zapotrzebowania na ciepło dla dużych sieci ciepłowniczych możliwe przy tworzeniu modeli prognostycznych bazujących na metodach uczenia maszynowego. Udowodnieniu przedstawionych tez służy taka realizacja pracy, która zapewni osiągnięcie jej celu.

Podpunkt 1.3 obejmuje ogólną informację o układzie rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 2 Doktorantka rozwinęła przedstawioną we wstępie tematykę pracy, w powiązaniu z problematyką prognozowania szeregów czasowych. W podpunkcie 2.1 Doktorantka przedstawiła ogólną informację o teorii szeregów czasowych, które służą do modelowania oraz prognozowania różnych procesów w wielu dziedzinach. Doktorantka zamieściła tylko jedną technikę badawczą – metodę dekompozycji (wyróżnia się pięć klasycznych technik badawczych: modele ARMA i ARIMA, modeli transfer-function, technika stosowania filtrów, przede wszystkim filtrów Wienera-Kołmogorowa, Kalmana, Kalmana-Bucy’ego, metody „wygładzania” (smoothing methods), metoda dekompozycji. [*Maria Z. Wesółowska (Warszawa) O szeregach czasowych. Na marginesie skryptu. Analiza szeregów czasowych pod redakcją Władysława Milo*]. Niestety Doktorantka nie uzasadniła wyboru metody dekompozycji jako najlepszej dla rozwiązania problemu postawionego w pracy doktorskiej. W opinii recenzenta zabrakło porównania skuteczności i uzasadnienia stosowanej w pracy metody. To powinno być uzupełnione na etapie obrony pracy. Na rys. 2.1, przedstawiającym przykładowy szereg czasowy zabrakło opisu osi rzędnych.

W podpunkcie 2.2 Doktorantka przedstawiła przegląd literaturowy dotyczący modeli szeregów czasowych obejmujące regresję wieloraką, regresję grzbietową, autoregresję z niezależnymi zmiennymi wejściowymi i sztuczne sieci neuronowe. Autorka podała podstawowe informacje o wybranych modelach szeregów czasowych bez ich krytycznej analizy. W opinii recenzenta zabrakło tu przykładów literaturowych do porównania wad i

zalet, skuteczności oraz uzasadnienia stosowanych w pracę modele. W podpunkcie 2.3 rozprawy Doktorantka przedstawiła informacje o wskaźnikach jakości prognoz: współczynnik determinacji, średni błąd absolutny w czasie i średni absolutny błąd procentowy w czasie. Na str. 27 wzór 2.8 w liczniku i mianowniku błędnie zawiera nawias podwójny. Podpunkt 2.4 obejmują informacje i wzory do obliczenia przedziałów ufności modeli oraz obszary ich zastosowania. Nie podano źródeł literaturowych, z których zaczerpnięto rysunki 2.4-2.6.

Rozdział 3 pracy dotyczy prognozowania zapotrzebowania na ciepło w sieciach ciepłowniczych. W podpunkcie 3.1 Doktorantka przedstawiła dwie metody wykorzystywane do obliczania zapotrzebowania na energię cieplną w sieciach ciepłowniczych. W opinii recenzenta zabrakło informacji dotyczących danych literaturowych, z których pochodzą wybrane metody obliczeniowe jak i ich zastosowania do obliczeń dla przykładowych sieci ciepłowniczych ze wskazaniem ich wad i zalet.

W podpunkcie 3.2 Autorka dokonała opisu zagadnień związanych z sezonowością zapotrzebowania na ciepło. Wskazuje przy czym na ważność uwzględnienia w modelach prognostycznych prognozowania zapotrzebowania na ciepło nie tylko w sezonie grzewczym ale i w okresach przejściowych. Autorka przedstawiła dane dotyczące zapotrzebowania na ciepło w zależności od sezonu dla warszawskiej sieci ciepłowniczej. Przedstawione na rys. 3.1 dane są nie pełne, ponieważ zabrakło danych za okres od września do grudnia 2017 r. Natomiast na stronie 34 rozprawy Autorka pisze, że „największe i nieregularne zmiany w zapotrzebowaniu na ciepło w okresie przejścia z sezonu letniego do pełnego sezonu grzewczego oraz w okresie przejścia z pełnego sezonu grzewczego do sezonu zimowego”. Czy Autorka uważa, że istnieje okres przejściowy od pełnego sezonu grzewczego do sezonu zimowego? Te nieścisłości wymagają wyjaśnienia na etapie obrony.

