

Wpływ temperatury powietrza na pobór wody wodociągowej

The impact of air temperature on tap water consumption

WOJCIECH CIEŻAK, MAŁGORZATA KUTYŁOWSKA, MONIKA NOWAKOWSKA

DOI 10.36119/15.2025.12.18

W niniejszym artykule analizowano wpływ gwałtownego spadku temperatury powietrza, związanego z przejściem niżu genueńskiego we wrześniu 2024 roku, na strukturę poboru wody w małym systemie dystrybucyjnym zlokalizowanym w pobliżu Wrocławia. Celem pracy było zbadanie zmian godzinowego rozkładu zużycia wody spowodowane nagłą anomalią termiczną. Badania przeprowadzono z uwzględnieniem danych eksploatacyjnych z 30 dni (22.08-20.09.2024), porównując dobowe i godzinowe rozbiory wody z maksymalną temperaturą dobową. Stwierdzono, że dla wartości dobowych istnieje istotna, dodatnia korelacja liniowa ($R=0,76$) pomiędzy maksymalną temperaturą powietrza a zużyciem wody, co potwierdza, że cieplejsze dni implikują wyższy pobór, a nagłe ochłodzenie prowadzi do jego redukcji. Największe zużycie dobowe ($465,71 \text{ m}^3/\text{d}$) zanotowano w okresie upałów, natomiast po gwałtownym załamaniu pogody w połowie września pobór spadł do zaledwie 56% wartości maksymalnej. Z kolei analiza godzinowych rozbiorów wody wykazała, że zależność ta ma charakter nieliniowy. Z tego względu do opisu relacji między godzinowym rozbiorem a temperaturą zaproponowano zastosowanie funkcji wykładniczej, uznając regresję liniową za nieadekwatną. Wyniki podkreślają konieczność aktualizacji modeli prognostycznych zużycia wody w celu uwzględnienia dynamicznego wpływu gwałtownych wahań meteorologicznych.

Słowa kluczowe: niższe temperatury powietrza, histogramy rozbiorów wody, pora roku, korelacja

This article analyzes the impact of a sudden drop in air temperature associated with the passage of the Genoese low in September 2024 on the water consumption pattern in a small distribution system located near Wrocław. The aim of the study was to investigate changes in the hourly distribution of water consumption caused by a sudden thermal anomaly. The study was conducted using 30 days of operational data (August 22-September 20, 2024), comparing daily and hourly water consumption with the maximum daily temperature. A significant, positive linear correlation ($R=0.76$) was found between maximum air temperature and water consumption for daily values, confirming that warmer days imply higher consumption, while sudden cooling leads to a reduction. The highest daily consumption ($465.71 \text{ m}^3/\text{d}$) was recorded during the heatwave, while after a sudden weather breakdown in mid-September, consumption dropped to only 56% of the maximum value. In turn, the analysis of hourly water consumption showed that this relationship is non-linear. Therefore, an exponential function was proposed to describe the relationship between hourly consumption and temperature, considering linear regression to be inadequate. The results highlight the need to update water consumption forecasting models to account for the dynamic impact of rapid meteorological fluctuations.

Keywords: lower air temperatures, water distribution histograms, season, correlation

Wprowadzenie

Obserwuje się, że na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat postępuje zacieranie się wcześniej wyraźnych różnic między porami roku. Zjawisko to, choć podlegające subiektywnym odczuciom i regionalnym różnicom w Polsce, manifestuje się zaniem typowego przedwiośnia oraz łagodnego przejścia z lata w babie lato, co jest zauważalne nawet w codziennej praktyce, jak choćby w procesie kompletowania garderoby. O ile średnie temperatury wielolecia pozostają zbliżone [11] na przy-

kład we Wrocławiu, gdzie średnia dla września w latach 1971-2000 i 1991-2020 utrzymywała się na poziomie około 14°C , to chwilowe i lokalne anomalie pogodowe wykazują znaczną zmienność regionalną i roczną. Zjawisko to było szczególnie widoczne we wrześniu 2024 roku, kiedy nadejście niżu genueńskiego wywołało nie tylko intensywne opady i powodzie błyskawiczne, ale również gwałtowny spadek temperatury. W tym czasie, gdy na polskim wybrzeżu zanotowano opady w granicach 40% normy, na Dolnym Śląsku osiągnęły one około 400%

normy [11], co skutkowało poważnymi zniszczeniami, w tym w infrastrukturze komunalnej [14]. Przyczyny tak nagłych zjawisk mają charakter zmienny, zależą od wielu czynników lokalnych i globalnych, takich jak wspomniany niż genueński, który ukształtował się nad Włochami i objął wiele regionów Europy. W niniejszym opracowaniu analiza zostanie jednak skoncentrowana na niespodziewanym spadku temperatury zanotowanym w okolicach Wrocławia na początku drugiej dekady września 2024 roku, który miał dominujący wpływ na zmiany w strukturze

dr inż. Wojciech Cieżak <https://orcid.org/0000-0001-6210-8728> e-mail: wojciech.ciezak@pwr.edu.pl,

dr hab. inż. Małgorzata Kutylowska, prof. uczelni <https://orcid.org/0000-0001-8425-9041> e-mail: malgorzata.kutylowska@pwr.edu.pl,

dr inż. Monika Nowakowska <https://orcid.org/0000-0002-6406-4447> e-mail: monika.nowakowska@pwr.edu.pl, (autor korespondencyjny)

– Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Wrocław

poboru wody, potencjalnie większy niż sama powódź. Przykładowo, minimalna temperatura we wrześniu w okolicach Wrocławia ukształtowała się na poziomie około 5°C, podczas gdy w pobliżu Kołobrzegu było to około 9°C [11]. Różnica ta stanowi potwierdzenie, że wpływ niżu genueńskiego w tym czasie był znaczący, nakładając się na lokalne uwarunkowania klimatyczne, w tym łagodniejszy klimat morski polskiego wybrzeża.

