



Bogdan NOWAK¹, Grzegorz BARTNICKI²

Prognozowanie przedziału czasowego z maksymalnym w ciągu doby zużyciem gazu przez kotłownię

Streszczenie: Działania mające na celu poprawę efektywności energetycznej systemów zaopatrzenia w ciepło wymagają korzystania z coraz bardziej złożonych metod. Podstawowe sposoby zmniejszenia zużycia ciepła poprzez stosowanie lepszej izolacji cieplnej mają coraz bardziej ograniczone możliwości i wymagają stosunkowo dużych nakładów finansowych. Dobre efekty mogą być osiągnięte przez coraz lepsze dopasowanie rozwiązań technicznych, sposobów regulacji czy zasad eksploatacji źródła ciepła do warunków konkretnego obiektu zasilanego w ciepło. Wymaga to jednak zarówno badań identyfikujących skuteczność takich metod, jak i narzędzi służących do opisu wybranych elementów systemu czy jego całości. Artykuł przedstawia wyniki badań przeprowadzonych dla kotłowni gazowej zasilającej w ciepło grupę budynków mieszkalnych. Celem było zbudowanie modelu, który prognozowałby dla konkretnego dnia przedział czasowy, w którym występuje maksymalne zużycie gazu. Dysponując pomiarami zużycia gazu w kolejnych godzinach doby, zdecydowano się zbudować model prognostyczny wyznaczający tę część doby, w której takie maksimum wystąpi. W opracowanym modelu zdecydowano się zastosować procedurę lasów losowych (*random forest*). Do utworzenia modelu zastosowano pakiet mlr (*Kassambara*), w którym przeprowadzono również strojenie hiperparametrów modelu na bazie danych historycznych. W oparciu o odrębne dane dla innego okresu działania kotłowni przedstawiono wyniki oceny jego jakości. Uzyskano skuteczność niemal 44%. Strojenie modelu wpłynęło na poprawę jego zdolności predykcyjnych.

Słowa kluczowe: zużycie gazu, model prognostyczny, random forest

¹ Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska; ORCID iD: 0000-0002-9764-5555; e-mail: bogdan.nowak@pwr.edu.pl

² Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska; ORCID iD: 0000-0002-4482-6950 ; e-mail: grzegorz.bartnicki@pwr.edu.pl



Forecasting the time interval of the day with the maximum boilers gas consumption

Abstract: The heat supply systems energy efficiency improvement requires the use of increasingly complex methods. The basic ways to reduce heat consumption is by using better thermal insulation, although they have more and more limited possibilities and need relatively large financial outlays. Good effects can be achieved by the better heat source adaptation to the conditions of a specific facility supplied with heat. However, this requires research that identifies the effectiveness of such solutions as well as the tools used to describe selected elements of the system or its entirety. The article presents the results of tests carried out for a gas boiler room supplying heat to a group of residential buildings. The goal was to build a model that would forecast the day range in which the maximum gas consumption occurs for a given day. Having measurements of gas consumption in subsequent hours of the day, it was decided to build a forecasting model determining the part of the day in which such a maximum would occur. To create the model the random forest procedure was used along with the mlr (Kassambara) package. The model's hyperparameters were tuned based on historical data. Based on data for another period of boiler room operation, the results of the model's quality assessment were presented. Close to 44% efficiency was achieved. Tuning the model improved its predictive ability.

Keywords: gas consumption, prognostic model, random forest

Wprowadzenie

Zaopatrzenie w ciepło budownictwa mieszkaniowego w warunkach klimatu Polski stanowi istotny element zużycia energii i nośników energii pierwotnej. Podejmowane w ostatnich kilkunastu latach działania techniczne i organizacyjne w celu poprawy efektywności energetycznej przynoszą już widoczne efekty. Jak pokazują to jednak badania prowadzone dla podobnych co Polska warunków pogodowych przez różne ośrodki naukowe na świecie, podstawowe sposoby redukowania zużycia ciepła poprzez stosowanie lepszej izolacji cieplnej czy wymianę stolarki okiennej mają coraz bardziej ograniczone możliwości. Wymagają przy tym stosunkowo dużych nakładów finansowych, tak że prosty okres zwrotu inwestycji wynosić może kilkanaście a nawet kilkadziesiąt lat. Autorzy badań przeprowadzonych w Niemczech (Galvin i Sunikka-Blank 2014) zwrócili uwagę, że zmniejszenie zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym obserwowane w tym kraju w pierwszej dekadzie XXI w. pochodzi tylko w około 20% z termomodernizacji istniejących budynków (dodatkowa izolacja i wymiana okien). Aż 31% może być efektem wymiany źródła ciepła na nowe (wymiana kotłów lub zupełna zmiana nośnika energii pierwotnej), a 1% skutkiem zastąpienia starych budynków nowymi. Zdaniem tych autorów aż około 45–50% redukcji zużycia energii cieplnej należy uzasadniać innymi działaniami, które trudno było im jednak zidentyfikować. W części może to być też efekt wzrostu tzw. ubóstwa energetycznego (brak wystarczających środków finansowych u mieszkańców na pokrycie kosztów energii, skutkujące brakiem korzystania z niej w dotychczasowej ilości, nawet w tak bogatym kraju jak Niemcy), zmian demograficznych czy stylu życia. Trzeba jednak mieć na uwadze też różne inne działania prowadzące do bardziej efektywnego wykorzystania istniejących systemów zaopatrzenia w ciepło. Należy się zgodzić z autorami tego artykułu, że konieczne są dalsze badania, które wyjaśniłyby przyczyny takiego spadku zużycia energii w skali całego kraju. Ważne jest jednak podejście do tego tematu badawczego również w mniejszej skali, nie tylko regionalnej (województwo) czy lokalnej (gminy), ale również pojedynczych źródeł

ciepła (np. Nowak i in. 2018; Bartnicki i Nowak 2019). Niezbędne są więc intensywne poszukiwania skutecznych sposobów poprawiania efektywności energetycznej istniejących systemów zaopatrzenia w ciepło. Nawet przy dynamicznie rozwijającym się nowym budownictwie, zasadniczy udział w zużyciu energii i ciepła mają nadal istniejące budynki, a ich całkowita wymiana na nowe obiekty jest niemożliwa zarówno w krótkiej, jak i długookresowej perspektywie. Doświadczenie pokazuje, że również w nowym budownictwie są duże rezerwy dla ograniczenia zużycia energii pierwotnej, właśnie poprzez wyregulowanie instalacji i dostosowanie warunków pracy do specyfiki odbioru ciepła w danym systemie. Warunki projektowe tej specyfiki niestety nie uwzględniają i opierają się tylko na ogólnych standardach i założeniach, zapewniających przede wszystkim gwarancję dostawy ciepła w odpowiedniej ilości.