W podpunkcie 3.3 Doktorantka przedstawiła przegląd literaturowy dotyczący metod wyznaczania zapotrzebowania na ciepło, typy i klasy modeli prognostycznych wraz ze wnioskami wynikającymi z dokonanego przeglądu literaturowego. We wnioskach zamieszczonych na str. 38 Autorka wskazując na możliwość precyzyjnego prognozowania zapotrzebowania na ciepło z wykorzystaniem uczenia maszynowego, zwraca jednak uwagę, że barierą może być zbieranie danych pomiarowych z każdego węzła cieplnego. Doktorantka zwróciła uwagę, że w większości prac badania dotyczące pomiarów zapotrzebowania na ciepło analizują jedynie pojedyncze węzły cieplne natomiast nieliczne pracę uwzględniają większą liczbę odbiorców w sieci, co potwierdza zasadność badań przedstawionych w recenzowanej rozprawie doktorskiej. W oparciu o przedstawioną analizę danych literaturowych Doktorantka przedstawiła własną autorską propozycję stworzenia systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG) dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej na podstawie danych pomiarowych z węzłów cieplnych przyłączonych do systemu telemetrii oraz danych pogodowych.

W opinii recenzenta w przeglądzie literatury brak jest omówienia innych, znanych programów do modelowania i optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych. Obecnie istnieje kilka programów do modelowania i optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych, m.in. program TERMIS, testowany w krajowych sieciach ciepłowniczych, Bentley SisHYD, który jest użytkowany przez dostawców ciepła w krajach skandynawskich. Tak analiza istniejących programów ze wskazaniem wad i zalet powinna być przedstawiona na etapie obrony pracy.

Kontynuacją przeglądu literatury jest również **rozdział 4** zatytułowany „Metodologia budowy systemów opartych na technikach uczenia maszynowego”. Doktorantka przedstawiła opis i wyniki prac naukowych związanych z procesem tworzenia systemu opartego na technikach uczenia maszynowego. Na podstawie przeglądu literatury Doktorantka szczegółowo opisała

 4

kluczowe etapy budowy systemów bazujących się na technikach uczenia maszynowego w powiązaniu z problematyką tworzenia systemów opierających się na modelach prognostycznych. Zostały omówione trzy podstawowe etapy tworzenia systemu prognostycznego: definicja problemu, modelowanie oraz implementacja. Doktorantka przedstawiła merytoryczne uzasadnienie dla poszczególnych etapów tworzenia systemu prognostycznego, wykorzystując jako argumenty nowoczesne rozwiązania naukowe i praktyczne.

Rozdział 5 obejmuje opis warszawskiego systemu ciepłowniczego. Doktorantka przedstawiła, krótką charakterystykę sieci i scharakteryzowała budowę systemu, długość, nośnik ciepła, zapotrzebowanie na energię cieplną, elementy systemu ciepłowniczego.

Dwa kolejne rozdziały 6 i 7 są najistotniejsze z punktu widzenia realizacji zadania badawczego i udowodnienia tezy dysertacji. **W rozdziale 6** zatytułowanym „System prognozowania zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej” zaprezentowano poszczególne etapy tworzenia prognozowania zapotrzebowania na ciepło. Doktorantka skoncentrowała się na stworzeniu kilku modeli prognostycznych, będących podstawą funkcjonowania systemu. Należy zaznaczyć, że stworzony przez Autorkę, we współpracy z firmą Transition Technologies S.A., system generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG), stanowi element Systemu Wsparcia Decyzji (SWD), który ma na celu optymalizację pracy warszawskiej sieci ciepłowniczej. Ogólne zasady działania SWD przedstawiono na rys. 6.1, który nieprawidłowo został nazwany wykresem. Algorytm optymalizacji wykorzystując historyczne oraz pomiarowe wraz z wynikiem prognozy zapotrzebowania na ciepło ma służyć operatorom sieci w podejmowaniu decyzji.

W podpunkcie 6.1 Autorka szczegółowo opisała założenia systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło. Sformułowane na stronie 65 założenie dla definicji systemu, które brzmi: „modele prognostyczne stworzone zostaną z wykorzystaniem uczenia z nauczycielem” niejasne dla czego Autorka odwołuje się do źródła literaturowego [36], które ma charakter przeglądowy. Dalej Autorka stwierdza, że „wymagane dane obejmują dane pomiarowe z węzłów cieplnych...”. W opinii recenzenta zabrakło tu podać liczbę węzłów z których będą odczytywane dane pomiarowe zużycia ciepła.

