

Analiza porównawcza systemów rejestracji danych wodomierzowych z wykorzystaniem wskaźników podobieństwa szeregów czasowych

A comparative analysis of water meter data recording systems using time series similarity measures

TOMASZ CICHON, JUSTYNA STAŃCZYK, EWA BURSZTA-ADAMIAK

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.10.03

Opomiarowanie poboru wody jest obecnie coraz częściej wspierane przez systemy automatycznego odczytu wskaźników wodomierzy AMR (ang. Automatic Meter Reading). Oznacza to zastosowanie elektronicznych modułów do rejestracji i transmisji danych, które, w zależności od rozwiązania, mogą również umożliwiać wstępną analizę pomiarów w urządzeniu. Artykuł zawiera analizę porównawczą rejestracji danych dotyczących konsumpcji wody w instalacji budynku mieszkalnego w zabudowie jednorodzinnej. Pomiar zużycia wody, realizowany za pomocą wodomierzy objętościowych o średnicy DN 20 i o współczynniku zakresu pomiarowego R160, które posłużyły jako źródło danych wejściowych do systemów rejestracji i transmisji. Analizie porównawczej, wykonywanej w ramach jednej instalacji i w tym samym przedziale czasu, poddano rejestracje zrealizowane za pośrednictwem dwóch różnych urządzeń, podłączonych do wodomierzy. Celem pracy jest określenie różnic w sposobie zapisu i przetwarzania informacji wynikających z zastosowania dwóch różnych systemów rejestracji oraz ocena przydatności i podobieństwa pozyskanych danych. Ponadto oceniono znaczenie zaobserwowanych różnic za pomocą wybranych miar podobieństwa szeregów czasowych. Badania wskazują wyraźną zmienność czasową w zużyciu wody o charakterze rytmu dobowego oraz w rozróżnieniu na dni robocze i weekendy. Różnice w rejestracjach wykonanych w interwałach minutowych mają znaczenie głównie w analizach zdarzeń krótkotrwałych i dynamiki przepływu, natomiast w ujęciu godzinowym oba analizowane systemy rejestracji danych wykazują wysoką zgodność i w badanych warunkach dają porównywalne wyniki, zwłaszcza w analizach bilansowych. Dłuższe okresy agregacji danych zmniejszają wpływ różnic w sposobach próbkowania i rejestracji danych i zwiększają zgodność wyników obu sposobów rejestracji, co potwierdzono w niniejszych badaniach.

Słowa kluczowe: pobór wody, sieci wodociągowe, wodomierze, zdalny odczyt, inteligentne systemy pomiarowe

Water consumption is increasingly measured using automatic meter reading (AMR) systems. This involves the use of electronic modules for data recording and transmission, which, depending on the solution, may also enable preliminary analysis of measurements within the device. This paper presents a comparative analysis of water consumption data recording in a single-family house. Water consumption was measured using volumetric water meters with a diameter of DN 20 and a measuring range ratio of R160, and the resulting measurements served as input data for the recording and transmission systems. Recordings obtained from two different devices connected to the water meters were compared within the same water installation and over the same period. The aim of this study is to determine differences in the recording and processing of information resulting from the use of two different recording systems and to assess the usefulness and similarity of the acquired data. In addition, the significance of the observed differences was evaluated using selected time series similarity measures. The study reveals clear temporal variability in water consumption, characterized by a daily rhythm and differences between weekdays and weekends. Differences in recordings made at minute intervals are important primarily for the analysis of short-term events and flow dynamics. At the hourly aggregation level, both data recording systems show high agreement and yield comparable results under the tested conditions, especially in water balance analyses. Longer data aggregation periods reduce the impact of differences in sampling and data recording methods and improve agreement between the two recording approaches, as confirmed in this study.

Keywords: water consumption, water supply networks, water meters, remote reading, smart metering

dr inż. Tomasz Cichon ORCID: 0000-0002-4114-6220, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska, Autor korespondencyjny: e-mail: tomasz.cichon@pk.edu.pl; dr inż. Justyna Stańczyk ORCID: 0000-0002-5676-1787, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska, Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, Polska, e-mail: justyna.stanczyk@upwr.edu.pl; prof. dr hab. inż. Ewa Burszta-Adamiak ORCID: 0000-0003-3755-2047, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska, Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, Polska, e-mail: ewa.burszta-adamiak@upwr.edu.pl

Data zgłoszenia: 12.06.2026. Data przyjęcia: 23.09.2026. Data publikacji: 20.10.2026

Wprowadzenie

Postępująca cyfryzacja usług komunalnych nie omija również sektora wodociągowo-kanalizacyjnego. Obecnie branża wodociągowo-kanalizacyjna doświadcza intensywnej transformacji cyfrowej, co jest widoczne m.in. w przechodzeniu z modelu gospodarki wodomierzowej opartej na manualnych odczytach wodomierzy w stronę inteligentnych systemów opomiarowania SWM (ang. Smart Water Metering) [1]. Efektem zastosowania nowoczesnych, inteligentnych technologii jest wykorzystanie wodomierzy oraz modułów współpracujących z nimi do rejestracji danych. Proces ten jest kluczowy dla dokładności rozliczeń, ułatwienia wykrywania awarii, minimalizacji strat wody, a w konsekwencji optymalizacji dystrybucji wody i zapewnienia stabilności finansowej przedsiębiorstw [2-4]. Dodatkowo warto nadmienić, że wdrażanie inteligentnych technologii jest również odpowiedzią na współczesne wyzwania, z którymi przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne muszą sobie radzić w związku ze zmianą klimatu, niedoborami zasobów wodnych i zrównoważonym rozwojem [5].

Wdrożenie modułów radiowych (tzw. nakładek) dla przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych oraz zarządców nieruchomości to operacja złożona, która wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych, logistycznych oraz prawnych zarówno na etapie instalacji, jak i podczas późniejszej eksploatacji [1]. Z tych względów wprowadzanie systemu zdalnego odczytu u odbiorców na terenie miasta jest procesem wieloetapowym, wymagającym zarówno przygotowania technicznego, formalnego, jak i finansowego.

Dotychczas, poza standardowym rejestrowaniem zużycia wody z użyciem wodomierzy, pomiary natężenia przepływu lub sumarycznych wartości zużycia wody z wykorzystaniem nakładek na wodomierze, lub innych urządzeń pomiarowych były podejmowane również przez innych badaczy. Przykładowo, autorzy pracy [3] wykorzystywali nakładki impulsowe zamontowane na wodomierzach wolumetrycznych i porównali objętości zarejestrowane bezpośrednio przez wodomierze z wartościami uzyskanymi z opracowanych modeli w środowisku MATLAB/Simulink. Z kolei Naseri i in. [19, 23] analizowali dane dotyczące zużycia wody w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem nakładek oraz z użyciem algorytmów uczenia maszynowego. Dane te były walidowane poprzez porównanie z danymi z zewnętrznych inteligentnych urządzeń irygacyjnych [19, 23]. Bęlcik i Nowakowska [6] analizowali zgodność przebiegu krzywych wartości