Do najprostszych procedur prowadzących do obniżenia mocy zamówionej zaliczyć można okresową akumulację ciepła (zazwyczaj w przeciągu doby lub kilkugodzinnego okresu zwiększonego poboru ciepła) oraz zarządzanie popytem. Każdy z tych sposobów może mieć wiele technicznych rozwiązań. Może to być np. akumulacja ciepła po stronie nośnika ciepła, po stronie instalacyjnej albo już po stronie ogrzewanego obiektu. Akumulację ciepła można realizować poprzez zastosowanie zasobników lub poprzez okresowe podwyższanie temperatury nośnika ciepła. W odróżnieniu od obiektów przemysłowych zarządzanie popytem w budownictwie mieszkaniowym, w obecnej sytuacji formalnoprawnej jest praktycznie bardzo utrudnione lub wręcz niemożliwe do realizacji. Można więc co najwyżej o nim myśleć w budownictwie indywidualnym, godząc się na ograniczenie komfortu korzystania z energii cieplnej. W przypadku budownictwa wielorodzinnego pozostaje więc do wykorzystania przede wszystkim możliwość akumulacji ciepła. W przypadku budowy kotłowni gazowych jest ona powszechnie wykorzystywana w układach przygotowania c.w.u.

Dobre efekty mogą być osiągnięte też np. przez dopasowanie rozwiązań technicznych, sposobów regulacji czy zasad eksploatacji źródła ciepła do warunków konkretnego obiektu zasilanego w ciepło oraz warunków i stylu życia konkretnej grupy osób, która w nim mieszka. Takie sposoby modernizacji wymagają przy tym mniejszych kosztów, a mogą uzupełnić tradycyjne sposoby termomodernizacji systemów zaopatrzenia w ciepło. Wymagają jednak zarówno badań identyfikujących ich skuteczność, jak i narzędzi służących do opisu wybranych elementów systemu zaopatrzenia w ciepło czy wielkości je charakteryzujących. Dobry opis rzeczywistego zjawiska za pomocą modelu ma duże znaczenie, gdyż pozwala rozumieć i przewidywać proces, jak i go optymalizować.

1. Metody badawcze

Dysponując bazą danych pomiarowych zużycia gazu w kotłowniach zasilających w ciepło grupy budynków mieszkalnych (w tab. 1 zestawiono podstawowe statystyki dla pomiarów godzinowych z 2018 r.), skupiono się na analizie godzin, w których występuje maksymalne zużycie paliwa gazowego w skali doby. Identyfikacja takich stanów może być istotna z punktu widzenia systemu zaopatrzenia w gaz, szczególnie gdy kotłownia (lub grupa kotłowni) niekorzystnie będzie wpływać na ciśnienie w sieci gazowej. Ważne znaczenie

TABELA 1. Podstawowe statystyki dla pomiarów godzinowych (2018)

TABLE 1. Basic statistics for hourly measurements (2018)

Miesiąc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Średnia [m ³]	18,30	22,30	18,90	7,11	4,67	4,07	3,77	3,38	4,24	8,92	14,40	17,80
Mediana [m ³]	18,10	22,20	18,70	6,60	5,10	4,72	4,64	4,06	5,03	8,86	14,50	17,40
Odchylenie standardowe [m ³]	8,77	6,58	7,20	4,96	3,10	2,96	2,81	2,72	2,92	4,88	6,42	5,06
Wariancja	33,30	43,30	51,80	24,60	9,60	8,74	7,91	7,38	8,53	23,80	41,20	25,60
Wartość maksymalna [m ³]	40,40	49,50	55,10	28,50	15,20	12,10	10,90	11,80	13,20	27,90	29,60	35,40

TABELA 2. Wartości współczynnika korelacji godzinowego zużycia gazu i temperatury zewnętrznej dla kotłowni A5 dla kolejnych miesięcy roku

TABLE 2. Values of the correlation coefficient of hourly gas consumption and external temperature for the A5 boiler room for subsequent months of the year

Rok	Miesiąc											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2017	-0,508	-0,62	b.d.	b.d.	b.d.	0,003	0,014	-0,018	-0,162	-0,405	-0,408	-0,479
2018	-0,503	-0,62	-0,706	-0,387	0,016	-0,012	0,010	-0,018	-0,073	-0,454	-0,722	-0,505

może mieć jednak przede wszystkim z punktu widzenia samej kotłowni i możliwości szukania skutecznych metod zwiększenia akumulacji ciepła oraz redukcji wahań zużycia nośnika energii pierwotnej, jakim jest paliwo gazowe. Z maksymalnym godzinowym zużyciem gazu powiązana jest również moc zamawiana u dostawcy paliwa (moc umowna), choć mierzona i rozliczana jest ona jednak w dłuższych odcinkach czasu niż godzina. Na podstawie zebranych pomiarów przeprowadzono najpierw analizę godzin doby, w których występują takie maksima. Grupują się one wokół konkretnej pory dnia, jednak zarówno może to być okres poranny (zasadniczo godziny 4–9), jak i pora wieczorna (zasadniczo godziny 17–23). Dysponując analizą maksymalnego godzinowego zużycia gazu oraz godzin, w których ono występuje, zdecydowano się zbudować model prognostyczny wyznaczający ten fragment doby, w którym takie maksimum wystąpi. W opracowanym modelu zdecydowano się zastosować procedurę lasów losowych (*random forest*). Do utworzenia modelu zastosowano pakiet mlr, w którym również przeprowadzono strojenie hiperparametrów modelu na bazie danych historycznych. Zgromadzone dane zostały poddane analizie w środowisku R z wykorzystaniem odpowiednich pakietów (m.in. *dplyr*, *tidyr*), zaś wizualizację wyników zrealizowano w oparciu o pakiet *ggplot2*.

W oparciu o dane dla kolejnego okresu pracy kotłowni zweryfikowano tak zbudowany model i opisano wyniki oceny jego jakości. Baza danych pomiarowych wykorzystana w badaniach dotyczy kotłowni gazowej (oznaczonej roboczo jako A5) zlokalizowanej we Wrocławiu. Zasila ona w ciepło grupę trzech budynków mieszkalnych. Kotły wyposażone są w palniki atmosferyczne, a układ hydrauliczny ma zwrotnicę hydrauliczną rozdzielającą obiegi odbioru ciepła i obiegi kotłów. Jako układ przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) zainstalowane są dwa podgrzewacze pojemnościowe o łącznej pojemności 1500 dm³.

Zużycie gazu obserwowane jest za pomocą systemu telemetrii zainstalowanego przez operatora systemu przesyłowego (PSG), a dostęp do nich realizowany jest przez internet. Wartości mierzone w metrach sześciennych rejestrowane są w cyklu godzinowym. Przykładowe godzinowe zużycie przedstawiają rysunek 2 (maksymalne w dobie) i rysunek 3 (w kolejnych godzinach).