Analiza zapotrzebowania na wodę i struktury jej poboru na cele socjalno-bytowe, wraz ze zmiennością histogramów dobowych i godzinowych, stanowi istotny i sukcesywnie pogłębiany przedmiot badań eksploatacyjnych oraz modelowych, zarówno w Polsce, jak i na świecie [1, 3, 9, 13, 15, 24]. Wyniki tych analiz teoretyczno-empirycznych są fundamentalne dla racjonalnego gospodarowania zasobami wodnymi, łącząc ilości ujmowanej wody z aktualnymi trendami realnego zużycia oraz efektywnym nadzorem nad krytyczną infrastrukturą komunalną. Proces analizy zapotrzebowania dla jednostek osadniczych i wynikowego poboru wody powinien wykraczać poza tradycyjne wskaźniki jednostkowego zużycia, których aktualizacja jest kluczowa dla odzwierciedlenia dynamicznych trendów [21] zależnych od specyfiki odbiorców [5]. Konieczne jest również uwzględnianie bieżącej, dynamicznej sytuacji operacyjnej. W tym kontekście, niezbędne staje się opracowywanie kompleksowych planów bezpieczeństwa [8], z uwzględnieniem zagrożeń w cyberprzestrzeni [27] oraz hierarchizacją ryzyk specyficznych dla sektora komunalnego [17]. Działania te powinny przekładać się na optymalne prowadzenie eksploatacji systemów wodociągowych, w tym na rzetelną analizę jakościową tłoczzonej wody [26]. Ponadto, w obliczu postępujących zmian geopolitycznych, należy utrzymywać zdolność systemów do zapewnienia ciągłej i szybkiej dostawy wody dla zwiększonej liczby użytkowników w relatywnie krótkim czasie, czego przykładem była sytuacja odnotowana wiosną 2022 roku [19].

Warunki meteorologiczne wywierają znaczący wpływ na codzienną aktywność człowieka, która jest nierozdzielnie związana z poborem wody na cele komunalne [4]. Z jednej strony, w Polsce pobór wody z eksploatowanych ujęć oraz jej zużycie na cele bytowe utrzymują się na stabilnym poziomie od wielu lat [10] i charakteryzują się przewidywalną zmiennością, wynikającą z czynników, takich jak: sezonowość, okresy wakacyjne, weekendy, charakter jednostki osadniczej (np. mała osada turystyczna vs. duża aglomera-

cja miejska), a nawet wydarzenia sportowe [18]. Ponadto, racjonalne gospodarowanie zasobami wodnymi skutecznie zapobiega deficytom wody przeznaczonej do spożycia w skali krajowej.

Badania nad zmiennością zużycia wody w korelacji ze zmianami pogodowymi są prowadzone w kraju i za granicą od dekad, obejmując różnorodne perspektywy [2, 16, 20]. Najnowsze analizy zwracają uwagę nawet na potencjalny wpływ zmian temperatury na jakość wody wodociągowej i ryzyko rozwoju mikroorganizmów w wodzie przeznaczonej do spożycia [25]. Rozważania dotyczące oddziaływania warunków atmosferycznych na funkcjonowanie aglomeracji miejskich mają także istotny wymiar ekonomiczny [6]. Nie ma przy tym znaczenia, czy analizowane są opady, wahania termiczne, czy nagłe zjawiska suszy lub powodzi. Wszystkie te aspekty, zależne od szerokości geograficznej i lokalnych uwarunkowań, powinny być uwzględniane, zwłaszcza w procesie aktualizacji rozkładów dobowych i godzinowych poboru wody w jednostkach osadniczych o różnej wielkości. Konieczność ta wynika również z potrzeby ciągłej aktualizacji jednostkowych wskaźników zużycia oraz godzin poboru szczytowego, które ulegają modyfikacjom wraz ze zmianami w stylu życia społeczeństwa. Przykładowo, przesunięcie godzin pracy w ciągu ostatnich dekad spowodowało, że piki poboru porannego mogły ulec przemieszczeniom na osi czasu.

Tematyka wpływu zmian meteorologicznych na strukturę poboru wody nie jest wyczerpana i wymaga dalszych badań oraz rozwoju, zwłaszcza w kontekście analizy nagłych wahań temperatury zewnętrznej oraz wynikających z nich gwałtownych, lokalnych modyfikacji w rozkładach godzinowych. Każda jednostka osadnicza charakteryzuje się bowiem unikalnymi warunkami eksploatacyjnymi, specyficznym rozmieszczeniem elementów systemu dystrybucji (takich jak zbiorniki, lokalne pompownie) oraz odmienną strukturą zagospodarowania przestrzennego. W związku z tym, celem niniejszej pracy jest zbadanie i przedstawienie wpływu gwałtownego załamania pogody we wrześniu 2024 roku na godzinowy rozkład poboru wody w małej miejscowości zlokalizowanej w pobliżu Wrocławia, co zbiegło się w czasie z oddziaływaniem wspomnianego wcześniej niżu. Analizie poddane zostaną dane eksploatacyjne zużycia wody w okresach ciepłych oraz w kolejnych, chłodniejszych dniach, z uwzględnieniem typów odbiorców korzystających z wody wodociągowej. Ak-

centowanie tego czynnika jest kluczowe, gdyż w mniejszym systemie zaopatrzenia w wodę ma to większe znaczenie niż w rozległej aglomeracji miejskiej, gdzie homogeniczność sieci dystrybucyjnej i efekt uśredniania zacierają trendy obserwowane w typowych, jednorodnych osiedlach o niskiej zabudowie.

Metodyka i poligon badawczy

Rozpatrywany wodociąg zasilany jest z pompowni strefowej, dla której źródłem wody są zbiorniki o łącznej pojemności 200 m³. Zbiorniki uzupełniane są w wodę z gminnego komunalnego systemu wodociągowego. Pompownia wyposażona jest w cztery pompy wielostopniowe sterowane przetwornikiem częstotliwości (falownikiem). Przewody wodociągowe, zbudowane głównie z HDPE (w niewielkim stopniu z PVC-U) o średnicach od DN90 do DN160, stanowią geometrycznie układ obwodowo-rozgałęzienny.