rozbiórów wody rzeczywistych i prognozowanych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych typu perceptron wielowarstwowy (MLP; ang. Multilayer Perceptron), a Koral [7] wykorzystywał w badaniach wodomierz (wyposażony w nakładkę radiową) i przepływomierz elektromagnetyczny w celu wyznaczenia wielkości rozbieżności w bilansie wody dla każdej doby. Pomimo że każda z tych prac wykazuje dużą zgodność w wyznaczeniu natężeń przepływu przy użyciu różnych rozwiązań pomiarowych i predykcyjnych, to w publikacjach tych można dostrzec kilka ograniczeń. Badania [3] były prowadzone w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, co nie w pełni oddaje zmienność rozbiórów wody występującą w budownictwie mieszkaniowym. Z kolei Koral [7] analizował zużycie wody dla budynku wielorodzinnego, którego specyfika poboru wody jest zazwyczaj inna niż w zabudowie jednorodzinnej. Ponadto Koral [7] dostrzegł w swoich badaniach problem braków w odczytach radiowych, który bezpośrednio wpływał na wiarygodność bilansu wody i utrudniał precyzyjną identyfikację wzorców rozbiórów wody. Z tych względów montaż dwóch różnych nakładek na tej samej instalacji mógłby pozwolić na bezpośrednie porównanie ich odporności na zakłócenia sygnału i stabilność transferu w identycznych warunkach konstrukcyjnych. Porównanie dwóch urządzeń na tej samej instalacji ogranicza również wpływ różnic wynikających ze specyfiki konkretnego przyłącza czy fluktuacji ciśnienia, o których wspominał w swoich badaniach [8]. Co więcej, jak zauważają Bęlcik i Nowakowska [6], modele matematyczne wykorzystywane w prognozach zużycia wody mają ograniczoną zdolność do odwzorowania nagłych, krótkookresowych zmienności (wzrostów lub spadków zapotrzebowania), co wynika z deterministyczno-stochastycznego charakteru tych rozbiórów. Z tych względów większość analiz prowadzonych przez innych autorów skupia się na danych dobowych, pozwalających na zamaskowanie błędów pozwalających na agregację ekstremalnych wartości chwilowych poborów wody [6, 7, 9, 10].

W praktyce zazwyczaj dąży się do zachowania kompatybilności posiadanej floty wodomierzy, czyli do ujednolicenia typów i klas metrologicznych wodomierzy w ramach jednego obszaru, strefy DMA czy punktu bilansowego. Takie podejście jest niezbędne dla późniejszego precyzyjnego rozliczania odbiorców. Jednakże nakładki nie są uniwersalne, tzn. można je zamontować wyłącznie na wodomierzach fabrycznie przystosowanych do współpracy z modułami radiowymi, a w przypadku

starszych urządzeń często konieczna jest wymiana wodomierza na nowy kompatybilny model. Na etapie wyboru nakładki na wodomierz niemniej istotne jest zapewnienie rzetelności rozliczeń i dokładności pomiaru przez zainstalowany moduł radiowy. Moduły zwykle zapisują dane co godzinę i na obecnym etapie wdrożeń taka częstotliwość zapisu stała się standardem [4, 10]. Dodatkowo wiele rozwiązań pozwala na zdalną zmianę konfiguracji parametrów, a w razie potrzeby umożliwia rejestrację z częstotliwością raz na minutę.

Jednym z głównych powodów wprowadzania nakładek jest chęć minimalizacji tzw. uchybu (nazywanego również stratą bilansową lub różnicą w bilansowaniu wody) oraz eliminacja błędów wynikających z niejednoczesności odczytów [7]. Jednak rejestracja z większą częstotliwością, np. raz na minutę, pozwala na rozszerzenie możliwości i zakresu zastosowań, co może być przydatne z punktu widzenia rosnących potrzeb w zarządzaniu infrastrukturą wodociągową [11].

W odpowiedzi na wskazane luki badawcze artykuł podejmuje analizę porównawczą dwóch niezależnych sposobów rejestracji zużycia wody w tym samym przedziale czasu, wykonanych na zasilaniu wybranej instalacji wodociągowej tego samego budynku. Rejestrowane dane pochodzą z dwóch wodomierzy tego samego typu, na których zabudowano i podłączono dwa różne systemy rejestracji danych.

Tematyka poruszana w artykule jest aktualna, gdyż od 1 stycznia 2027 roku zarówno krajowe, jak i unijne wymogi prawne nakładają obowiązek instalacji urządzeń pomiarowych ze zdalnym odczytem dla ciepłej wody użytkowej [12], a stosowanie rozwiązań elektronicznych w przypadku pozostałych wodomierzy służy podniesieniu efektywności procesu odczytów i pozyskaniu dodatkowych danych. Wyniki prezentowanych analiz mogą pomóc zarządcom sieci wodociągowej w podjęciu decyzji dotyczącej wyboru odpowiedniego modułu rejestrującego, a także wskazują na praktyczną użyteczność danych uzyskiwanych ze zdalnych odczytów w bardziej zaawansowanych analizach.

Opis obszaru badań

Badania opisane w artykule prowadzono na podstawie danych o konsumpcji wody w budynku jednorodzinnym. W instalacji wodnej badanego budynku zainstalowano szeregowo dwa wodomierze, pracujące w konsolach wodomierzowych, bezpośrednio obok siebie w tym samym pomieszczeniu i na tym samym przewodzie

przyłłączeniowym. Badany budynek zamieszkiwały cztery osoby dorosłe tworzące jedno gospodarstwo domowe, które w czasie rejestracji przez większość czasu regularnie korzystały z wody w domu. Rejestracje były prowadzone w okresie od 2 do 17 lutego 2026 roku (15 dób).

Pomiar realizowano za pomocą dwóch wodomierzy objętościowych tego samego typu, o średnicy DN 20 i współczynniku zakresu pomiarowego R160. Zdjęcie wodomierzy w instalacji budynku wraz z podłączonymi rejestratorami przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok wodomierzy z podłączonymi rejestratorami
Fig. 1. View of the water meters with connected recorders

Instalacja wodna badanego budynku jest wyposażona w standardowe urządzenia używane w gospodarstwie domowym, tj. zmywarkę do naczyń oraz pralkę. W budynku znajdują się trzy łazienki, z których dwie są wyposażone w prysznice, a trzecia w wannę. Ponadto w budynku znajduje się pięć umywalk i jeden zlewozmywak.

Przed rozpoczęciem badań zweryfikowano pełną sprawność wszystkich podłączonych urządzeń oraz szczelność całej instalacji budynku. Przez cały okres rejestracji w instalacji budynku nie stwierdzono wycieków, a cały pobór wody był związany wyłącznie ze zużyciem przez mieszkańców lub z pracą urządzeń podłączonych do instalacji wodnej.