2. Wpływ temperatury zewnętrznej na zużycie gazu

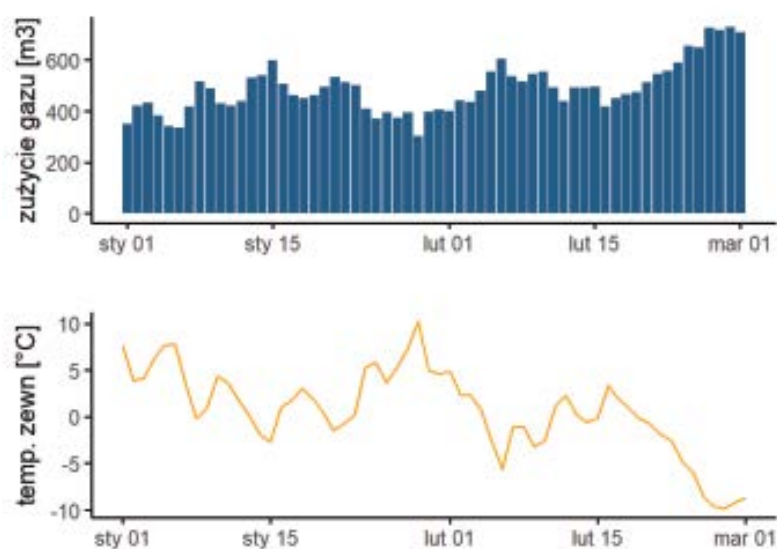
Z punktu widzenia przydatności wyników badań duże znaczenie ma identyfikacja czynników, które mogą wpływać na przebieg analizowanego zjawiska. O ile związek zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania pomieszczeń z temperaturą zewnętrzną jest oczywisty i znajduje swoje odzwierciedlenie w zapisach prawnych oraz normatywach, jak i wynikach wielu badań, to już dużo trudniej ocenić ten wpływ na chwilowe warunki pracy urządzeń kotłowni czy całkowite zużycie ciepła. Kotłownia dwufunkcyjna realizuje dostawę ciepła również na potrzeby przygotowania c.w.u. Przy coraz większym udziale c.w.u. w całkowitym bilansie energii (w efekcie coraz lepszej ochrony cieplnej budynków) zależność pomiędzy zużyciem paliwa a temperaturą zewnętrzną nie jest już tak oczywista. Istnieją badania, które wskazują na związek niektórych wielkości wpływających na zużycie ciepła do przygotowania c.w.u.

od temperatury zewnętrznej (Chmielewska 2017), to jednak nie jest to prosta i jednoznaczna zależność. Należy jeszcze uwzględnić dodatkowe składowe, które rozróżniają zużycie ciepła (zwłaszcza tego mierzonego na poziomie mieszkania) i zużycie paliwa (gdzie pomiar realizowany jest w centrali grzewczej). Wystarczy wspomnieć o sprawności spalania oraz stratach ciepła w procesie dystrybucji. Straty ciepła nie zależą tylko od temperatury zewnętrznej, co od temperatury otoczenia instalacji (np. temperatury powietrza w piwnicach lub halach garażowych), która tylko w pewnym stopniu zależy od temperatury zewnętrznej.

Układ przygotowania c.w.u. w kotłowni gazowej bazuje najczęściej na rozwiązaniu z co najmniej częściową akumulacją ciepła. Tym samym pojawia się przesunięcie czasowe pomiędzy wytworzeniem ciepła i jego zużyciem. Powoduje to, że zależność pomiędzy godzinowym zużyciem gazu a temperaturą zewnętrzną ocenianą współczynnikiem korelacji Pearsona (pomiarów godzinowe) wykazuje tylko ograniczony związek (tab. 1). W okresie letnim jest on wręcz zerowy. Trzeba też pamiętać, że akumulacja ciepła może być realizowana w różnym układzie technologicznym, jak i wielkości zbiornika akumulacyjnego.

Jednym z widocznych efektów wyposażenia kotłowni w układ akumulacyjny przygotowania c.w.u. oraz wpływu zużycia c.w.u. na zużycie gazu jest to, że zużycie dobowe (w okresie zimowym) jest bardziej skorelowane z temperaturą zewnętrzną niż w cyklach godzinowych. Ilustrują to również wykresy zużycia gazu i zmienności temperatury zewnętrznej przedstawione na rysunku 1.

W cyklach miesięcznych obserwuje się zależność zużycia gazu od pór roku. W budownictwie mieszkaniowym korelacja pomiędzy zużyciem paliwa a temperaturą zewnętrzną jest ograniczona ze względu właśnie na wpływ zużycia c.w.u. (Bartnicki i Nowak 2018).



Rys. 1. Zużycie gazu w kotłowni i odpowiadająca mu w czasie temperatura zewnętrzna dla kotłowni A5 w styczniu i lutym 2018 r.

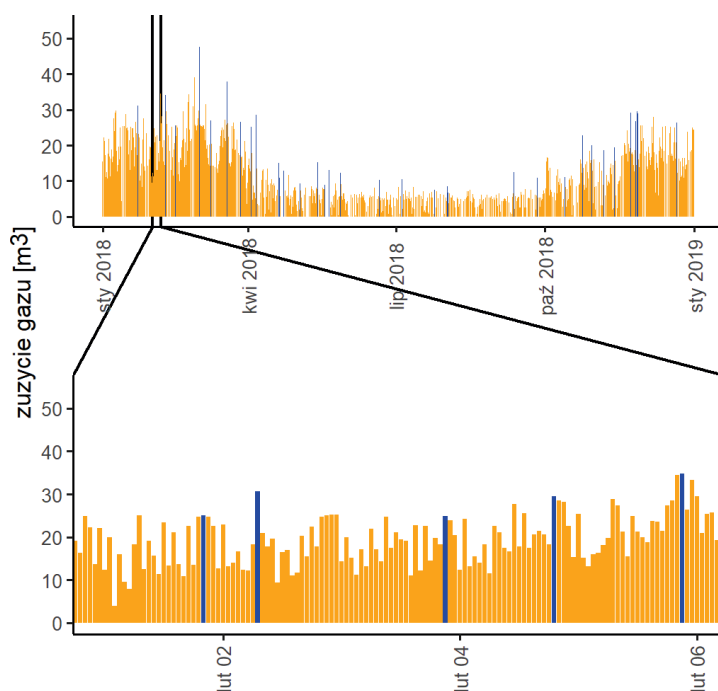
Fig. 1. Gas consumption in the boiler room A5 and the corresponding external temperature in January and February 2018

3. Maksymalne godzinowe zużycie gazu

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zmienność godzinowego zużycia gazu w analizowanej kotłowni w różnych okresach roku. W związku z przedmiotem badań skupiono się jednak nie tylko na samym przebiegu zmienności w czasie (z dyskretyzacją godzinową), co również na zużyciu godzinowym maksymalnym w dobie. Pobór paliwa w okresie letnim jest powiązany przede wszystkim z działaniem układu przygotowania c.w.u. (pojemnościowego) i w zasadzie nie ma związku z temperaturą zewnętrzną. Nieco inaczej ma się to w przypadku zużycia dobowego, co można tłumaczyć efektem agregacji.