Struktura konsumentów wody jest klasyczna dla miejscowości stanowiących obszar zamieszkania ludności zazwyczaj pracującej w pobliskich aglomeracjach miejskich. W przeważającej większości to mieszkalnictwo (jedno – i wielorodzinne) stanowiące 97,8% wszystkich odbiorców wody. W mieszkalnictwie woda używana jest na potrzeby bytowe, a także na inne cele w tym na: podlewanie zieleńców (trawniki, krzewy i mały drzewostan) oraz eksploatację basenów rekreacyjnych (głównie mieszkalnictwo jednorodzinne w zabudowie willowej wolnostojącej). Pozostała część odbiorców wody to usługi (1,7%) oraz aktywność gospodarcza (produkcja) – 0,5%. Na rozpatrywanym terenie nie występuje rolnictwo produkcyjne.

Analizie poddano dobowe zużycia wody na przestrzeni 30 dni, od czwartku 22.08.2024 do piątku 20.09.2024 włącznie wraz z uwzględnieniem maksymalnej temperatury każdego dnia. Dodatkowo skupiono uwagę na godzinowych rozbiórach wody we wrześniu 2024, obejmujących zarówno okresy niemal upalne, jak i gwałtowny spadek temperatury oraz powolny jej wzrost. Dane temperaturowe oparte są na wynikach pomiarów i obserwacji ze stacji synoptycznej sieci stacji meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej-Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB). Wrocławską stacją zlokalizowaną jest na Strachowicach w zachodniej części miasta na terenie Portu Lotniczego.

W Roczniku Meteorologicznym IMGW z 2024 [12] zawarto dane pomiarów dobowych i terminowych z pięciu

stacji meteorologicznych reprezentujących różne regiony fizjograficzne kraju, m.in. dla Wrocław-Strachowice. Dla przykładu w Roczniku [12] podane są następujące informacje dla każdego dnia z 4 głównych terminów pomiarowo-obszaryjnych o godzinie 00:00, 06:00, 12:00 i 18:00 UTC, a także wartości średnich, maksymalnych, minimalnych wartości ciśnienia atmosferycznego na przestrzeni całego września 2024, które wahały się odpowiednio w granicach 987,8–1012,7 hPa; 990,9–1013,8 hPa; 985,4–1011,5 hPa. Natomiast dobowe temperatury powietrza (średnia, maksymalna, minimalna) w ciągu całego września 2024 zanotowano w zakresach 8,7–25,3°C; 11,4–33,4°C; 1,2–19,2°C. Analiza podstawowych danych meteorologicznych [12] wskazuje na kształtowanie się nizu, gdyż od 9.09.2024 obserwowany jest spadek ciśnienia trwający kilka dni, co skorelowane było z opadami i dużo niższymi temperaturami. W interpretacji wartości temperatury podanych w [12] należy zwrócić uwagę na różnice wynikające z zapisu w ujednoczonym systemie notacji UTC, który różni się względem czasu polskiego o 1 lub 2 godziny w zależności od pory roku.

Wyniki i dyskusja

Pierwszym etapem badań była analiza wartości dobowego zużycia wody w systemie dystrybucji zlokalizowanym w pobliżu Wrocławia, zaopatrującym małe miejscowości, charakteryzujące się przewagą zabudowy jednorodzinnej i niewielką liczbą punktów usługowych. Dane te zestawiono z pomiarami temperatury odnotowanymi na pobliskiej stacji IMGW-BIP. Następnie przeanalizowano dane godzinowe dotyczące zarówno poboru wody, jak i zmian temperatury. Uwagę badawczą skoncentrowano wyłącznie na zmiennej atmosferycznej, jaką jest temperatura, ponieważ w odniesieniu do tego samego regionu geograficznego, wcześniejsze prace wykazały [23], iż wpływ innych czynników, na przykład opadów atmosferycznych, na dobowe zużycie wody jest statystycznie nieistotny i może zostać pominięty.

W tabeli 1 zestawiono wartości dobowych rozbiórów wody oraz maksymalnej dobowej temperatury powietrza w całym analizowanym okresie 22.08–20.09.2024. Wyróżniono te dni, w których temperatura powietrza przekraczała 30°C (łącznie 9 dni, z czego aż 5 dni we wrześniu) oraz była niższa niż 15°C (3 dni, co stanowi 10% dni z analizowanego

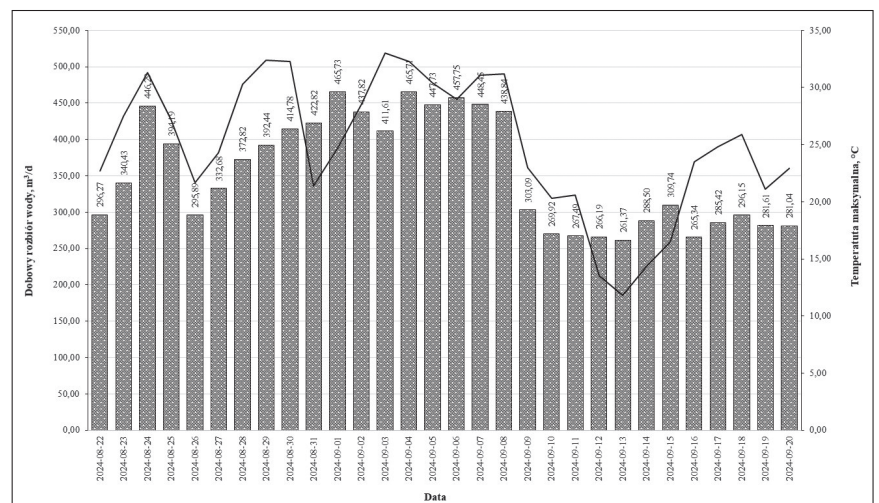
Tabela 1. Dobowe rozbiory wody i maksymalna temperatura w okresie 22.08–20.09.2024
Table 1. Daily water consumption and maximal temperature in the time span 22.08–20.09.2024