Charakterystyka systemu rejestracji danych

Akwizycję danych o zużyciu wody realizowano za pomocą dwóch urządzeń do rejestracji i transmisji danych, zainstalowanych jako elektroniczne nakładki wykrywające ruch mechanizmów wodomierzy objętościowych (dalej: moduły P i S). Czujniki nakładek, służące do detekcji ruchu mechanizmu wodomierza, umieszczono wokół wskaźnika, którego pełny obrót odpowiada przepływowi 1 l wody. Oznacza to, że standardowo generowany jest impuls odpowiadający przepływowi 1 l wody. Na pierwszym wodomierzu zainstalowano nakładkę P służącą do zdalnego odczytu wskaźnika i transmisji danych w technologii LTE Cat-M [13]. Jest to nakładka

wyposażona w elektroniczną kartę SIM i przekazująca dane z wykorzystaniem infrastruktury operatora telefonii komórkowej. Standardowe ustawienia tego typu nakładki powodują zapis informacji o przyroście wskazania licznika wodomierza raz na godzinę. Ponieważ największy pobór energii występuje podczas uruchamiania modułu komórkowego i transmisji danych, transmisję przeprowadzano raz na dobę, w godzinach nocnych. Przez pozostałą część doby moduł transmisyjny pozostawał uśpiony. Na czas badań konfigurację modułu zmieniono zdalnie na zapis co 1 min.

Na drugim wodomierzu zainstalowano nakładkę S – nadajnik impulsów producenta wodomierzy. Nadajnik podłączono do rejestratora impulsów, który zapisywał dane ze zmienną częstotliwością zależną od czasu pomiędzy kolejnymi impulsami. Rejestrator S jest urządzeniem działającym lokalnie, z przewodowym odczytem danych.

Metodyka i zakres badań

Wstępne przetwarzanie danych pomiarowych

Wstępne przetwarzanie danych pomiarowych (pre-processing) polegało na synchronizacji szeregów czasowych zużycia wody zarejestrowanych za pośrednictwem urządzeń rejestrujących P oraz S. Pliki pochodzące z rejestracji poboru wody za pośrednictwem urządzenia P, o rozdzielczości 1 min, zawierały znacznik czasu oraz zużycie wody z dokładnością do 0,001 m³. Z kolei baza danych pomiarowych urządzenia S zawierała zapis chwilowego natężenia przepływu wody wyrażonego w m³/h w odniesieniu do czasu, z dokładnością do 1 s. Ponadto dla urządzenia rejestrującego S dysponowano pomiarami godzinowymi średniej wartości natężenia przepływu wody (m³/h). Przed rozpoczęciem właściwej analizy danych należało zweryfikować, czy istnieją przesunięcia czasowe pomiędzy systemami rejestracji P i S. W odniesieniu do danych minutowych wstępnie określono, czy istnieją rozbieżno-

ści pomiędzy danymi zawierającymi przepływ chwilowy urządzenia S a typowo impulsowym sposobem rejestracji zużycia wody dla systemu P, co jest w pełni uzasadnione ze względu na charakterystykę pomiaru, kwantyzację impulsową oraz sposób rejestracji przepływu chwilowego. Następnie dane urządzenia S zagregowano do wartości minutowych, po czym określono godzinowy rozkład zużycia wody. Podobnie postąpiono z danymi minutowymi urządzenia P, dotyczącymi objętości pobranej wody w ciągu każdej minuty, poprzez ich agregację do wartości godzinowych. Ostatecznie w wyniku wstępnego przetwarzania danych otrzymano minutowe i godzinowe szeregi czasowe zużycia wody rejestrowane za pośrednictwem dwóch odmiennych systemów.

Wskaźniki podobieństwa szeregów czasowych

Wstępną analizę szeregów czasowych przeprowadzono na podstawie oceny rozkładu zużycia wody w ciągu każdej godziny w dobie, w zależności od poszczególnych dni tygodnia, a także w odniesieniu do rejestracji minutowych. Dla każdej godziny doby wyznaczono rozkład natężenia przepływu za pomocą wykresów pudełkowych (box plot), które przedstawiają medianę, kwartyle oraz wartości odstające. Analogicznie zgrupowano dane według dni tygodnia i przedstawiono ich rozkład za pomocą wykresów pudełkowych, co umożliwiło ocenę typowego poboru wody w dni robocze i w weekendy. Ponadto zidentyfikowano typowy profil dobowy zużycia wody dla wybranego obiektu badawczego w odniesieniu do dni roboczych oraz wolnych od pracy. Oprócz wizualnej oceny krzywych zużycia wody dla systemów rejestracji P i S dokonano analizy podobieństwa szeregów czasowych z podziałem na dni robocze i weekendy z wykorzystaniem współczynnika korelacji Pearsona, pierwiastka błędu średniokwadratowego RMSE (ang. Root Mean Square Error) oraz miary DTW (ang. Dynamic Time Warping), umożliwiającej porównanie dwóch szeregów czasowych z uwzględnieniem ich możliwego przesunięcia. Do obliczeń DTW zastosowano algorytm zaimplementowany w bibliotece `dtadistance` w środowisku Python, zwracający skumulowaną odległość euklidesową wyznaczoną wzdłuż optymalnej ścieżki wyrównania czasowego. Analizę przeprowadzono na bezwzględnych wartościach średnich przepływów godzinowych, bez ich wcześniejszej normalizacji. Optymalną ścieżkę dopasowania wyznaczano bez stosowania dodatkowych ograniczeń okna czasowego.

Do oceny zgodności dwóch metod pomiarowych (P i S) w odniesieniu do szeregów godzinowych i minutowych wykorzystano także metodę Blanda-Altmana, której istotą jest analiza różnic pomiędzy parami pomiarów wykonanych dwoma metodami dla tego samego typu obserwacji. Podejście to jest bardzo często wykorzystywane w naukach medycznych, w tym w analizach pomiarów przepływu i ciśnienia krwi, a także w badaniach laboratoryjnych [14]. W branży technicznej metodę Blanda-Altmana zastosowano w odniesieniu do pomiaru natężenia przepływu gazu [15]. Dla każdej pary pomiarów oblicza się różnicę oraz średnią obserwowanej wielkości, a następnie przedstawia się je na wykresie, gdzie oś pozioma to średnia, a oś pionowa to różnica pomiarów (w tym przypadku pomiędzy rejestracją P a S). Kluczowymi parametrami są średnia różnica (tzw. bias), informująca o ewentualnym błędzie systematycznym, oraz granice zgodności LoA (ang. Limits of Agreement), wyznaczane jako $\text{bias} \pm 1,96$ odchylenia standardowego różnic, zgodnie z równaniami (1) i (2), obejmujące około 95% rozbieżności. Oznacza to, że jeżeli bias jest bliski zeru, brak jest istotnego przesunięcia pomiędzy wynikami obu metod. Z kolei granice LoA wskazują zakres, w którym powinno znajdować się około 95% różnic pomiędzy pomiarami wykonywanymi obiema metodami.

$$\text{GórnaLoA} = \bar{d} + 1,96 \cdot SD_d \quad (1)$$

$$\text{DolnaLoA} = \bar{d} - 1,96 \cdot SD_d \quad (2)$$

gdzie:

$\bar{d}$ – średnia różnica pomiędzy pomiarami wykonanymi za pośrednictwem dwóch systemów (tzw. bias),

SD_d – odchylenie standardowe różnic pomiędzy pomiarami,

1,96 – współczynnik wynikający z założenia normalnego rozkładu różnic (obejmuje 95% obserwacji).