W podpunkcie 6.2 Doktorantka przedstawiła dane wejściowe do stworzenia modeli prognostycznych, które zostały sklasyfikowane na: dane pomiarowe z węzłów cieplnych, dane pogodowe, dane dodatkowe dotyczące węzłów cieplnych. Dane pogodowe obejmowały historyczne pomiary i prognozy sześciu parametrów: temperatury zewnętrznej, prędkości wiatru, kierunku wiatru, wilgotności, nasłonecznienia i zachmurzenia. Doktorantka podała, że dane pogodowe historyczne oraz prognozowane zostały podane w tabeli 6.4. Tym czasem tabela ta obejmuje jedynie wykaz parametrów oraz przypisanych im jednostek bez jakichkolwiek wartości. Dane pogodowe dla Warszawy zostały przedstawione na rys. 6.10, przy czym nie jest wiadomo jaka prędkość wiatru maksymalna czy średnia została uwzględniona w analizie danych pomiarowych. W celu opracowania zaawansowanych algorytmów obliczeniowych, na potrzeby modelu prognostycznego zapotrzebowania na ciepło, Doktorantka wykorzystwała rzeczywiste, archiwalne, godzinowe dane pomiarowe z okresu lipiec 2015 - lipiec 2018. W podpunktach 6.2.2 – 6.2.3 Autorka przeanalizowała dane eksploatacyjne z węzłów cieplnych i dane pogodowe oraz zaprezentowała algorytmy, pozwalające na walidację danych pomiarowych dla węzłów cieplnych.

W podpunkcie 6.2.4 rozprawy Doktorantka zaproponowała podzielenie horyzontu danych zapotrzebowania na ciepło na trzy typowe okresy: sezon letni, sezon zimowy, sezon przejściowy. W tabeli 6.5 na stronie 79 Autorka przedstawiła „Warunki podziału danych na

sezony” i określiła temperaturę graniczną, która wynosi 12°C i jest minimalną dla uruchomienia przyłączonych do sieci wymienników ciepła c.o.. W opinii recenzenta rys. 6.11 jest mało czytelny i zabrakło zaznaczenia na osi odciętych przyjętej temperatury granicznej.

W podpunkcie 6.2.5 Autorka przedstawiła koncepcję listy bazowej użytkowników sieci z uwzględnieniem faktu zmiennej w czasie liczby odbiorców. Z uwagi na zmienną liczbę odbiorców sieci Doktorantka zaproponowała wprowadzenie listy bazowej, pokrywającej minimum 80 procent wszystkich odbiorców sieci, która pozwala na operowanie stałą liczbą odbiorców. W konsekwencji tego zapotrzebowanie na ciepło zostało zdefiniowane jako suma pomiarów zużycia ciepła odbiorców z listy bazowej w danym czasie.

W podpunkcie 6.2.6 Autorka przedstawiła sposoby wyznaczenia listy bazowej odbiorców.

W podpunkcie 6.2.7 zatytułowanym „Agregacja danych oraz zapotrzebowanie na ciepło dla całej sieci” i w podpunkcie 6.2.8 zatytułowanym „Dynamiczne skalowanie brakujących pomiarów” Doktorantka przeanalizowała dwie metody uzupełnienia brakujących danych pomiarowych dla listy bazowej odbiorców ciepła. Pierwsza z nich wykorzystująca prognozy zużycia ciepła indywidualne od każdego odbiorcy jest w ocenie Doktorantki nieakceptowalna z punktu widzenia złożoności i czasu niezbędnego na wykonanie stosownych obliczeń. Druga metoda polega na wyznaczeniu współczynnika przeskalowania odpowiadającego szacowanemu procentowi zapotrzebowania na ciepło. Metoda ta w ocenie Doktorantki jest korzystniejsza, może być wykorzystana w przypadku awarii sieci jak również daje możliwość uwzględnienia odbiorców, którzy jeszcze nie zostały wyposażeni w system telemetrii sieci. W komentarzach Doktorantka przedstawiła merytoryczne uzasadnienie wykorzystania metody dynamicznego skalowania brakujących pomiarów zapotrzebowania na ciepło w sieci. Należy zwrócić uwagę, że we wzorze 6.5 symbole występujące w równaniu i w ich opisie nie są tożsame. Zwiększona czcionka na rys 6.14 str.85 poprawiłaby jego czytelność.