Data	Rozbiór dobowy, m ³ /d	Temperatura, °C	Data	Rozbiór dobowy, m ³ /d	Temperatura, °C
2024-08-22	296,27	22,7	2024-09-06	457,75	29
2024-08-23	340,43	27,5	2024-09-07	448,45	31,1
2024-08-24	446,29	31,3	2024-09-08	438,84	31,2
2024-08-25	394,19	27,2	2024-09-09	303,09	23
2024-08-26	295,89	21,7	2024-09-10	269,92	20,3
2024-08-27	332,68	24,3	2024-09-11	267,49	20,6
2024-08-28	372,82	30,3	2024-09-12	266,19	13,5
2024-08-29	392,44	32,4	2024-09-13	261,37	11,8
2024-08-30	414,78	32,3	2024-09-14	288,5	14,4
2024-08-31	422,82	21,4	2024-09-15	309,74	16,5
2024-09-01	465,73	24,7	2024-09-16	265,34	23,5
2024-09-02	437,82	28,6	2024-09-17	285,42	24,8
2024-09-03	411,61	33	2024-09-18	296,15	25,9
2024-09-04	465,71	32,3	2024-09-19	281,61	21,1
2024-09-05	447,73	30,4	2024-09-20	281,04	22,9

okresu czasowego). Dla pozostałych 18 dni (60% całego okresu) temperatura wahała się w granicach 16,5–29,0°C. W celu graficznego zobrazowania dobowego zużycia wody oraz zanotowanej temperatury powietrza na przełomie sierpnia i września 2024, wyniki przedstawiono również na wykresie (rys. 1).

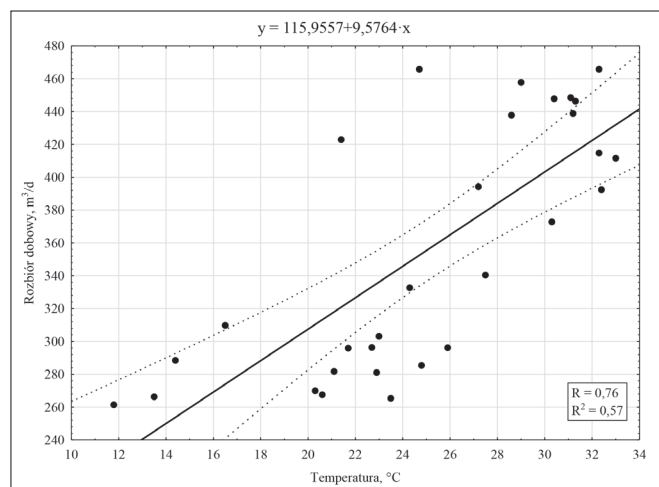
Ponadto na rys. 2 ukazano korelację i zależność liniową o równaniu $y=115,9557+9,5764x$ (poziom ufności 0,95; współczynnik korelacji $R=0,76$ oraz współczynnik determinacji $R^2=0,57$) pomiędzy dobowymi rozbiórami a maksymalną temperaturą dobową. Maksymalne dobowe zużycie wody (465,71 m³/d) odnotowano w dniu 4.09.2024 (środa), gdy maksymalna temperatura powietrza zewnętrznego wyniosła 32,3°C, co było wartością niższą tylko o 0,7°C w stosunku do maksymalnej zanotowanej dobowej wcześniej temperatury powietrza w analizowanym okresie (33,0°C), gdy rozbiór

wody wyniósł 411,61 m³/d. Zatem na przestrzeni jednej doby mamy do czynienia ze wzrostem poboru wody o ok. 13%. Już wcześniej zostało wykazane [4], że wzrost temperatury powietrza przekłada się na wzrost zużycia wody. Jednakże w niniejszym opracowaniu główny nacisk jest położony na wpływ nagłego i gwałtownego załamania się pogody i spadek temperatury (rys. 1), wynikający również z globalnych czynników, jak niż genezyjski, na zmianę i spadek poboru wody na cele bytowo-gospodarcze. Zmiana wielkości zużycia wody wraz ze spadkiem temperatury jest najbardziej widoczna w dniach 10–14.09.2024. W dniu 13.09.2024 zanotowano pobór wody stanowiący 56% dobowego zużycia z dnia 4.09.2024. Natomiast pierwsze załamanie pogodowe zostało zaobserwowane już w poniedziałek 9.09.2024, gdy maksymalna temperatura spadła o ok. 8°C, a w kolejnych dwóch dniach



Rys. 1.
Trend zmian dobowych rozbiórów wody i maksymalnej temperatury zewnętrznej
Fig. 1. Trend of daily water consumption and maximum of external temperature

o kolejne ok. 3°C i wyniosła w środę 11.09.2024 ok. 20°C. Natomiast kolejna doba przyniosła dalsze ochłodzenie do ok. 13°C, aby osiągnąć minimum lokalne właśnie w piątek 13.09.2024 (niecałe 12°C). Na podstawie wyników ukazanych na rys. 2 można postawić tezę o liniowym dopasowaniu i dobrej korelacji ($R=0,76$) wartości rozbiórów dobowych i maksymalnej temperatury. Ponadto mediana dobowych wartości wynosi odpowiednio dla rozbioru 336,56 m³/d, a dla temperatury 24,8°C. Można stwierdzić, iż dobowe rozbiory wody istotnie maleją wraz z nagłym spadkiem temperatury powietrza. Jednakże w przypadku zmian wartości godzinowych nie jest to już takie oczywiste.