Analiza Blanda-Altmana [16] umożliwia także wykrycie zależności między wielkością różnicy a poziomem mierzonej wartości, np. błędą proporcjonalnego, gdy różnice rosną wraz ze wzrostem wartości pomiaru. Celem zastosowanej metody jest określenie, czy dwa systemy rejestracji (P i S) są wystarczająco zgodne, w przeciwieństwie do zwykłej korelacji, która ocenia jedynie zależność między wynikami. Ocena zgodności metod rejestracji danych powinna opierać się nie tylko na korelacji, ale przede wszystkim na analizie różnic, ponieważ osiągnięcie małej wartości bias i wąskich LoA może wskazywać na dobrą zgodność, o ile granice te mieszczą się w uprzednio określonym zakresie akceptacji [16].

Selekcja zdarzeń poboru wody

W kolejnym etapie badań, na podstawie minutowych szeregów czasowych pochodzących z systemów rejestracji P i S, przeprowadzono analizę pojedynczych zdarzeń poboru wody. W ramach badań opracowano algorytm służący automatycznej identyfikacji oraz analizie zdarzeń jednoczesnego przepływu rejestrowanego w dwóch systemach, co umożliwiło wykrywanie epizodów poboru wody oraz ich dalszą charakterystykę czasową. Opracowana metodyka opiera się na przetwarzaniu minutowych szeregów czasowych zawierających znaczniki czasu oraz wartości natężenia przepływu rejestrowane w dwóch punktach pomiarowych. Pierwszym etapem było przygotowanie danych. Znaczniki czasu przekształcono w ujednolicony format daty i czasu, a rekordy uporządkowano chronologicznie, aby zapewnić poprawność analizy sekwencyjnej. Dla każdego kroku czasowego wyznaczano zmienną logiczną informującą, czy w danym momencie występował jednoczesny przepływ w obu systemach rejestracji.

Drugi etap obejmował detekcję zdarzeń. Zdarzenie definiowano jako ciągły przedział czasu, w którym oba przepływy przekroczyły ustalony próg aktywności wynoszący $0,0001 \text{ m}^3/\text{min}$. Stan aktywności odnosił się bezpośrednio do fizycznej rejestracji przepływu wody w obu punktach pomiarowych jednocześnie. Zastosowano algorytm sekwencyjny działający w logice automatu stanów, rozróżniający stan aktywności i nieaktywności. Rozpoczęcie zdarzenia definiowano jako przejście ze stanu nieaktywnego do aktywnego. W celu eliminacji zakłóceń pomiarowych oraz krótkotrwałych przerw w sygnale wprowadzono mechanizm tolerancji przerw: krótkie spadki przepływu (do dziesięciu kolejnych próbek) nie powodowały zakończenia zdarzenia. Zdarzenie uznano za zakończone dopiero po przekroczeniu dopuszczalnej długości przerwy (w tym przypadku 10 kolejnych próbek). Dla każdego wykrytego epizodu zapisywano indeksy jego początku i końca. W ostatnim etapie przeprowadzono wizualizację wyników. Dla każdego zidentyfikowanego zdarzenia wyznaczano rozszerzone okno czasowe obejmujące okres przed i po zdarzeniu, co umożliwiło analizę kontekstu czasowego. W obrębie tego okna generowano wykresy przebiegów obu sygnałów przepływu w funkcji czasu. Wizualizacje pozwalały na jakościową ocenę dynamiki zjawiska, porównanie przebiegów zarejestrowanych za pośrednictwem obu systemów oraz weryfikację poprawności detekcji zdarzeń. W pełnej wersji analizy dodano także warunek odseparowania zdarzeń obejmujących mniej niż dwie próbki sygnału.

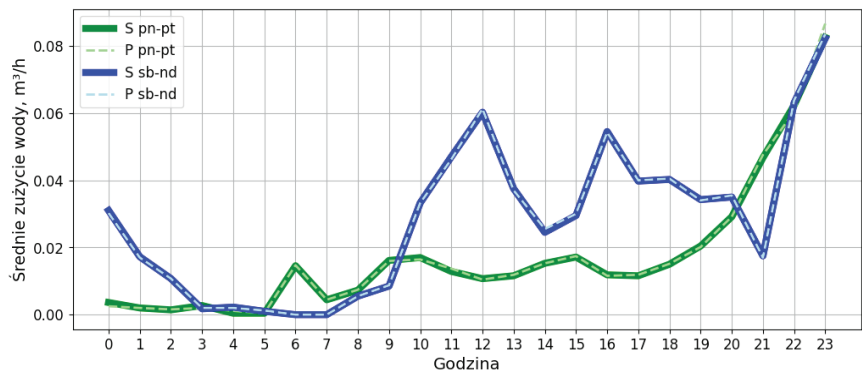
Ostatecznie wyodrębniono 247 zdarzeń poboru wody przez mieszkańców, obejmujących co najmniej dwa znaczniki czasu. Zidentyfikowano również 80 epizodów obejmujących tylko jedną próbkę pomiarową (tj. 1-minutową). Odseparowanie jednopróbkowych zdarzeń było konieczne w celu określenia metryk opisujących zależności obu sygnałów, które w większości wymagają co najmniej dwóch punktów danych.

Wyniki badań i dyskusja

Agregacja danych

Krzywe na rys. 2 przedstawiają średnie godzinowe wartości zużycia wody w cyklu dobowym (od godz. 00:00 do 23:00) zarejestrowane przez systemy P i S z podziałem na dni robocze i weekendy. Widoczna jest wyraźna zmienność czasowa o charakterze rytmu dobowego, typowa dla zwyczajów użytkowania wody zależnych od aktywności mieszkańców. Krzywe zużycia wody wykazują klasyczny dobowy profil zapotrzebowania z trzema charakterystycznymi fazami zwiększonego poboru: poranną, południową i wieczorną. Największe wartości zużycia obserwuje się w godzinach wieczornych (powyżej $0,08 \text{ m}^3/\text{h}$), natomiast najmniejsze – w godzinach nocnych. Dobowe profile zużycia wody wykazują istotne różnice pomiędzy dniami roboczymi a weekendami, co wynika z odmiennej organizacji aktywności użytkowników. W weekendy zużycie wody jest wyraźnie większe (w godzinach od 09:00 do 20:00), a jego maksima są wyraźniej zaznaczone. Wzrost poranny, w badanym okresie pojawiający się w dni robocze o godz. 06:00, następuje później, co odzwierciedla przesunięcie aktywności na inne godziny. W dni robocze zużycie w ciągu dnia jest bardziej równomiernie rozłożone i nie przekracza $0,02 \text{ m}^3/\text{h}$, a maksimum popołudniowe ulega osłabieniu. Szczyt wieczorny około godziny 22:00 pozostaje obecny w obu przypadkach, jednak podczas dni wolnych od pracy około godziny 21:00 obserwowany jest spadek zużycia wody.

W przypadku obu sposobów rejestracji obserwuje się zbliżony kształt przebiegów, co wskazuje na silną współzależność rejestrowanych danych i poprawną synchronizację pomiarów. Różnice pomiędzy seriami są niewielkie. Zarówno podczas dni roboczych, jak i weekendów chwilowe różnice między rejestracjami są praktycznie niezauważalne, a przebiegi są wygładzone i niemal równoległe. Analiza porównawcza wskazuje na wysoką zgodność trendów czasowych, niewielkie różnice amplitudowe oraz brak przesunięć fazowych.