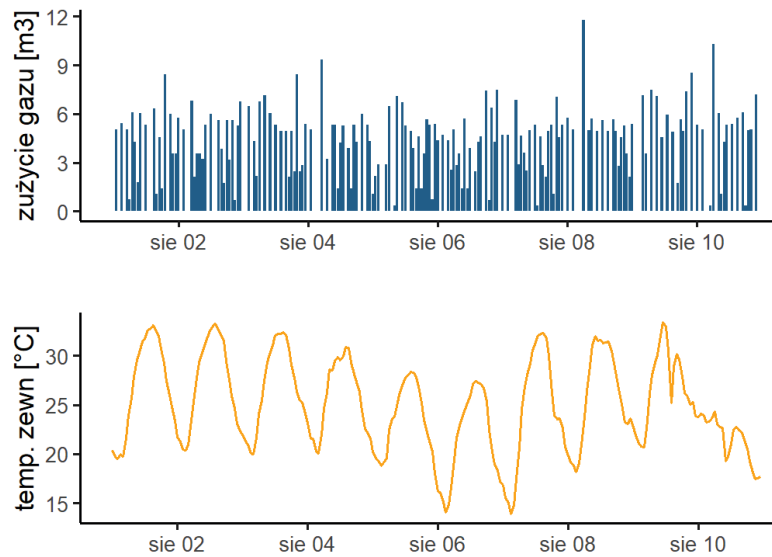
Analizując zużycie gazu w ciągu tygodnia oraz doby również można dostrzec pewne zależności i trendy. Ze względu na badanie występowania godzin o największym zużyciu paliwa (maksymalnego godzinowego zużycia gazu) na rysunkach od 3 do 6 przedstawiono identyfikację godziny doby, w której wystąpił maksymalny godzinowy pobór gazu.

Po szczegółowej analizie uzyskanych wyników stwierdzono, że występowanie maksymalnego zużycia gazu od poniedziałku do piątku w godzinach między 11 a 15 dotyczy



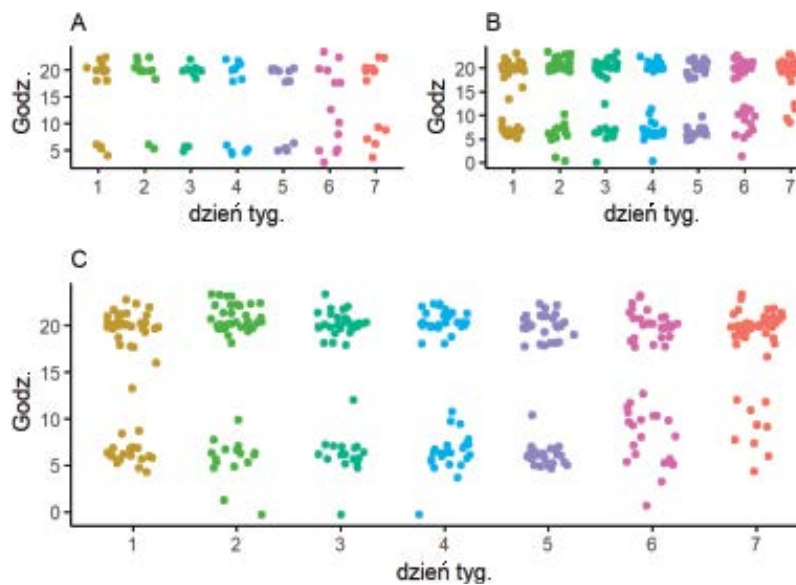
Rys. 2. Maksymalne godzinowe zużycia gazu w kotłowni A5 w 2018 r. Szczegół przedstawia przedział czasowy 1–5 lutego 2018 r., dla którego przedstawiono również godzinowe zużycie gazu. Dodatkowo zaznaczono godziny o największym zużyciu gazu w danej dobie

Fig. 2. The maximum hourly consumption of gas in the A5 boiler room in 2018. The detail shows the time interval from February 1 to 5, 2018, for which hourly gas consumption is also shown. Additionally, the hours with the highest gas consumption in a given day have been marked



Rys. 3. Godzinowe zużycie gazu w kotłowni A5 w okresie 1–9 sierpnia 2018 r.

Fig. 3. Hourly gas consumption in the A5 boiler room between 1–9 August, 2018



Rys. 4. Godziny występowania maksymalnego w dobie godzinowego zużycia gazu w 2018 r., w podziale na kolejne dni tygodnia

A – dane dla okresu letniego (czerwiec–sierpień),

B – dla okresu poza sezonem grzewczym (styczeń–maj oraz wrzesień–grudzień), C – dla całego roku

Fig. 4. The hours of maximum hourly gas consumption in 2018, divided into subsequent days of the week

A – data for the summer period (June–August), B – for the period outside the heating season

(January–May and September–December), C – for the whole year

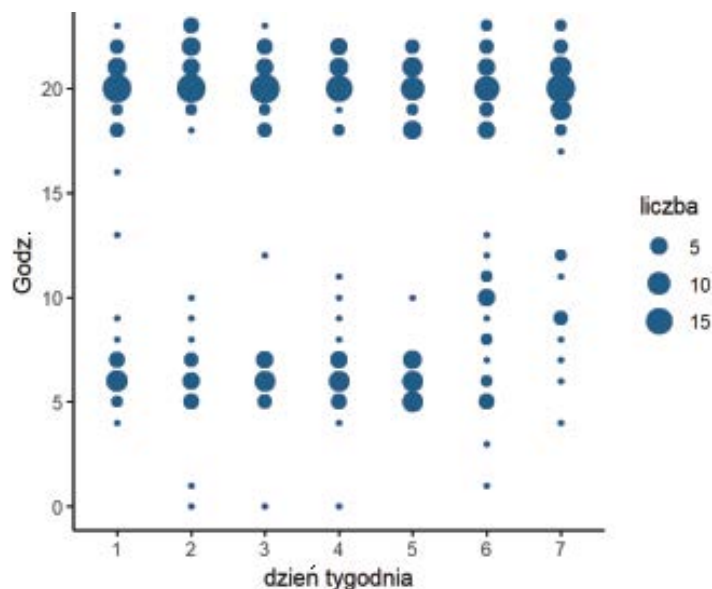
wyłącznie dni świątecznych (wolnych od pracy). W weekendy godziny o maksymalnym zużyciu gazu są za to bardziej rozproszone w ciągu doby i nie występuje już tak duże grupowanie w godzinach porannych jak w okresie od poniedziałku do piątku. Taka tendencja jest właściwa również w okresie wakacyjnym. W ciągu całego roku (rys. 4) maksymalna wartość w godzinach wieczornych najczęściej występowała o godzinie 20. Zwraca uwagę taka sama częstość występowania maksymalnego zużycia gazu w godz. 5–7 oraz wieczorny pik w poniedziałki skupiony przy godzinie 20 (częściej niż w pozostałe dni robocze).

W układzie miesięcznym (rys. 5 i 6) zauważyć można, że w okresie wakacyjnym szczyt poranny występuje we wcześniejszych godzinach.

Natomiast w czasie weekendów zimą maksymalne godzinowe zużycia nie występują we wczesnych godzinach porannych. Można to próbować tłumaczyć zarówno występowaniem ruchomych dni świątecznych, jak i dominującym wpływem na godzinowe zużycie gazu potrzeb instalacji ogrzewania, a nie tylko ciepłej wody. Jest to też efekt stosowania priorytetu ciepłej wody użytkowej.