Rys. 2.
Korelacja dobowych rozbiórów wody i temperatury maksymalnej w dniach 22.08–20.09.2024
Fig. 2. Correlation of daily water consumption and maximal temperature in days 22.08–20.09.2024

Relacja pomiędzy wartościami godzinowymi nie jest możliwa do opisanego typową regresją liniową, gdyż nie zaobserwowano liniowej zależności między poborem wody a temperaturą zewnętrzną, co wynika ze specyfiki godzinowych histogramów rozbioru wody. Dokonano próby opisu relacji pomiędzy godzinowym zużyciem wody a godzinowymi wartościami temperatury zależnością wykładniczą (rys. 3) o równaniu $y = 4,4095 \cdot \exp(0,0528 \cdot x)$. Dane zmian godzinowych temperatury powietrza wraz z rozkładem rozbiórów wody przedstawiono dla wybranych dni w bardzo skróconej formie w tabelach 2a i 2b. Pomimo dysponowania danymi dla 20 dni września 2024 (1–20.09), z uwagi na ograniczenie miejsca, w tabeli 2 zestawiono jedynie 6 dni ze skrajnie niskimi i relatywnie wysokimi temperaturami w porównaniu do innych dni z analizowanego okresu. Na rysunku 4 zwiększono ten okres do kilkunastu dni (3–15.09.2024), aby szerzej spojrzeć na zmianę struktury godzinowego poboru wody wraz ze spadkiem temperatur zewnętrznych. W tabeli 2 wyróżniono drukiem pogrubionym skrajne wartości tem-

peratur. W analizie wartości godzinowych należy wziąć pod uwagę rodzaj odbiorców wody (głównie nowa niska zabudowa szeregowa lub jednorodzinna, a dodatkowo m. in. świetlica, restauracja, prywatny szpital, kościół, drobne punkty usługowe, obiekt sportowy), jak i znane z doświadczenia i szeroko obserwowane trendy w zmianach poboru wody na przestrzeni jednej doby, gdyż nie zawsze skrajne wartości temperatury generują skrajne wartości zużycia wody. Zarówno w dniach upalnych, jak i najchłodniejszych z analizowanego okresu minimalne wartości rozbiórów godzinowych zanotowano w godzinach nocnych 01:00–03:00, co jest zjawiskiem typowym i obserwowanym już od wielu dekad [7].

Natomiast dla przykładu w dniach 7., 8. i 11. września najniższe wartości temperatur zanotowano ok. godz. czwartej lub piątej nad ranem, co jest typowe dla wrześniowej pogody w naszej szerokości geograficznej i nie miało żadnego wpływu na pobór wody, który już o tej porze dnia zaczynał wzrastać z uwagi na normalną aktywność głównych odbiorców wody (odbiorcy indywidualni). Zaś w piątek 13.09.2024 najniższa temperatura (obserwowany spadek od początku czwartku 12.09.2024, gdy dodatkowo nad Wrocławiem zaczynał umacniać się niż z opadami) została odnotowana akurat w tych samych godzinach, co minimalny rozbiór (tab. 2b), jednak znowu nie był on spowodowany czynnikiem atmosferycznym, tylko porą dnia, a raczej nocy. Jak wspomniano wcześniej od poniedziałku 9.09.2024 zaczynało się powoli ochłodzić. I tak właśnie w ten dzień maksymalna temperatura wystąpiła nad ranem (godz. 04:00, 23°C), co wcale nie wpłynęło na znaczący wzrost rozbioru akurat o tej porze (tab. 2a).

Jednak, gdy przeanalizuje się ogólny trend (a nie poszczególne skrajne wartości) ukazany na rys. 4 i w tab. 2b, to zauważalna jest konkretna różnica wartości rozbiórów godzinowych w gorącym dniu (np. czwartek 5.09.2024) i w dniu załamania się pogody (czwartek 12.09.2024). W tym miejscu istotne jest zaznaczenie, iż

Tabela 2a. Godzinowe rozbiory wody i temperatury w wybranych dniach września 2024
Table 2a. Hourly water consumption and temperatures in selected days of September 2024

Godzina	Rozbiór wody, m ³ /h	Temperatura, °C	Godzina	Rozbiór wody, m ³ /h	Temperatura, °C	Godzina	Rozbiór wody, m ³ /h	Temperatura, °C
07.09.2024 sobota			08.09.2024 niedziela			09.09.2024 poniedziałek		
00:00	9,19	18,4	00:00	9,54	19,3	00:00	6,62	22,5
01:00	9,06	16,8	01:00	6,76	18,9	01:00	6,07	22,7
02:00	9,24	16,5	02:00	7,05	18,6	02:00	5,05	22,8
03:00	11,03	15,2	03:00	11,47	18,4	03:00	7,82	22,8
04:00	15,15	14,1	04:00	13,81	18,2	04:00	10,63	23,0
05:00	12,15	15,3	05:00	11,29	18,0	05:00	13,10	22,5
06:00	9,95	17,9	06:00	7,62	19,7	06:00	19,33	21,9
07:00	16,19	20,6	07:00	12,15	22,7	07:00	17,84	19,7
08:00	22,94	23,6	08:00	19,27	25,2	08:00	14,22	19,2
09:00	26,71	26,2	09:00	24,81	27,9	09:00	11,64	19,6
10:00	27,74	28,4	10:00	26,50	29,6	10:00	11,16	19,9
11:00	25,86	29,9	11:00	24,20	29,9	11:00	10,96	19,5
12:00	22,70	30,3	12:00	22,46	30,7	12:00	9,38	18,2
13:00	20,25	30,4	13:00	21,34	31,4	13:00	9,12	18,0
14:00	20,18	31,0	14:00	20,05	31,2	14:00	9,46	17,7
15:00	17,97	30,5	15:00	17,27	30,1	15:00	9,57	17,1
16:00	17,46	30,2	16:00	15,19	29,6	16:00	11,14	17,0
17:00	17,51	28,3	17:00	17,97	26,2	17:00	12,62	16,5
18:00	19,93	25,5	18:00	21,80	24,2	18:00	15,06	16,6
19:00	28,21	22,7	19:00	33,41	22,7	19:00	22,25	16,6
20:00	29,32	21,3	20:00	36,00	21,5	20:00	24,50	16,3
21:00	25,90	21,0	21:00	26,18	21,6	21:00	22,48	16,7
22:00	19,77	20,6	22:00	19,28	21,9	22:00	15,13	16,3
23:00	14,04	19,7	23:00	13,42	22,4	23:00	7,94	16,2