Rys. 2. Dobowe profile poboru wody rejestrowane za pośrednictwem systemów P i S z rozróżnieniem na dni robocze i weekendy
Fig. 2. Daily water consumption profiles recorded via P and S systems, differentiated between weekdays and weekends

Zestawienie miar statystycznych (tab. 1) wskazuje na bardzo wysokie podobieństwo profili zużycia wody rejestrowanych za pośrednictwem systemów P i S, zarówno w dniach roboczych, jak i w weekendy. Współczynnik korelacji Pearsona osiąga wartości bliskie jedności ($r = 0,999$ dla dni roboczych oraz $r = 1,000$ dla weekendów), co świadczy o niemal idealnej zgodności kształtu przebiegów czasowych i silnej zależności między seriami pomiarowymi. Oznacza to, że zmiany zużycia rejestrowane przez oba urządzenia zachodzą synchronicznie i z bardzo podobną dynamiką. Błąd średniokwadratowy RMSE ($0,001 \text{ m}^3/\text{h}$) w obu przypadkach wskazuje na znikomą różnicę wartości bezwzględnych przepływu. Tak niski poziom błęd oznacza wysoką precyzję pomiaru oraz bardzo dobrą zgodność amplitud rejestrowanych sygnałów.

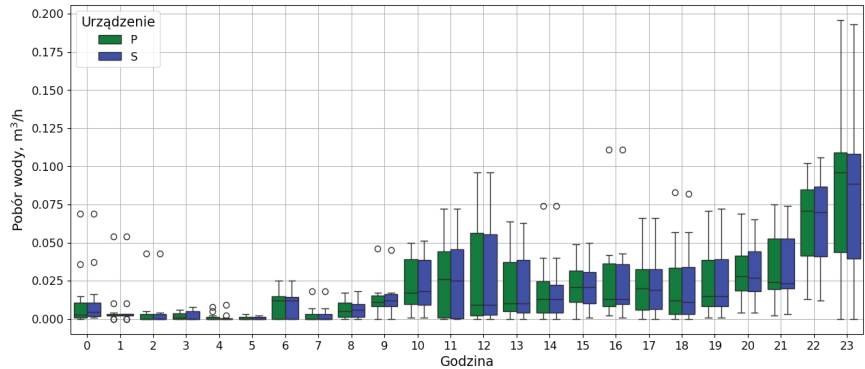
Tabela 1. Porównanie miar podobieństwa profili zużycia wody między systemami P i S podczas dni roboczych i weekendów
Table 1. Comparison of similarity measures for water consumption profiles recorded by systems P and S on weekdays and weekends

Profil	Współczynnik korelacji, r	RMSE, m^3/h	DTW, m^3/h
Dni robocze	0,999	0,001	0,005
Weekendy	1,000	0,001	0,003

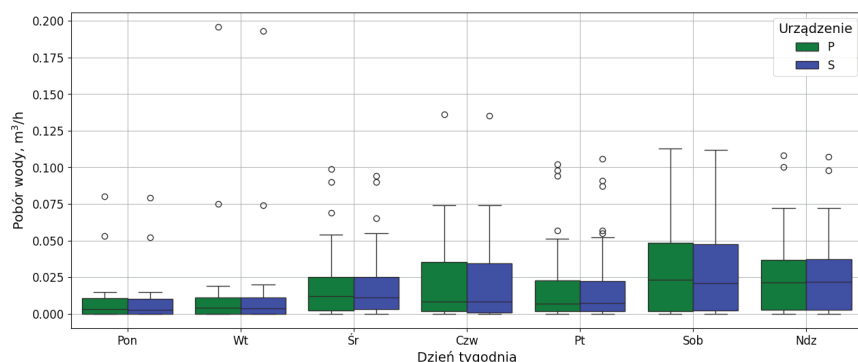
Miara DTW, wyrażona jako skumulowana odległość euklidesowa dla nienormalizowanych profili przepływu i uwzględniająca ewentualne lokalne przesunięcia czasowe, również przyjmuje bardzo niskie wartości ($0,005 \text{ m}^3/\text{h}$ w dni robocze oraz $0,003 \text{ m}^3/\text{h}$ w weekendy). Wynika to z faktu, że DTW uwzględnia nieliniowe dopasowanie czasowe sygnałów, przez co jego wartość zależy nie tylko od różnic amplitudowych, ale również od struktury czasowej przebiegów. Niemal zerowe wartości DTW wskazują na minimalne różnice w synchronizacji sygnałów oraz niemal identyczny przebieg czasowy zużycia. Niższa wartość DTW w weekendy sugeruje

jeszcze większą zgodność czasową profili niż w dniach roboczych.

Na rysunku 3 przedstawiono analizę rozkładu zużycia wody rejestrowanego przez urządzenia P i S w ujęciu godzinowym. Rozkłady godzinowe wskazują na silną zmienność zużycia w ciągu doby. W godzinach nocnych (od około 00:00 do 05:00) mediany poboru pozostają bardzo niskie (bliskie $0 \text{ m}^3/\text{h}$), a zmienność jest ograniczona, co odpowiada minimalnemu zużyciu wody. Widoczne pojedyncze wartości odstające sugerują incydentalne zdarzenia, co może być związane np. z nocnym cyklem pracy zmywarki lub pralki. Od godzin porannych (od 06:00 do 09:00) obserwuje się stopniowy wzrost mediany oraz rozszerzanie rozstępu międzykwartylowego, co świadczy o zwiększonej aktywności użytkowników. W godzinach 10:00-11:00 występuje wyraźna intensyfikacja poboru, ponieważ rośnie zarówno poziom mediany (nawet do $0,025 \text{ m}^3/\text{h}$), jak i zmienność, co wskazuje na częstsze i bardziej zróżnicowane epizody zużycia. W godzinach popołudniowych (od 14:00 do 18:00) utrzymuje się umiarkowany poziom zużycia przy nadal podwyższonej zmienności. Największe wartości median (dochodzące do $0,09 \text{ m}^3/\text{h}$) oraz najszerszy zakres zmienności obserwuje się wieczorem (od 19:00 do 23:00).