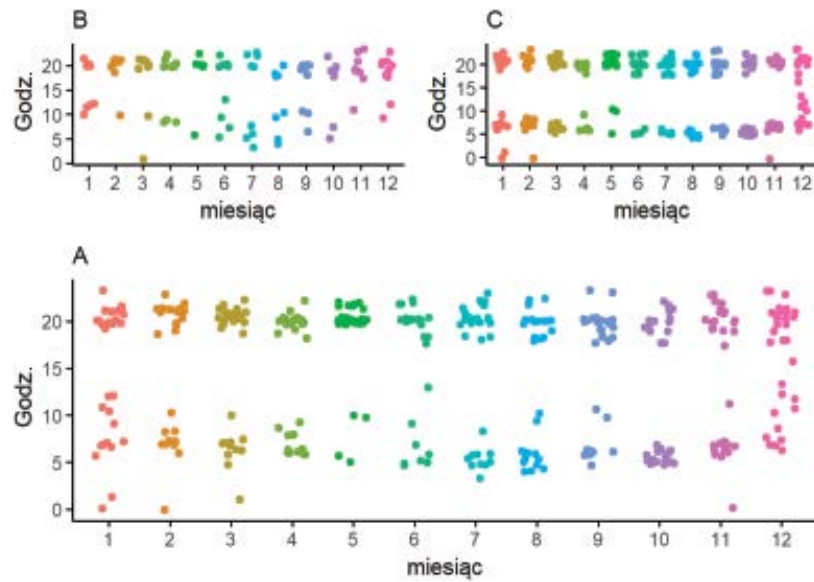
Trzy przedziały czasowe występują bardzo rzadko i zostały oznaczone tym samym kolorem dla zwiększenia czytelności

Szkolne ferie zimowe w 2018 r. przypadają na styczeń. Dni wolne od nauki szkolnej powodują zmianę organizacji dnia wielu osób. Więcej osób przebywa w mieszkaniach także w ciągu dnia (dzieci, uczniowie, ale również opiekunowie). Powoduje to, że wieczorny okres podwyższonego poboru gazu przesuwa się na późniejsze godziny (choć częściowo pozostają one w przedziale 6) oraz występowanie okresu podwyższonego poboru w przedziale 3.



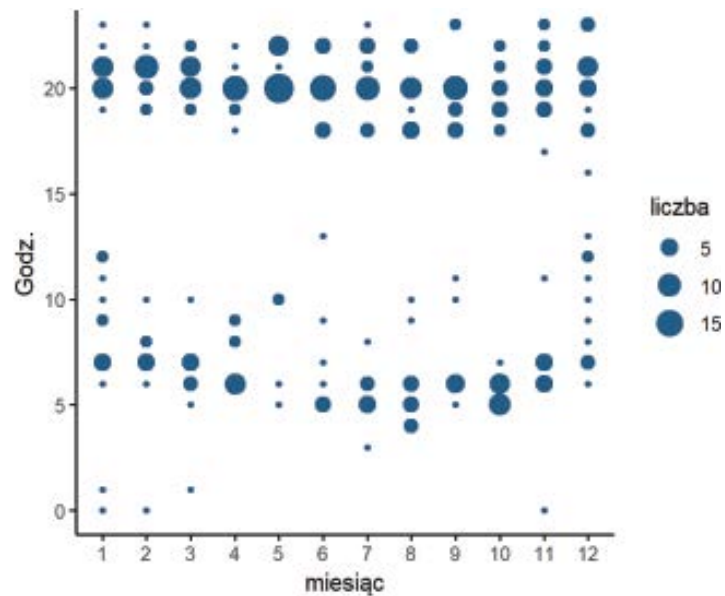
Rys. 5. Godziny występowania maksymalnego w dobie godzinowego zużycia gazu w 2018 r., w podziale na kolejne dni tygodnia

Fig. 5. The hours of maximum hourly gas consumption in 2018, broken down into subsequent days of the week



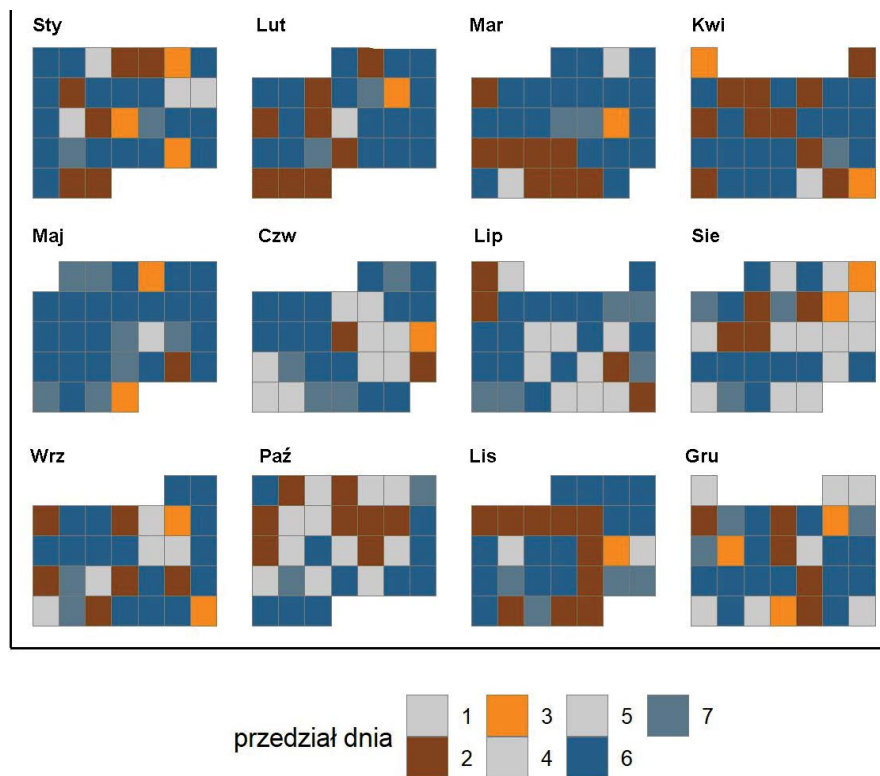
Rys. 6. Godziny występowania maksymalnego w dobie godzinowego zużycia gazu w 2018 r., w podziale na kolejne miesiące
A – dane dla weekendów, B – dla dni roboczych, C – dla całego roku

Fig. 6. The hours of maximum hourly gas consumption in 2018, divided into subsequent months
A – data for weekends, B – for working days, C – for the entire year



Rys. 7. Godziny występowania maksymalnego w dobie godzinowego zużycia gazu w 2018 r., w podziale na kolejne miesiące

Fig. 7. The hours of maximum hourly gas consumption in 2018, divided into subsequent months