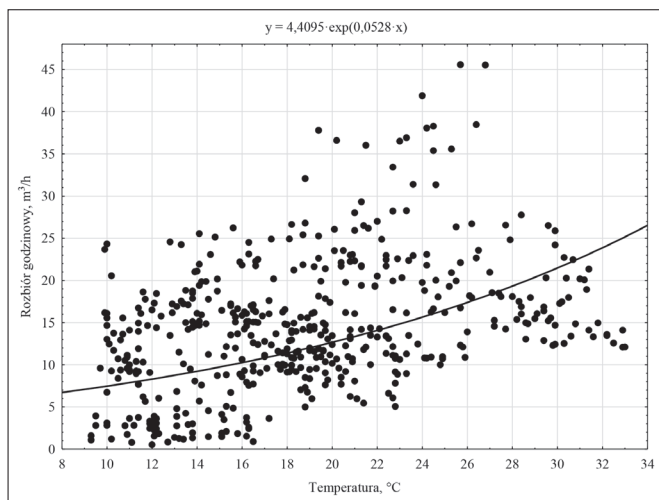
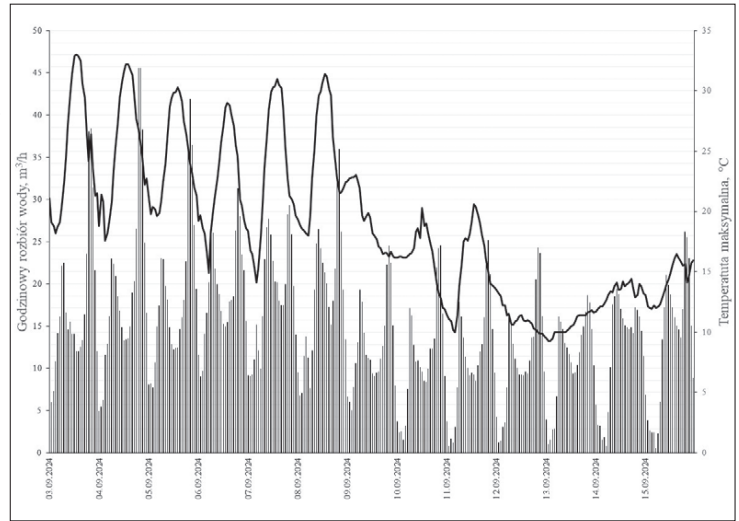
porównaniu powinny podlegać te same dni tygodni, gdyż jak wykazano wcześniej [22] dni robocze różniły się w strukturze histogramów godzinowych od weekendów. Pobory wody w zimny czwartek (12.09.2024), będący pierwszym dniem o naprawdę nieprzyjemnej aurze, stanowiły od 15% do 76% poborów sprzed tygodnia, co stanowi znaczący spadek. Taka sytuacja może być tłumaczona zarówno zmniejszeniem ilości wody na cele typowo sanitarne (prysznice, kąpiele), jak i ograniczeniem zużycia wody na cele ogrodowe i rekreacyjne (podlewanie niewielkich przydomowych trawników i kłombów oraz napełnianie basenów). Struktura zabudowy (głównie domy szeregowe i jednorodzinne) bez typowo rolniczych terenów sprawia, że właśnie podlewanie generuje znaczący pobór wody w dniach cieplejszych. Opady atmosferyczne nie mają tu większego znaczenia. Na przykład w środę 11.09.2024, gdy odnotowano powolne spadki temperatur, ale bez opadów, pobór wody stanowił od 10% do 78% poboru sprzed tygodnia (upalny dzień 4.09.2024).

Jak wspomniano wcześniej z uwagi na brak korelacji liniowej dokonano opisu zależności rozbioru godzinowego od temperatury funkcją wykładniczą (rys. 3). Analiza wykresu nie może być prowadzona w oderwaniu od specyfiki omawianego zagadnienia. Dwie najwyższe wartości poboru wody (powyżej 45 m³/h) wystąpiły w upalną środę 4.09.2024, ale w godzinach 19-20, gdy temperatura wyniosła 26–27°C i nie była to w tym dniu wartość maksymalna. Podobnie w godzinie (13:00) wystąpienia maksymalnej temperatury 33°C w dniu 3.09.2024 odnotowano rozbiór na poziomie ok. 12 m³/h i nie był od poborem maksymalnym w danej dobie, gdyż nie wystąpił w czasie rozbiorów szczytowych. Stąd w przypadku analizy wartości godzinowych (rozbiór wody

Tabela 2b. Godzinowe rozbiory wody i temperatury w wybranych dniach września 2024
Table 2b. Hourly water consumption and temperatures in selected days of September 2024

Godzina	Rozbiór wody, m ³ /h	Temperatura, °C	Godzina	Rozbiór wody, m ³ /h	Temperatura, °C	Godzina	Rozbiór wody, m ³ /h	Temperatura, °C
11.09.2024 środa			12.09.2024 czwartek			13.09.2024 piątek		
00:00	3,76	11,4	00:00	4,24	13,5	00:00	3,95	9,5
01:00	0,80	11,1	01:00	1,27	13,2	01:00	1,08	9,3
02:00	1,73	10,9	02:00	1,40	13,0	02:00	1,59	9,3
03:00	1,21	10,2	03:00	3,07	12,2	03:00	2,80	9,5
04:00	3,10	10,0	04:00	3,62	12,2	04:00	2,83	10,0
05:00	7,69	11,4	05:00	7,68	11,4	05:00	6,73	10,0
06:00	17,85	13,8	06:00	16,07	11,5	06:00	16,10	10,0
07:00	16,15	15,6	07:00	15,55	10,7	07:00	15,55	10,0
08:00	13,68	17,5	08:00	12,94	10,6	08:00	14,67	10,0
09:00	11,41	17,8	09:00	11,14	10,9	09:00	13,01	10,0
10:00	10,03	17,6	10:00	10,00	11,0	10:00	12,47	10,1
11:00	9,16	18,1	11:00	9,27	11,3	11:00	11,71	10,3
12:00	9,42	19,0	12:00	9,21	11,4	12:00	10,72	10,5
13:00	9,20	20,6	13:00	9,18	11,0	13:00	9,37	10,6
14:00	8,51	20,4	14:00	9,57	10,9	14:00	9,56	10,9
15:00	10,35	19,7	15:00	9,40	11,0	15:00	10,38	11,3
16:00	12,01	19,0	16:00	10,92	10,9	16:00	11,91	11,4
17:00	12,86	18,1	17:00	13,63	10,7	17:00	13,95	11,4
18:00	16,03	17,2	18:00	13,76	10,3	18:00	14,93	11,4
19:00	22,18	15,9	19:00	20,55	10,2	19:00	16,73	11,4
20:00	25,14	14,8	20:00	24,32	10,0	20:00	18,62	11,6
21:00	21,10	14,0	21:00	23,66	9,9	21:00	17,76	11,7
22:00	14,64	13,9	22:00	16,16	9,9	22:00	14,65	11,8
23:00	9,48	13,7	23:00	9,58	9,7	23:00	10,30	11,6