Podpunkt 6.2.9 zawiera informacje o sposobach transformacji surowych danych wejściowych kalendarycznych i pogodowych do postaci, która może być bezpośrednio wykorzystana przez algorytmy uczenia maszynowego. Doktorantka wskazuje, że dodatkowe cechy takie jak zmienne kalendaryczne, cechy pogodowe i dane przesunięte w czasie uwzględniane są narzędziem do poprawy modelu prognostycznego. W opinii recenzenta brakuje uzasadnienia wyznaczenia cech kalendarycznych zgodnie (6.6), to wymaga dokładnego wyjaśnienia na etapie obrony pracy doktorskiej. Zabrakło tu również prawidłowej numeracji formuł obliczeniowych: na stronie 87 została zamieszczona formuła (6.6), a potem (6.8).

W podpunkcie 6.2.10 zatytułowanym „Analiza autokorelacji zapotrzebowania na ciepło” Doktorantka zdefiniowała pojęcie „autokorelacja” w tym wskazała, że zmienna zapotrzebowania na ciepło dla WSC została przebadana przy wykorzystaniu współczynnika korelacji Pearsona. Wartości korelacji zostały przedstawione na rys. 6.17. jednak Autorka pomija dyskusję na temat charakteru zależności graficznej. W opinii recenzenta ten wykres wymaga dokładnego wyjaśnienia na etapie obrony pracy doktorskiej.

W podpunkcie 6.2.11 Autorka zaproponowała podzielenie zestawu dostępnych danych do trenowania modeli prognostycznych na zbiór treningowy z granicznym krokiem czasowym od 01.06.2015 do 31.05 2017 (2 lata) i zbiór testowy obejmujący dane dla okresu od 01.06.2017 do 01.05.2018 (1 rok).

Podpunkt 6.2.12 stanowi główną część pracy. W podpunkcie 6.2.12 Autorka przedstawiła metodologię tworzenia modeli prognostycznych i dokonała wyboru modelu do implementacji

w systemie. Na podstawie kryteriów wyboru najlepszego modelu oraz po przetestowaniu 11 modeli prognostycznych Autorka skupia się na dwóch modelach prognostycznych tj modelu sztucznej sieci neuronowej (SSN) i regresji grzbietowej (model RR). Do oceny wydajności każdego z modeli zastosowano dwie metryki: średni błąd absolutny w czasie (MAE) i średni absolutny błąd procentowy w czasie (MAPE). Otrzymane wyniki dokładności prognoz dla całej sieci z wykorzystaniem modelu regresji grzbietowej (model RR) zostały przedstawione w tab. 6.9-6.12. Wyniki prognoz z wykorzystaniem modelu sztucznej sieci neuronowej (SSN) Autorka przedstawiła w tab. 6.14-6.17. Na str. 98 Autorka napisała, że „Wyniki dokładności prognoz dla sezonu przejściowego z wykorzystaniem modelu letniego i zimowego z autoregresją przedstawiono w tabeli 6.9, natomiast z wykorzystaniem modeli bez autoregresji w tabeli 6.12”. Niestety zabrakło wnikliwej analizy uzyskanych wyników. Doktorantka ograniczyła się jedynie do omówienia zaobserwowanych wyników prognoz zapotrzebowania na ciepło z wykorzystaniem modelu sztucznej sieci neuronowej (SSN). Należałoby to uzupełnić na etapie obrony.

Podpunkt 6.2.13 rozprawy poświęcony wyznaczeniu przedziałów ufności dla modelu całej sieci. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorantka stwierdziła, że wczesne otrzymane wyniki błędów prognoz nie reprezentują rozkładu normalnego dla żadnego z analizowanych sezonów. Doktorantka proponuje wyznaczenie przedziałów ufności modelu na poziomie 90 proc. dla całej sieci na podstawie wartości kwantyli dla błędów prognoz ze zbioru testowego. Wyniki dla modelu sztucznej sieci neuronowej (SSN) zostały przedstawione w tabelach 6.18-6.19. W ocenie recenzenta zabrakło jednak wnikliwej analizy uzyskanych wyników.