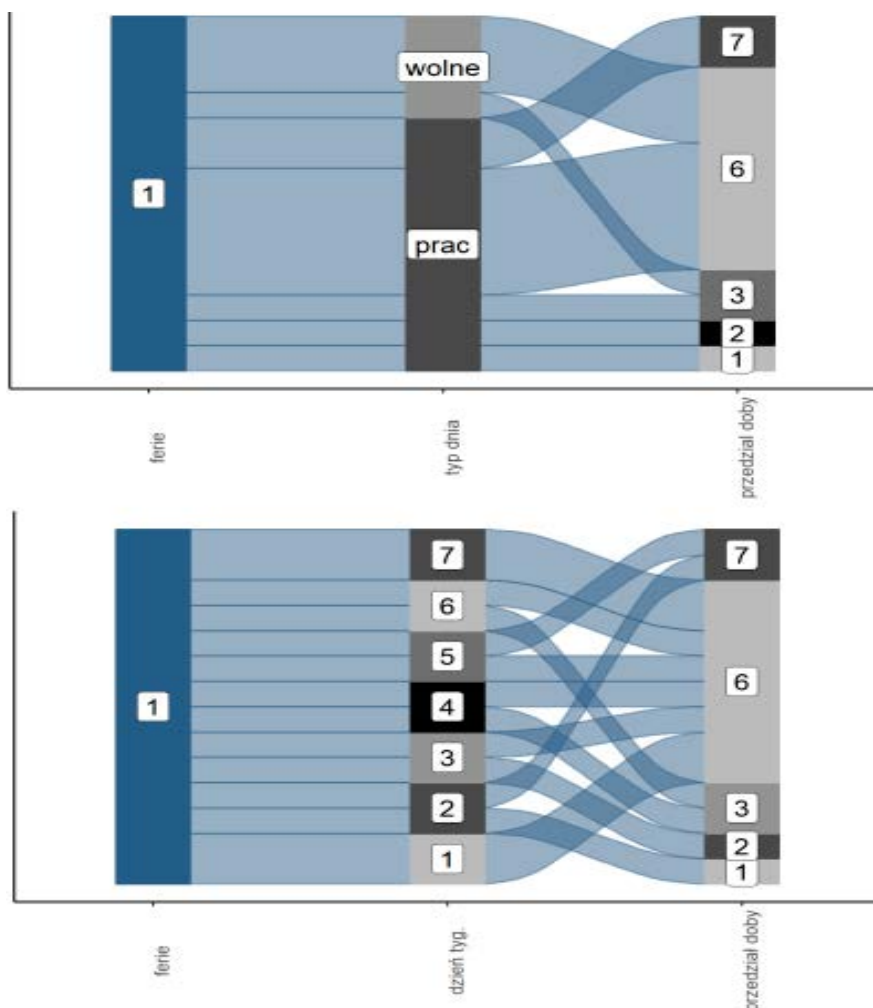
Rys. 8. Przedział dnia, w którym zarejestrowano maksymalne godzinowe zużycie gazu, w układzie kalendarzowym (2018 r., kotłownia A5). Dobę podzielono na 7 przedziałów czasowych (0–5; 6–8; 9–11; 12–14; 15–18; 19–21; 22–23)

Fig. 8. The day's rang on which the maximum hourly gas consumption was recorded, in calendar format (2018, A5 boiler room). The day was divided into seven time intervals (0–5; 6–8; 9–11; 12–14; 15–18; 19–21; 22–23)

Jak widać to na rysunku 9, w okresie ferii zimowych wszystkie zaobserwowane w poniedziałki i niedziele maksymalne godzinowe pobory gazu wystąpiły w 6 przedziale doby. W 3 przedziale doby wystąpiły one tylko w czwartki i soboty, natomiast występujące w 7 przedziale – pochodzą z wtorków i piątków.

Również przedłużone weekendy (tzw. długie weekendy) powodują, że większe poboru gazu występują w godzinach wieczornych i późnowieczornych (łącznie z przedziałem 7) – dobrze widoczne jest to dla listopada. Opisane tendencje należy wiązać głównie ze zmianą w poborze ciepłej wody użytkowej.

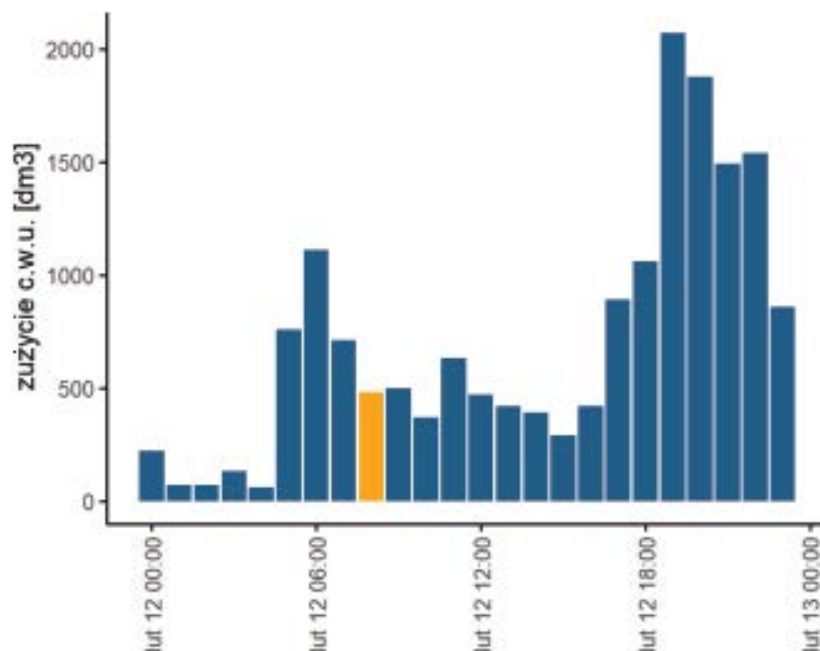
W przypadku gdy maksymalny pobór gazu przypada w godzinach przedpołudniowych (między godz. 5 a 10 rano) przeanalizowano również dobowy rozkład poboru c.w.u. Analizy wykonano dla stycznia i lutego 2018 r. (przykładowo taka analiza dla 12.02.2018 r. przedstawiona jest na rys. 10). Na rysunku 10 zaznaczono też zaobserwowane przesunięcie w czasie pomiędzy maksymalnym godzinowym poborem gazu (godzinę 8:00, w której



Rys. 9. Przepływy zmiennych ze szczególnym uwzględnieniem szkolnych ferii zimowych (2018 r., kotłownia A5)

Fig. 9. Variable flows with a particular emphasis on school winter holidays (2018, A5 boiler room)

wystąpił, wyróżniono wyróżniono odcieniem) a maksymalny poborem c.w.u. (19:00) W styczniu wystąpiło 8 dni z maksymalnym poborem gazu w tym przedziale godzin co maksymalny pobór c.w.u., zaś w lutym – 9 dni. Spośród tych 17 dni tylko jeden raz maksymalny pobór gazu wystąpił w tej samej godzinie co maksymalny pobór c.w.u. W pozostałych szesnastu dniach pobór maksymalny gazu występował w godzinie, którą można określić jako końcowy etap porannego szczytu zużycia ciepłej wody.



Rys. 10. Godzinowe pobory c.w.u. (12 lutego 2018, kotłownia A5) z oznaczoną godziną wystąpienia maksymalnego godzinowego poboru gazu

Fig. 10. Hourly consumption of hot water. (February 12, 2018, boiler room A5) with the hour of occurrence of the maximum hourly gas consumption

4. Modelowanie i predykcja

Dysponując analizą maksymalnego godzinowego zużycia gazu oraz godzin, w których ono występuje, zdecydowano się zbudować model prognostyczny wyznaczający godziny, w których takie maksimum wystąpi. Analizując zgromadzone dane oraz w oparciu znajomość zjawiska można zauważyć, że godzina o maksymalnym zużyciu gazy w danej dobie zależy od dnia tygodnia oraz miesiąca. Na etapie poprzedzających budowę modelu analiz zauważono i potwierdzono występowanie zależności (szczególnie w dni robocze) pomiędzy momentem wystąpienia maksymalnego poboru gazu w danej oraz poprzedzającej dobie. Z tego względu przy budowie modelu zdecydowano się uwzględnić dobowe zużycie gazu oraz godzinę wystąpienia poboru maksymalnego z doby poprzedzającej analizowany dzień. Wyniki pochodzące z pierwszych modeli potwierdziły konieczność uwzględnienia specyfiki wybranych dni i okresów specjalnych. W konsekwencji zostały oznaczone tzw. długie weekendy, dni poprzedzające długie weekendy oraz święta, a także ferie zimowe.