Rys. 4. Trend zmian godzinowych rozbiorów wody i temperatury zewnętrznej w dniach 3–15.09.2024
Fig. 4. Trend of hourly water consumption and external temperature in days 3–15.09.2024



Rys. 3. Zależność godzinowych rozbiorów wody od temperatury godzinowej w dniach 1–20.09.2024
Fig. 3. Relationship of hourly water consumption and hourly temperature in days 1–20.09.2024

i temperatura), a nie dobowych zależność liniowa nie ma zastosowania. Zaproponowany opis tejże relacji funkcją wykładniczą powinien być zweryfikowany dla innego podobnego systemu dystrybucji wody, którego zarówno struktura rozkładów godzinowych, jak i rodzaj odbiorców nie odbiegają znacząco od tego opisanego w niniejszym opracowaniu.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badanie empiryczne miało na celu ilościowe określenie reakcji małego, podmiejskiego systemu dystrybucji wody na nagłą anomalię termiczną

– tj. gwałtowny spadek temperatury powietrza we wrześniu 2024 roku, korepondujący z oddziaływaniem niżu genezyńskiego. Analiza danych eksploatacyjnych, obejmująca dobowe i godzinowe rozbiory wody, potwierdziła wysoką wrażliwość systemów wodociągowych o jednorodnej strukturze odbiorców na dynamiczne zmiany meteorologiczne. W skali dobowej, zaobserwowano statystycznie istotną korelację liniową ($R=0,76$) pomiędzy maksymalną temperaturą powietrza a całkowitą wielkością poboru. Fakt ten potwierdza fundamentalną rolę czynnika termicznego w generowaniu zużycia, zwłaszcza poza celami stricte bytowymi. Gwałtowne ochłodzenie przełożyło się na radykalną redukcję zużycia do 56% wartości szczytowej odnotowanej w okresie upałów, co stanowi krytyczną informację dla zarządzania rezerwami operacyjnymi i bilansowania wodnego w kontekście scenariuszy ekstremalnych. Natomiast kluczowe wnioski naukowe koncentrują się na analizie krótkoterminowej (godzinowej), gdzie natura zależności ulega istotnej transformacji. Stwierdzono, że relacja między godzinowym rozbiorem a temperaturą powietrza jest nieliniowa. Obserwacje wykazały, że szczytowe natężenia poboru nie korelują bezpośrednio z chwilą wystąpienia maksymalnej temperatury dobowej, lecz są ściśle skorelowane z cyklem dobowym i wzorcami socjalno-behawioralnymi odbiorców (tj. piki poranne i wieczorne). To dowodzi, że w horyzoncie godzinowym wpływ czynnika behawioralnego dominuje i maskuje bezpośredni wpływ chwilowej temperatury powietrza. Konsekwencją tej nieliniowości jest wniosek o nieadekwatności stosowania regresji liniowej w modelowaniu prognoz godzinowych. Zamiast tego, dla realistycznego i precyzyjnego odwzorowania szczytowych obciążeń systemów dystrybucyjnych, konieczna jest weryfikacja i implementacja nieliniowych modeli regresyjnych, np. w postaci funkcji wykładniczej. Jest to niezbędne do optymalizacji sterowania pompowniami, utrzymania stabilności ciśnienia oraz minimalizacji ryzyka operacyjnego w infrastrukturze wodociągowej, która staje się coraz bardziej wrażliwa na dynamiczne wahania popytu indukowane zmianami klimatycznymi.

W świetle uzyskanych wyników, zwłaszcza stwierdzonej nieliniowości zależności godzinowej poboru wody, dalsze badania powinny być ukierunkowane na rozwój i weryfikację zaawansowanych metod prognostycznych, które mogą znacząco podnieść efektywność zarządzania infrastrukturą wodociągową. W pierwszej kolejności, niezbędna jest wieloprzekrojowa weryfikacja zaproponowanego modelu regresji wykładniczej dla danych go-

dzinowych w różnych, porównywalnych systemach dystrybucji. Celem jest empiryczne potwierdzenie, czy nieliniowy model oferuje statystycznie lepsze dopasowanie i niższy błąd predykcji w porównaniu do regresji liniowej. Równolegle, należy zbadać potencjał zaawansowanych technik uczenia maszynowego (ML), w tym sztucznych sieci neuronowych (ANN), które są szczególnie predestynowane do identyfikacji skomplikowanych, nieliniowych wzorców powstających na styku czynników meteorologicznych i behawioralnych. Ponadto, konieczne jest przeprowadzenie analizy szeregów czasowych z czynnikami egzogenicznymi, aby izolować i kwantyfikować wpływ rytmu dobowego oraz socjalno-bytowego (uwzględniając dni robocze, weekendy i święta) w celu opracowania wskaźników behawioralnych modyfikujących prognozy. Badania powinny również objąć analizę wrażliwości skali systemu, porównując wyniki uzyskane dla małych miejscowości z danymi z dużych aglomeracji, aby określić, przy jakiej skali zjawisko uśredniania zaciera lokalne anomalie termiczne, a tym samym, w jakich przypadkach implementacja modeli nieliniowych staje się krytycznym wymogiem operacyjnym.