Rys. 3. Godzinowy rozkład poboru wody rejestrowany przez urządzenia pomiarowe P i S
Fig. 3. Hourly distribution of water consumption recorded by measuring devices P and S



Rys. 4. Rozkład poboru wody w poszczególnych dniach tygodnia rejestrowany przez urządzenia pomiarowe P i S
Fig. 4. Distribution of water consumption on specific days of the week recorded by measuring devices P and S

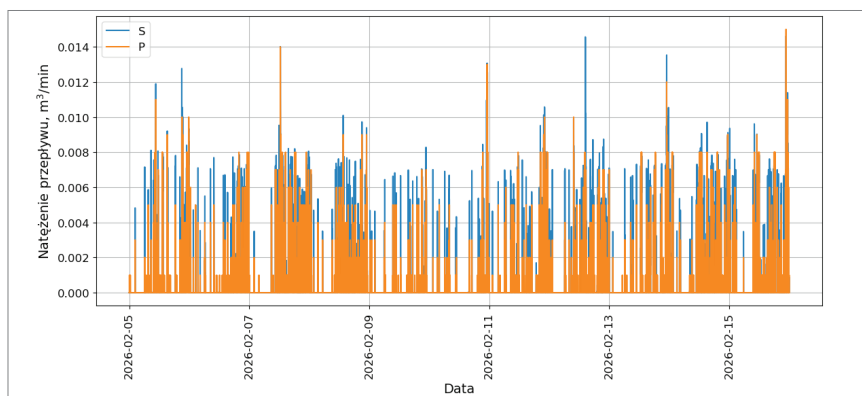
Minutowe rejestracje zużycia wody

Poniżej przedstawiono ocenę zgodności pomiarów natężenia przepływu wody zarejestrowanych przez urządzenia P i S na podstawie danych minutowych oraz wyniki analizy przeprowadzonej metodą Blanda-Altmana. Minutowe szeregi czasowe zaprezentowane na rysunku 5 wskazują na wysokie podobieństwo przebiegów chwilowego natężenia przepływu wody. Zakres rejestrowanych wartości mieści się głównie w przedziale od 0 do 0,010 m³/min, z epizodycznymi pikami do około 0,015 m³/min. Zdarzenia przepływu mają charakter impulsowy i krótkotrwały, co jest typowe dla instalacji wodnych, w których obserwuje się nieregularny pobór. Widoczna jest dobra synchronizacja zdarzeń, tzn. maksima i minima przepływu pojawiają się w obu torach pomiarowych jednocześnie, co wskazuje na brak istotnych opóźnień rejestracji. Ponadto w przypadku rejestracji za pośrednictwem urządzenia P uwidacznia się kwantyzacja pomiaru do objętości 1 l pobranej wody, co jest widoczne zwłaszcza w zakresie niskich wartości przepływu (0,001 m³/min).

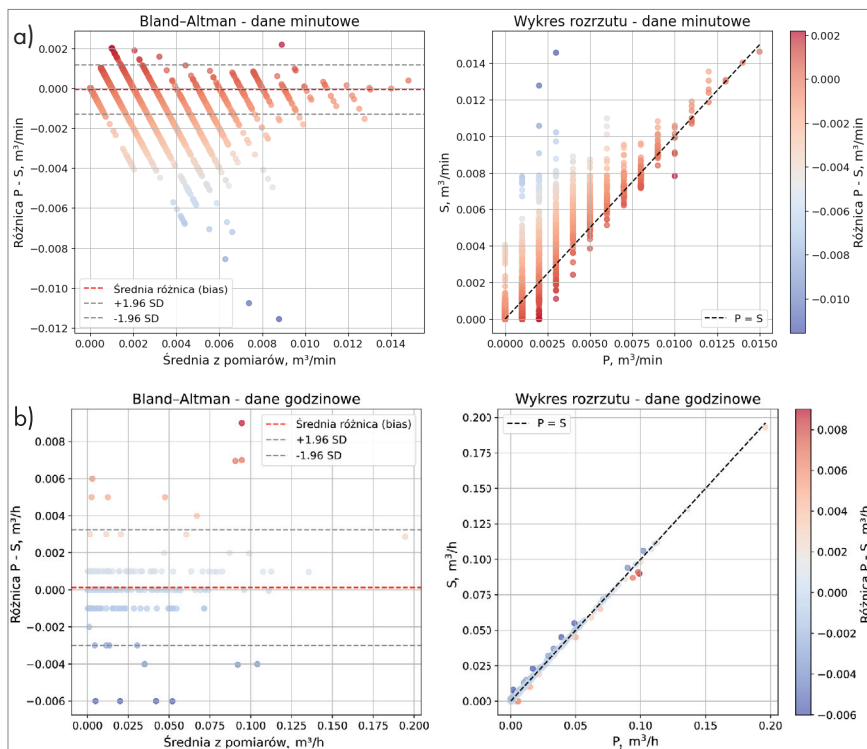
Ocena zgodności metod pomiarowych wykonana analizą Blanda-Altmana (rys. 6a i tab. 2) dla danych minutowych wskazuje na bardzo mały błąd systematyczny, o czym świadczy bliskie zeru usytuowanie większości punktów. Zaobserwowany nieznaczny trend ujemny przy niższych przepływach sugeruje, że w tym zakresie urządzenie S może mierzyć minimalnie większe wartości niż P, jednak różnice są praktycznie pomijalne. Średnia różnica P – S (bias) wynosi –0,000073 m³/min, co potwierdza nieznaczną tendencję do niższych wskazań urządzenia P względem S. Wartość ta jest pomijalna w sensie bezwzględny i stanowi mniej niż 1% typowych minutowych natężeń przepływu, co wskazuje na bardzo dobrą zgodność szeregów czasowych. Błąd średniokwadratowy RMSE równy 0,000635 m³/min potwierdza niewielką skalę różnic chwilowych. Granice zgodności Blanda-Altmana

mieszczą się w przedziale od –0,001310 do 0,001165 m³/min, co daje szerokość przedziału równą 0,002475 m³/min. Oznacza to, że 95% różnic między pomiarami zawiera się w bardzo wąskim zakresie względem amplitudy obserwowanych przepływów.

Większość obserwacji mieści się w granicach zgodności wyznaczonych metodą Blanda-Altmana, jednak widoczna jest pewna liczba punktów przekraczających dolną granicę przedziału. Wskazuje to na sporadyczne występowanie większych różnic pomiędzy pomiarami obu urządzeń,



Rys. 5. Minutowe szeregi czasowe poboru wody dla rejestracji P i S
Fig. 5. Minute water consumption time series for P and S recordings



Rys. 6. Wykresy Blanda-Altmana oraz wykresy rozrzutu dla danych minutowych i godzinowych
Fig. 6. Bland-Altman plots and scatter plots for minute and hourly data

Tabela 2. Metryki zgodności systemów rejestracji danych dla agregacji minutowej i godzinowej
Table 2. Data recording system agreement metrics for minute and hourly aggregation

Agregacja	Bias	RMSE	R ²	Górna LoA	Dolna LoA
Minutowa	–0,000073	0,000635	0,736	0,001165	–0,001310
Godzinowa	0,000121	0,001600	0,997	0,003248	–0,003006

szczególnie w zakresie bardzo małych przepływów. Rozrzut punktów, choć mniejszy przy większych przepływach, świadczy o tym, że urządzenia mierzą podobne wartości zużycia wody, ale nie identycznie, a widoczne pionowe pasma punktów wynikają z efektu kwantowanych danych dyskretnych (urządzenie P).

Jednocześnie współczynnik determinacji $R^2 = 0,736$ wskazuje na umiarkowane dopasowanie w skali minutowej. Wartość ta jest wyraźnie niższa niż w agregacji godzinowej (tab. 2), co należy wiązać z dużą zmiennością krótkookresową, impulsowym charakterem poboru oraz większym wpływem szumu pomiarowego przy małych natężeniach przepływu.