Podpunkt 6.2.14 zawiera wyniki dokładności prognoz dla obszarów sieci. Otrzymane wyniki zostały opracowane z wykorzystaniem modelu autoregresyjnej regresji grzbietowej (model RR) dla sezonu zimowego i letniego. Dla sezonu przejściowego Autorka zastosowała model rozmyty (FUZZU). Ogólne wyniki prognoz modeli dla obszarów sieci zostały przedstawione w tab. 6.21. Wyniki prognoz zapotrzebowania na ciepło dla każdego obszaru sieci z podziałem na sezony Autorka przedstawiła w tab. 6.22. Niestety, również i w tym przypadku, Doktorantka ograniczyła się jedynie do podania wyników bez ich analizy i porównania z danymi literaturowymi, a częściowe wyjaśnienie zaobserwowanych zależności zostały zamieszczone dopiero w „Podsumowaniu”.

W rozdziale 7 „Wyniki wdrożenia w systemie SWD” Doktorantka przedstawiła wyniki zaimplementowania do systemu wspomagania decyzji kombinacji modelu sztucznej sieci neuronowej (SSN) z autoregresyjnym wejściem, wykorzystywanej dla pierwszych 24 godzin horyzontu predykcji i sztucznej sieci neuronowej (SSN) bez autoregresyjnego wejścia zastosowany dla kolejnych godzin do prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej. Stworzony system generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło potwierdza dokładność prognozy, która przy porównywaniu z danymi zbioru testowego współczynnika MAPE (średni absolutny błąd procentowy w czasie) wynosi: poniżej 4 proc. dla sezonu zimowego, poniżej 8,5 proc. dla sezonu przejściowego i poniżej 7,65 proc. dla sezonu letniego. Wyniki te potwierdzają skuteczność przedstawionego przez Autorkę rozwiązania. Na stronie 136 brak jest opisu osi rzędnych na rys.7.11.

Część badawczą recenzowanej rozprawy kończy **Rozdział 8** „Podsumowanie”, w którym podano najważniejsze wyniki i informacje zamieszczone w poszczególnych punktach niniejszej pracy. Biorąc pod uwagę ogromny materiał doświadczalny zebrany w ramach niniejszej rozprawy oraz uzyskane wyniki obliczeń zdecydowanie korzystniejsze byłoby kompleksowe omówienie wyników zakończone wnioskami, ze wskazaniem dokładności prognoz danych testowych, treningowych oraz wdrożeniowych.

Pracę doktorską kończy **Dodatek A** w którym przedstawiono wkład osób trzecich w rozwój proponowanego systemu prognostycznego oraz **Bibliografia**, obejmująca 80 pozycji.

Uwagi krytyczne

Wnikliwa lektura recenzowanej rozprawy prowadzi do kilku zasadniczych spostrzeżeń i uwag. Uwagi redakcyjne zostały przedstawione powyżej, natomiast pozostałe odnoszą się głównie do strony merytorycznej, a jako przykłady można podać:

- W podpunkcie 1.1 „Cel i zakres pracy” sformułowanie celu nie wynika z głębokiej analizy problemu. Nie jest jasne, jakie wady mają istniejące rozwiązania i jak Autorka zamierza je wyeliminować. Być może wskazane byłoby zastosowanie jednego z istniejących modeli prognostycznych lub kombinacji kilku modeli.
- Opracowując model prognostyczny należy przede wszystkim przeanalizować sieć ciepłowniczą pod kątem jej dalszej modyfikacji, ocenić możliwość pozyskania ciepła ze źródeł niskotemperaturowych, a także przeanalizować możliwość dostosowania sieci lub jej części do inteligentnego systemu energetycznego. Wszystko to należało przewidzieć w modelach prognostycznych, a odpowiedni opis przedstawić w pracy.
- Doktorantka nie dokonała pogłębionej analizy istniejących rozwiązań w zakresie prognozowania zużycia ciepła. Autorka cytuje kilka prac, które nie zostały omówione ani przeanalizowane. Przykładem może być praca naukowa [65]. Trudno zrozumieć, na jakiej podstawie Doktorantka dostrzega wady rozwiązania przedstawionego w niniejszej pracy. W artykule omówiono ewolucję zasad i polityk szwedzkich rynków energii wraz z opracowaniem nieliniowej autoregresyjnej sieci neuronowej. Model zawiera trzynaście parametrów wejściowych, w tym kalendaryczne, pogodowe, energetyczne i parametry zachowania odbiorców. Wyniki symulacji wykazują czteroprocentowy błąd godzinowy przez cały rok. Wydaje się, że przedstawiona w artykule metoda nie jest gorsza od metody zaproponowanej przez Doktorantkę. Przynajmniej Autorka nie przedstawiła analizy porównawczej tej metody w swojej pracy. Tę samą uwagę można odnieść do innych źródeł literaturowych cytowanych przez Autorkę. Pragnę również zauważyć, że istnieje wiele innych prac naukowych, na które Autorka nie zwróciła uwagi. Na przykład, *Fang, Tingting & Lahdelma, Risto, 2016. "Evaluation of a multiple linear regression model and SARIMA model in forecasting heat demand for district heating system," Applied Energy, Elsevier, vol. 179(C), pages 544-552*; *Radiša Jovanović, Aleksandra Sretenovic, Branislav D. Živković Ensemble of various neural networks for prediction of heating energy consumption. May 2015. Energy and Buildings 94*. Artykuł Jovanovicha wskazuje, że sieci neuronowe zapewniają wysoką dokładność, ale najlepsze wyniki można osiągnąć, za pomocą zestawu sieci neuronowych.
- Rozdział 2 „Prognozowanie szeregów czasowych” zawiera ogólnie znane informacje teoretyczne dotyczące szeregów czasowych bez wnikliwej analizy i powiązania z tematem rozprawy.
- W podpunkcie 3.3 zostały omówione następujące aspekty: sposób wyznaczania wartości zapotrzebowania na ciepło, wielkość sieci dla której wyznaczana jest prognoza, okres dla którego tworzone są modele, horyzont i krok predykcji modeli. Zabrakło informacji odnoszących się do dokładności tworzonej prognozy.
- W rozdziale 3 pkt 3.3.4. pominięto analizę istniejących rozwiązań. Autorka odwołuje się do kilku źródeł literaturowych, ale bez ich krytycznej analizy. Wniosek 1 na str.38 jest oczywisty, a metody takiego prognozowania zostały już opracowane. Na jakiej podstawie Doktorantka wysunęła wniosek 2, że „najlepszym modelem

prognostycznym często są sztuczne sieci neuronowe zarówno dla indywidualnych odbiorców ciepła, jak i całej sieci ciepłowniczej”.

- Wniosek 3 „nie ma dostępnych badań dla dużych sieci ciepłowniczych, gdzie zapotrzebowanie na ciepło wyznaczone jest z wykorzystaniem pomiarów indywidualnie dla każdego węzła cieplnego” - co Autorka uważa za małe lub duże sieci i dlaczego? Czy duże sieci nie składają się z małych?
- Należy zwrócić uwagę na styl pisanie pracy. Autorka zasadniczo prezentuje aktualny stan wiedzy ale bez własnej krytycznej analizy istniejących rozwiązań i przedstawienia własnych propozycji rozwiązania danego problemu.
- Rozdział 5 „Warszawska Sieć Ciepłownicza” zawiera jedną stronę tekstu! Dlaczego Autorka zdecydowała się wyodrębnić informacje zawierające jedną stronę jako osobną część rozprawy? Wskazane byłoby zamieszczenie szczegółowego opisu warszawskiej sieci ciepłowniczej wraz z analizą jej cech, danych technicznych, perspektyw rozwoju oraz obecnych metod prognozowania zużycia energii.
- Rozdział 6.2.12 "Wyznaczenie najlepszego modelu dla całej sieci". Autorka podaje listę testowanych modeli i mówi, że tylko dwa modele SSN i regresja grzbietowa dają najwyższą dokładność. Jednak nie przedstawiono żadnych informacji ani analiz dla uzasadnienia tego twierdzenia.
- Na wykresach rys. 6.24, 6.28 itd., prezentowane są dane, których błąd sięga 15-27%. Należy to wyjaśnić, zwłaszcza, że Autorka twierdzi, że błąd metody nie przekracza 4%.
- W podpunkcie 7.5 na str. 138 "Ogólne wnioski z wdrożenia" pierwszy wniosek nie jest dobrze sformułowany: "stworzony model prognostyczny dla zadanego horyzontu predykcji jest w stanie generować prognozy zapotrzebowania na ciepło dla warszawskiej sieci ciepłowniczej". Czy to oznacza, że dowolna metoda prognozowania może umożliwić prognozowanie zapotrzebowanie na ciepło dla warszawskiej sieci ciepłowniczej? Nie wynika z tego wniosku, że zaproponowana metodologia była czymś lepszym i że należało ją rozwinąć.