Modelowanie zużycia gazu w poszczególnych dobach lub godzinach jest klasycznym przypadkiem modelowania szeregów czasowych (m.in. Bartniki i Nowak 2018; Malska

i Wachta 2015). Zarówno w literaturze światowej, jak i krajowej opisane zostały różne metody wyznaczania maksymalnego godzinowego zużycia gazu (np. Zhao 2014; Bąkowski 2019). Mając na uwadze spojrzenie na zużycie gazu z innej perspektywy niż sama wielkość zużycia, przy budowie modelu postawiony został cel predykcji nie tyle samego maksymalnego zużycia, co wskazanie godziny, w której ono nastąpi. Uwzględniając przy tym zbiór zmiennych objaśniających (miesiąc, dzień tygodnia, ferie [tak/nie], zużycie gazu w dniu poprzednim, godzina maksymalnego poboru w dniu poprzednim, długi weekend [tak/nie]), które należy uwzględnić w modelu zdecydowano się zastosować procedurę lasów losowych, tj. *random forest* (Chen i in. 2017; Gao i in. 2009).

Lasy losowe (*random forest*, RF), podobnie jak inne modele klasyfikacyjne, przewidują/wyliczają wartość ciągłą, która jest prawdopodobieństwem przynależności danego „punktu” do klasy (grupy wyjściowej). Jest to algorytm nadzorowany. Znamy wynik, w przypadku analizy występowania maksymalnego godzinowego zużycia gazu będzie to przedział dnia/godzina, a model uczy się, znając te wyniki. Później można sprawdzać, czy model dokonał dobrej klasyfikacji. Lasy losowe buduje się w oparciu o inny, znany algorytm, jakim są drzewa decyzyjne. Podstawowa różnica jest taka, że drzewa decyzyjne działają w oparciu o wszystkie zmienne predykcyjne i to na całym zbiorze danych, a lasy losowe to budowanie wielu drzew decyzyjnych w taki sposób, że każde drzewo działa tylko na części zbioru (z wykorzystaniem wybranych zmiennych).

Problem zdefiniowany przy planowaniu badania dla analizowanej kotłowni wskazuje na celowość zastosowania modeli klasyfikacyjnych. Po dalszej analizie (technicznej) można było stwierdzić, że bardziej istotne od wskazania samej godziny jest określenie, w którym przedziale czasowym taki maksymalny pobór wystąpi. Podzielono w tym celu dobę na 7 przedziałów czasowych (0–5; 6–8; 9–11; 12–14; 15–18; 19–21; 22–23). Do utworzenia modelu zastosowano pakiet mlr, w którym również przeprowadzono strojenie hiperparametrów modelu.

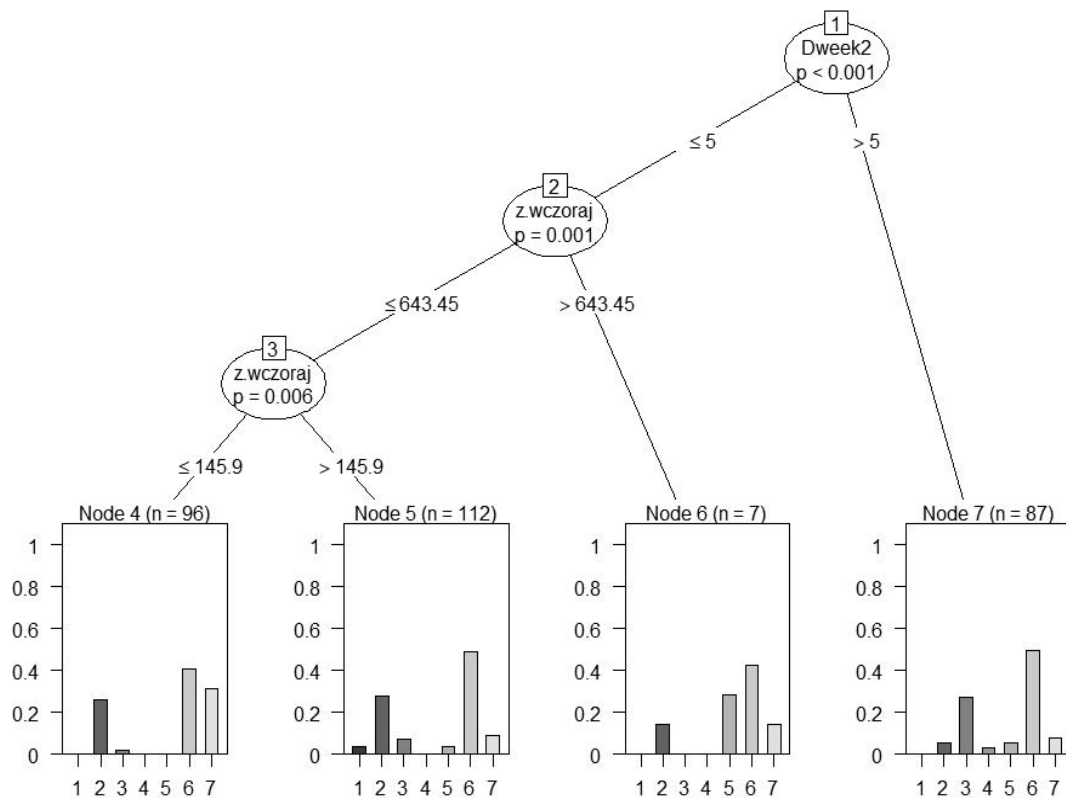
Dla modelu dla przedziałów dnia z parametrami ($n_{tree} = 500$, $m_{try} = 2$) i bez strojenia hiperparametrów wartość OOB (*out-of-bag*) wyniosła 56,95%. Dane z 2017 r. posłużyły za zbiór treningowy. Następnie wyszkolony model zastosowano do predykcji w okresie 1–31 stycznia 2018 r. Dla weryfikacji tak zbudowanego modelu dysponowano również pomiarami rzeczywistymi (które wykorzystano do analiz przedstawionych na rys. 3–6). W przewidywaniu godziny w oparciu o zbudowany model w 6 przypadkach prognoza była trafna, zaś w 8 przypadkach różnica wyniosła godzinę (z tych 8 przypadków, w 5 przypadkach prognoza było przesunięta o +1 godzinę, zaś w 3 wskazała możliwość wystąpienia maksymalnego poboru o godzinę wcześniej niż w rzeczywistości wystąpiła). W 5 przypadkach przesunięcie wyniosło 13 godzin, czyli była to już różnica pomiędzy pikiem wieczornym a porannym.

W metodzie bazującej na przedziałach dnia w 15 przypadkach prognoza była trafna. W 6 przypadkach różnica wyniosła 4 przedziały, czyli również błędne przewidywanie pików porannych.