Agregacja danych do przedziałów godzinowych (rys. 6b) prowadzi do wyraźnej poprawy zgodności metrologicznej. Średnia różnica $P - S$ zmienia znak i wynosi $0,000121 \text{ m}^3/\text{h}$, co wskazuje na praktyczny brak błędu systematycznego po uśrednieniu. Wartość ta jest znikoma względem zakresu godzinowych przepływów sięgających maksymalnie około $0,20 \text{ m}^3/\text{h}$. Współczynnik determinacji wzrasta do $R^2 = 0,997$, co oznacza niemal idealne dopasowanie liniowe i bardzo wysoką spójność pomiarów obu urządzeń. Błąd RMSE wynosi $0,001600 \text{ m}^3/\text{h}$ i pozostaje niewielki w relacji do amplitudy sygnału. Granice zgodności mieszczą się w przedziale od $-0,003006$ do $0,003248 \text{ m}^3/\text{h}$, a szerokość przedziału ($0,006254 \text{ m}^3/\text{h}$) wskazuje na małą niepewność względną w analizach bilansowych. Wykresy rozrzutu potwierdzają niemal idealne pokrywanie się punktów z linią zgodności $P = S$ oraz brak trendu systematycznego.

Zaobserwowana poprawa zgodności po agregacji czasowej wynika z redukcji wpływu błędów losowych, wygładzania krótkotrwałych fluktuacji oraz ograniczenia wpływu szumu pomiarowego. Różne interwały próbkowania wpływają na ocenę zgodności metod, wartości błędu systematycznego, RMSE oraz LoA. W konsekwencji różnice minutowe mogą mieć znaczenie głównie w analizach zdarzeń krótkotrwałych i dynamiki przepływu, natomiast w ujęciu godzinowym urządzenia można traktować jako metrologicznie równoważne i zamienne w analizach bilansowych. Poprawa zgodności i dokładności wyznaczania wzorców zużycia wody po zastosowaniu agregacji czasowej została również udokumentowana w innych pracach, m.in. [4, 19]. Jak wykazano w badaniach [20], dłuższe okresy obserwacji zmniejszają wpływ błędu próbkowania i poprawiają zgodność metody, co potwierdzono w niniejszych badaniach, uzyskując lepsze parametry zgodności (wyższe R^2 , mniejsze RMSE) po agregacji minut do godzin.

Ponadto przy krótkich interwałach (wysokiej częstotliwości danych) możliwe jest lepsze odwzorowanie impulsowych zmian przepływu, ale błędy systematyczne zależą także od fazy i długości obserwacji. Jednym z istotnych źródeł takich rozbieżności jest interwał próbkowania, czyli odstęp czasu między kolejnymi odczytami. Gdy sygnał przepływu ma charakter impulsowy i szybkozmenny, jak w przypadku chwilowego zużycia wody rejestrowanego za pośrednictwem urządzenia S, nawet niewielkie przesunięcie momentu odczytu może prowadzić do istotnych różnic wartości. Jeśli jedno urządzenie rejestruje pomiar chwilę wcześniej, a drugie chwilę później, mogą one znaleźć się w różnych fazach tego samego zdarzenia. W efekcie powstaje różnica nie dlatego, że urządzenia mierzą inaczej, lecz dlatego, że próbują sygnał w nieco innych momentach i w inny sposób (rejestrację za pomocą systemu P są obciążone kwantyzacją pomiaru). Agregacja danych w dłuższych przedziałach czasowych (np. godzinowych) zmniejsza ten efekt, ponieważ redukuje wpływ chwilowych przesunięć fazowych i krótkotrwałych pików przepływu. W konsekwencji różnice między metodami maleją, a zgodność pomiarowa ulega poprawie.

Uzyskane wyniki pozostają w zgodzie z podstawami oceny zgodności metod pomiarowych opisanymi w literaturze, gdzie podkreśla się, że o spójności metod decyduje mała wartość błędu systematycznego i wąskie granice zgodności, a nie sama korelacja. W konsekwencji obserwowana poprawa zgodności po agregacji danych do przedziałów godzinowych wynika z ograniczenia wpływu niskich, niestabilnych przepływów oraz redukcji krótkookresowego szumu pomiarowego.

Analiza zdarzeń poboru wody

Wybrane spośród 247 analizowanych zdarzeń poboru wody, zarejestrowanych równoległe przez urządzenia P i S, przedstawiono na rys. 7. Przedstawione przebiegi umożliwiają ocenę zgodności dynamicznej pomiarów w krótkich skalach czasowych oraz identyfikację charakterystyk urządzeń sanitarnych. W przypadku zdarzenia przedstawionego na rys. 7a (wanna) obserwowany jest krótkotrwały, umiarkowany pobór o charakterze napełniania przerywanego (prawdopodobnie najpierw ciepła woda, a następnie zimna). Maksymalne natężenie przepływu zarejestrowane przez urządzenie S osiąga około $0,0058 \text{ m}^3/\text{min}$, podczas gdy P wskazuje wartość niższą, około $0,0040 \text{ m}^3/\text{min}$. Oba przebiegi wykazują zgodną strukturę czasową: szybki wzrost przepływu, krótkie

obniżenie około połowy epizodu, a następnie ponowny wzrost i wygasanie sygnału. Czas trwania zdarzenia wynosi około 7-8 minut. W zdarzeniu przedstawionym na rys. 7b (prysznic) rejestrowany jest bardziej stabilny i długotrwały pobór ciągły. Maksymalne natężenie przepływu wynosi około $0,010 \text{ m}^3/\text{min}$ dla P oraz około $0,009 \text{ m}^3/\text{min}$ dla S, a więc różnica maksymalna nie przekracza $0,001 \text{ m}^3/\text{min}$. W fazie ustalonej oba urządzenia wskazują zbliżone wartości w zakresie $0,009 - 0,010 \text{ m}^3/\text{min}$. Czas trwania epizodu wynosi około 9 minut. W końcowej fazie obserwowany jest szybszy spadek wskazań P (do około $0,004 \text{ m}^3/\text{min}$), podczas gdy S utrzymuje wyższy poziom (około $0,008 \text{ m}^3/\text{min}$), co może wskazywać na różnice w odpowiedzi samego rejestratora. Jest to przykład wysokiej zgodności pomiarowej zarówno pod względem amplitudy, jak i dynamiki sygnału. Otrzymane wartości zużycia wody podczas brania prysznica są zbliżone do tych identyfikowanych przez innych autorów. Zarówno w badaniach [21], jak i [22] szczytowe natężenie przepływu dla tej czynności identyfikowano na poziomie około $0,012 \text{ m}^3/\text{min}$. W badaniach prowadzonych w USA [23] średni czas trwania prysznica wynosił od 5,4 minuty (w domach „oszczędnych”) do 8,9 minuty (w domach o wysokim zużyciu). Inne dane z tego samego regionu [19] wskazują na medianę rzędu 5,8-6,0 minut, przy czym zauważono, że w bardzo niskich temperaturach (poniżej -10°C) czas ten ulega wydłużeniu. Z kolei dane dotyczące natężenia przepływu dla wanny są rzadko identyfikowane, gdyż wiele badań skupia się na prysznicach jako głównym punkcie czerpalnym w nowoczesnych łazienkach. Jednak w porównaniu z wynikami innych autorów czas kąpieli w wannie wykazany w niniejszych badaniach jest stosunkowo krótki. Zdarzenie przedstawione na rys. 7c (umywalka) ma charakter impulsowy. Różnice względne są tu największe mimo bardzo małych wartości bezwzględnych. Przebieg sygnału P ma postać dwóch wyraźnych impulsów rozdzielonych okresem braku przepływu, natomiast S rejestruje krótsze i słabsze epizody. Taki obraz jest typowy dla zdarzeń jednoimpulsowych, których łącznie zidentyfikowano 80 podczas całego okresu badawczego. Podobnie w badaniach [8] wykazano, że aż 95% wszystkich poborów trwało krócej niż 5 minut (co obejmowało głównie korzystanie z toalet i kranów). Zdarzenie przedstawione na rys. 6d (pralka) charakteryzuje się sekwencją krótkich, cyklicznych impulsów poboru. Maksymalne natężenia osiągają około $0,008 \text{ m}^3/\text{min}$ (P) i $0,007 - 0,008 \text{ m}^3/\text{min}$ (S), przy różnicach maksymalnych rzędu $0,001 \text{ m}^3/\text{min}$.