LITERATURA

- [1] Alikhani MR, Moeini R. Predicting the urban water demand by equipping intelligent-based methods with discrete wavelet transform function. *Appl Water Sci.* 2025;15(2). doi:10.1007/s13201-025-02368-7.
- [2] Bakker M, Van Duist H, Van Schagen K, Vreburg J, Rietveld L. Improving the performance of water demand forecasting models by using weather input. *Procedia Engineering.* Vol 70. 2014;93-102. doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.012.
- [3] Cieżak W, Cieżak J. Routine forecasting of the daily profiles of hourly water distribution in cities. An effectiveness analysis. *Environment Protection Engineering.* 2015;41(2). doi: 10.5277/epe150215.
- [4] Cieżak W, Kutyłowska M. The impact of temperature anomalies on sudden increase in water production and consumption. *Environment Protection Engineering.* 2024;50(4):115-126. doi:10.37190/epe240407.
- [5] Dykiert K, Cieżak W. Analiza rozbiórów wody domu studenckiego jako przykład niestandardowego budynku mieszkalnego. *Instal.* 7-8/2025: 41-44. doi: 10.36119/15.2025.7-8.5.
- [6] Felbermayr G, Gröschl J, Sanders M, Schippers V, Steinwachs T. The economic impact of weather anomalies. *World Dev.* 2022;151. doi: 10.1016/j.worlddev.2021.105745.
- [7] Gabryszewski T. *Wodociągi.* Warszawa 1973.
- [8] Galant D, Rak JR. Analiza kryzysowego zaopatrzenia w wodę miasta w województwie podkarpackim. *Instal.* 01/2024: 48-50. doi: 10.36119/15.2024.1.7.
- [9] Gil-Gamboa A, Paneque P, Trull O, Troncoso A. Medium-term water consumption forecasting based on deep neural networks. *Expert Syst Appl.* 2024;247. doi: 10.1016/j.eswa.2024.123234.
- [10] Główny Urząd Statystyczny. *Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej.* Warszawa 2021.
- [11] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej-Państwowy Instytut Badawczy. *Mapy klimatu Polski.*
- [12] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej-Państwowy Instytut Badawczy. *Rocznik Meteorologiczny 2024.*
- [13] Kowalski D, Kowalska B, Suchorab P, Nakonieczna S, Skwarek M. Badania wzorców zmian poboru wody przez odbiorców charakterystycznych w wybranym systemie wodociągowym. *Instal.* 7-8/2019: 54–58.
- [14] Mołczan M, Wolska M, Cieżak W. *Koncepcja odbudowy popowodziowej systemu ujęć i oczyszczania wody w Złotym Stoku. Raporty Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej.* Ser. SPR nr 7. 2025.
- [15] Pesantez JE, González L, Li B. Exploring the predictive capabilities of neural networks and state space models on hourly water demand forecasting. *Journal of Hydrology.* 2025(662). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133317>.
- [16] Potter LB, Tremaine DM, Banner JL. Predictors of variations in residential water consumption in central Texas. *Water.* 2022;14(11). doi: 10.3390/w14111804.
- [17] Rak JR, Stręk M, Piegdoń I, Tchórzewska-Cieślak B. Rozważania na temat ryzyka w systemach zaopatrzenia w wodę. *Instal.* 7-8/2025: 56-59. doi: 10.36119/15.2025.7-8.8.
- [18] Rak JR, Stręk M, Ustrobiński M, Potoczny R, Szydelko D. Zużycie wody w Rzeszowie w czasie transmisji telewizyjnych z meczów piłkarskich podczas Mundialu w Katarze 2022. *Instal.* 02/2023: 41-45. doi: 10.36119/15.2023.2.6.
- [19] Rak JR, Ustrobiński M, Potoczny R, Stręk M. Analiza zużycia wody w Rzeszowie w czasie kryzysu uchodźczego z Ukrainy. *Instal.* 01/2023:44-46. doi:10.36119/15.2023.1.6.
- [20] Rasifaghghi N, Li SS, Haghghat F. Forecast of urban water consumption under the impact of climate change. *Sustain Cities Soc.* 2020;52. doi: 10.1016/j.scs.2019.101848.
- [21] Sierociński M, Kwietniewski M, Kowalski D. Wskaźniki jednostkowego zużycia wody w gospodarstwach domowych w świetle ostatnich badań prowadzonych w Polsce. *Instal.* 06/2025:33-39. doi:10.36119/15.2025.6.4.
- [22] Siwoń Z, Cieżak W, Cieżak J. Modele neuronowe szeregów czasowych godzinowego poboru wody w osiedlach mieszkaniowych. *Ochrona Środowiska.* 2011;33(2): 23-26.
- [23] Slavíková L, Malý V, Rost M, Petružela L, Vojáček O. Impacts of climate variables on residential water consumption in the Czech Republic. *Water Resources Management.* 2013;27(2):365-379. doi:10.1007/s11269-012-0191-1
- [24] Stańczyk J, Kajewska-Szkudlarek J, Lipiński P, Rychlikowski P. Improving short-term water demand forecasting using evolutionary algorithms. *Sci Rep.* 2022;12(1). doi:10.1038/s41598-022-17177-0.
- [25] Stojak M, Kłosok-Bazan I. Wpływ zmiany warunków temperatury wód na wzrost mikroorganizmów w wodzie do picia – studium przypadku. *Instal.* 03/2025: 43-47. doi: 10.36119/15.2025.3.5.
- [26] Tchórzewska-Cieślak B, Rak JR, Pietrucha-Urbaniak K, Piegdoń I, Boryczko K, Szpak D, Żywiec J. Water supply safety assessment considering the water supply system resilience. *Desalination and Water Treatment.* 2023(288): 26-36. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29201>.
- [27] Tchórzewska-Cieślak B, Rak JR, Rożnowski M. Bezpieczeństwo systemów wodociągowych w aspekcie zagrożeń w cyberprzestrzeni Security of water supply systems in light of threats in cyberspace. *Instal.* 05/2024: 29-34. doi: 10.36119/15.2024.5.5.