W trakcie dalszych badań przeprowadzono strojenie wybranych hiperparametrów algorytmu lasów losowych. Przestrzeń wyszukiwania najlepszych wartości hiperparametrów określono jako: n_{tree} (liczba drzew) – 500–1000, m_{try} (liczba zmiennych przy podziale) – 2–5, a jako algorytm optymalizacji wybrano losowe wyszukiwanie w zdefiniowa-

nej przestrzeni wyszukiwania ze 100 iteracjami. Do oceny jakości określonego parametru został użyty algorytm 3-krotnej weryfikacji krzyżowej (*cross validation*). Po przeprowadzeniu strojenia OOB (*out-of-bag*) wyniosło 56,62%. Najlepszy zestaw hiperparametrów to $n_{tree} = 904$ i $m_{try} = 2$.

Przy zastosowaniu dość prostego modelu uzyskano skuteczność niemal 44%. Jedną z najbardziej oczywistych metod poprawy jest zrównoważenie klas. Obecnie dominuje przedział 6, co powoduje, że model staje się „leniwy” i następuje przeuczenie w tej grupie. Zwiększenie zbioru uczącego (obecnie badania wykonano na podstawie około 300 obserwacji) również powinno poprawić jakość modelu. Strojenie wpłynęło na poprawę zdolności predykcyjnych modelu i przedział dnia został wskazany poprawnie 16 razy.



Rys. 11. Schemat przykładowego drzewa decyzyjnego

Fig. 11. Diagram of an example decision tree

5. Dyskusja wyników

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że istnieją jeszcze rezerwy umożliwiające poprawę modelu. Uzyskać to można zarówno poprzez zastosowanie innych (dodatkowych) zmiennych objaśniających, jak i poprzez zastosowanie innych algorytmów wykorzystywanych w zadaniach klasyfikacyjnych. Wydaje się np. celowe przyszłe włączenie pomiarów temperatury zewnętrznej jako zmiennej objaśniającej. Parametr ten jest zwykle dostępny w systemie automatyki danej centrali grzewczej (kotłownia, węzeł ciepłowniczy), zatem pozyskanie informacji jest proste i tanie. Większy zbiór uczący umożliwiłby zbalansowanie grup poszczególnych godzin/przedziałów doby. W dalszej perspektywie należy też rozważyć sprawdzenie działania innym algorytmem uczenia maszynowego.

Podsumowanie i wnioski

Jednym z parametrów charakteryzujących zużycie gazu w kotłowni jest jego maksymalne godzinowe zużycie. Chociaż nie jest bezpośrednio powiązane z mocą umowną ustaloną pomiędzy odbiorcą i dostawcą gazu, to jednak można pomiędzy tymi dwiema wielkościami szukać związku. Moc umowną ([Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego](#); [Bartnicki i Nowak 2019](#)) określa odbiorca w oparciu o moc wymaganą przez poszczególne instalacje odbioru ciepła (c.o., c.w.u., wentylacje, inne). Przyjęło się określać wartość końcową jako sumę arytmetyczną wartości cząstkowych. Z technicznego punktu widzenia istnieje jednak uzasadnienie do uwzględnienia niejednoczesności poboru dla poszczególnych instalacji odbiorczych. Odbiorca może zatem podejmować decyzje, które prowadzić będą do ograniczenia mocy umownej, bez konieczności ograniczania maksymalnych mocy instalacji odbiorczych. Aby możliwa była ocena trafności zastosowanych rozwiązań projektowych (przede wszystkim wielkość zasobnika) oraz ewentualna ich korekta (np. poprzez zwiększenie lub ograniczenie pojemności zasobników c.w.u.) niezbędne są jednak odpowiednie narzędzia analityczne. W artykule opisano wstępne możliwości zastosowania metod predykcyjnych do wykrywania godziny o największym poborze gazu. Skuteczność tej metody może pozwolić na zarządzanie akumulacją ciepła w zasobnikach (podgrzewaczach pojemnościowych) c.w.u. (np. poprzez odpowiednią korektę temperatury ciepłej wody w zasobniku), a w konsekwencji na obniżenie kosztów zakupu paliwa w efekcie zmniejszenia mocy umownej czy poprawę efektywności pracy układu palnik/kocioł/podgrzewacz. Zaproponowany model wykorzystujący procedurę lasów losowych w przypadku badanej kotłowni nie daje jeszcze w pełni trafnych rezultatów, na podstawie których można zaproponować optymalizację układu przygotowania c.w.u i jego sterowania. Wymaga jeszcze dalszych badań, jednak już teraz pozwala na zwrócenie uwagi na możliwości wynikające z jego zbudowania i udoskonalania. Dalszych analiz wymaga poszukiwanie dodatkowych zmiennych, których uwzględnienie poprawiłoby trafność prognozy. Zwiększenie bazy danych o kolejne obiekty umożliwi natomiast ocenę powtarzalności modelu lub potwierdzi konieczność indywidualnego dopasowania modelu do konkretnego systemu zaopatrzenia w ciepło.

Literatura

- Bartnicki, G. i Nowak, B. 2018. Model ARIMA w prognozowaniu zużycia gazu w cyklach miesięcznych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 103, s. 145–158.
- Bartnicki, G. i Nowak, B. 2019. Współczynnik wykorzystania mocy umownej kotłowni gazowej jako podstawa do jej diagnostyki. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 50(2), s. 43–49.
- Bąkowski, K. 2019. *Sieci i instalacje gazowe*. Warszawa: PWN.
- Chen i in. 2017 – Chen, J., Kenli, Li, K., Tang, Z., Bilal, K., Yu, S., Weng, Ch. i Li, K. 2017. A Parallel Random Forest Algorithm for Big Data in a Spark Cloud Computing Environment. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 28(4), s. 919–933.
- Chmielewska, A. 2017. *Modelowanie zapotrzebowania na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody w budynkach wielorodzinnych*. Praca doktorska, Raporty Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Ser. PRE nr 7.
- Kassambara, A. 2018. *Machine Learning Essentials: Practical Guide in R*. STHDA.
- Gao i in. 2009 – Gao, D., Zhang, Y. i Zhao, Y. 2009. Random forest algorithm for classification of multiwavelength data. *Research in Astronomy and Astrophysics* 9(2), s. 220–226.
- Galvin, R. i Sunikka-Blank, M. 2014. Disaggregating the causes of falling consumption of domestic heating energy in Germany. *Energy Efficiency* 7(5), s. 851–864.
- Malska, W. i Wachta, H. 2015. Wykorzystanie modelu Arima do analizy szeregu czasowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 292, *Elektrotechnika* 34, *RUTJEE* z. 34(3), s. 23–30.
- Nowak i in. 2011 – Nowak, B., Bartnicki, G. i Klimczak, M. 2011. Efektywność energetyczna lokalnego systemu ogrzewczego zaopatrującego w ciepło budynki mieszkalne. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* 42(2), s. 65–68.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego (t.j. Dz.U. z 2018 r. poz. 1158 z późn. zm.).
- Zhao, L. 2014. *Gas load characteristics and calculation* [W:] Zhao, G., Ma, G., Liao, R. i Wang, J. red. *Thermal, Power and Electrical Engineering III*, Papers from the 3rd International Conference on Energy and Environmental Protection, Xian, China, 2014, Trans Tech Publications, Switzerland, s. 654–657.