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej

Warunki eksploatacji miejskich sieci ciepłowniczych muszą sprostać wielu wyzwaniom, w tym restrykcyjnym wymaganiom UE, dotyczącym polityki zrównoważonego rozwoju, ograniczenia emisji zanieczyszczeń, zmniejszenia zużycia energii oraz poprawy planowania i eksploatacji systemu ciepłowniczego. Wśród licznych metod stosowanych dla poprawy efektywności energetycznej sieci ciepłowniczej istotne znaczenie ma prognozowanie zapotrzebowanie na ciepło za pomocą systemów pozwalających na bieżące generowanie prognozy zapotrzebowania na ciepło. W szczególności z wykorzystaniem technik modelowania maszynowego pozwoli na precyzyjne prognozowanie potrzeb konsumentów i optymalizację pracy sieci. W tym kontekście podjęte w recenzowanej rozprawie badania dotyczące opracowania i wdrożenia systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG) są aktualne i ważne zarówno pod względem naukowym jak i aplikacyjnym i wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Pomimo uwag krytycznych przedstawionych powyżej, które należy raczej traktować jako głos w dyskusji, uważam, że recenzowana praca wnosi istotne nowe wartości naukowe i użyteczne.

Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki zaliczam:



- opracowanie algorytmów modeli prognostycznych i ich algorytmów dla funkcjonowania systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG),
- stworzenie modelu prognostycznego dla całej sieci i jej zdefiniowanych obszarów,
- wykazanie, że możliwe jest uzyskanie precyzyjnych prognoz dla każdego z analizowanych sezonów,
- wysoką jakość prezentowanych modele prognostycznych, co pozwoliło na ich wdrożenie systemu prognozowania w Systemie Wsparcia Decyzji dla warszawskiej sieci ciepłowniczej, pozwalający na optymalizacja prace sieci ciepłowniczej.

Biorąc pod uwagę złożoność oraz zakres wykonanych prac należy docenić pracowitość i zaangażowanie Doktorantki w realizację badań. Stosowanie licznych metod dla tworzenia modele prognostycznych i procedur analitycznych świadczy o dobrym przygotowaniu do realizacji badań dotyczących prognozowania zapotrzebowania na ciepło. Doktorantka wykazała się znajomością literatury dotyczącej tematyki pracy. Uwagi krytyczne przedstawione w pracy dotyczą poprawności i prawidłowości prezentacji wyników i nie zmienia to faktu, że badania zostały przeprowadzone samodzielnie, prawidłowo i rzetelnie. Należy podkreślić, że Doktorantka jest współautorem kilku publikacji, co świadczy o dojrzałości naukowej.

1. *Teresa Kurek, Artur Bielecki, Konrad Świrski, Konrad Wojdan, Michał Guzek, Jakub Białek, Rafał Brzozowski, Rafał Serafin Heat demand forecasting algorithm for a Warsaw district heating network. Energy Volume 217, 15 February 2021, 119347*
2. *Teresa Kurek, Konrad Wojdan, Daniel Nabagło, Konrad Świrski Detection of Malfunctions and Abnormal Working Conditions of a Coal Mill. Thermal Power Plants-New Trends and Recent Developments. IntechOpen. 2018/5/2*

Wniosek końcowy

W podsumowaniu niniejszej recenzji stwierdzam, że treść rozprawy jest zgodna z tytułem, a cel pracy został zrealizowany. Podjęta w rozprawie tematyka badań dotycząca opracowania systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG) dla warszawskiej sieci ciepłowniczej (WSC) wpisuje się w aktualny nurt badań poprawy planowania i eksploatacji systemu ciepłowniczego. Pomimo uwag krytycznych przedstawione wyniki badań mają znaczenie naukowe i użytkowe. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań i znajomością nowoczesnych metod badawczych. W mojej opinii, rozprawa doktorska autorstwa Pani mgr inż. Teresy Kurek pt.: „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”, odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14.03.2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki art.20 ust. 5a pkt 2 wg Dz. U. Nr 65, poz. 595, wraz z późniejszymi zmianami, oraz ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. , oraz ustawy z dnia 3 lipca 2018 r Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce art. 179. 1. (Dz.U.2018, poz. 1669 z póź.zm.) i wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