Struktura czasowa impulsów jest bardzo dobrze zachowana, tzn. momenty aktywacji przepływu są zsynchronizowane, a liczba cykli zgodna. Widoczne są jednak lokalne różnice amplitudy, zwłaszcza w początkowej fazie, gdy S notuje wyższe piki (około 0,006-0,007 m³/min) niż P (około 0,004-0,005 m³/min). Całkowity czas zdarzenia przekracza 2 godziny, co odpowiada typowemu cyklowi pracy urządzenia. Charakter impulsowy oraz wysoka zgodność czasowa wskazują na poprawną rejestrację zdarzeń dynamicznych przez oba systemy. Natomiast autorzy pracy [21] wykazali maksymalne natężenie przepływu w czasie używania pralki na poziomie nieco wyższym (0,0141 m³/min). Rozbieżności mogą wynikać z dużej liczby dostępnych modeli pralek na rynku polskim i rynkach zagranicznych oraz ze stosowanych programów prania (liczby cykli). Pralka, jak wykazali [4], może pobierać wodę w impulsach trwających od 10 do nawet 330 sekund. W ujęciu porównawczym najwyższą zgodność amplitudową obserwuje się dla prysznica i pralki (różnice maksymalne około 0,001 m³/min), natomiast największe rozbieżności względne występują w zdarzeniach niskoprzepływowych (umywalka) oraz przy zmiennym napełnianiu (wanna). Zgodność kształtu sygnałów jest wysoka we wszystkich przypadkach, co potwierdza poprawną synchronizację czasową pomiarów i zdolność obu urządzeń do detekcji zdarzeń użytkowych. Różnice mają głównie charakter amplitudowy i rosną wraz ze spadkiem natężenia przepływu, co jest typowe dla właściwości analizowanych systemów, zwłaszcza w dolnym zakresie pomiaro-

wym, kiedy to nasila się efekt kwantyzacji pomiarów.

Należy przy tym zaznaczyć, że zakres pomiarowy zastosowanych wodomierzy obejmuje wartości od minimalnego natężenia przepływu Q1 wynoszącego 25 l/h do ciągłego natężenia przepływu Q3 wynoszącego 4 000 l/h. Zastosowane wodomierze miały w czasie badań ważną cechę legalizacyjną, co oznacza, że ich błędy wskazań są mniejsze od błędów granicznych dopuszczalnych MPE (ang. Maximum Permissible Error), wynoszących odpowiednio $\pm 5\%$ w dolnej części zakresu pomiarowego, tj. poniżej Q2 wynoszącego 40 l/h, oraz $\pm 2\%$ w głównej części zakresu pomiarowego, tj. powyżej natężenia Q2.

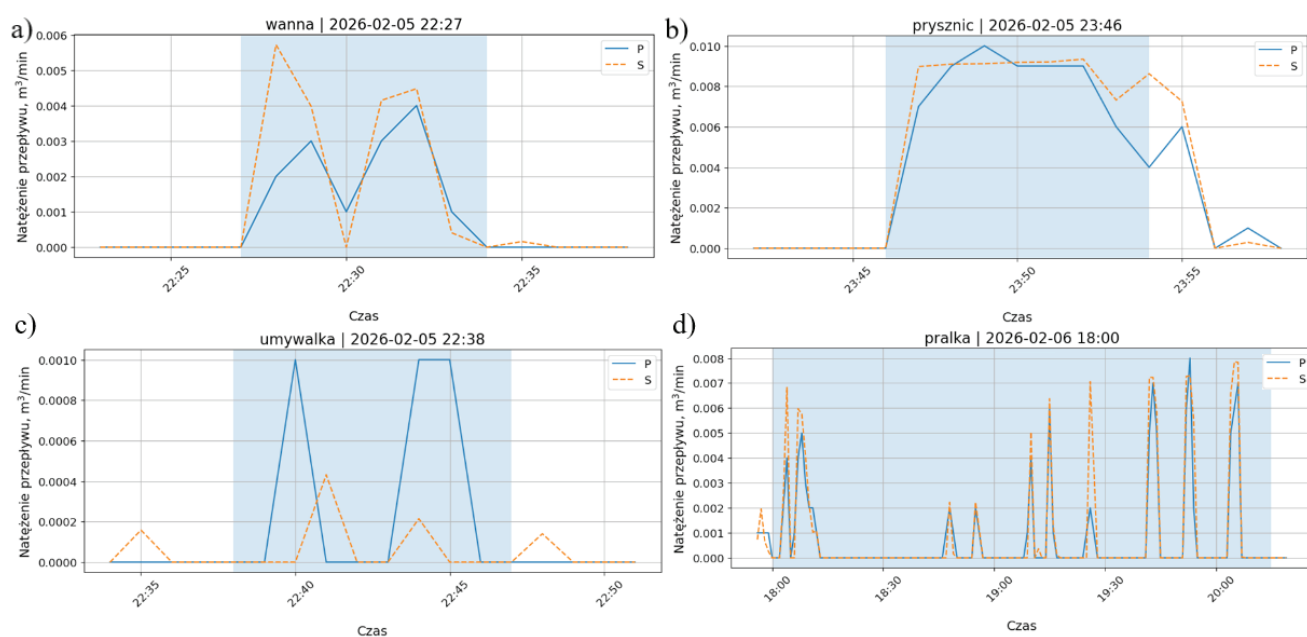
W trakcie badania zmierzono także natężenia przepływu występujące podczas używania urządzeń i przyborów w instalacji budynku. Najmniejsze natężenie przepływu występowało podczas poboru wody przez zmywarkę, tj. ok. 120 l/h (0,00167 m³/min). Większe natężenie przepływu występowało podczas poboru wody przez pralkę, tj. od ok. 350 l/h (0,0058 m³/min) do 480 l/h (0,0080 m³/min) (wartości chwilowe), a także podczas poboru wody z baterii prysznicowych i wannowej. Podobnie jak pralka, zmywarka pracuje w sposób przerywany i generuje zdarzenia o stosunkowo krótkim czasie trwania. Pavlou i in. (2024) wykazali, że czas trwania jednostkowych impulsów poboru wody przez zmywarkę wynosi od 10 do 140 sekund. Jednak zidentyfikowane przez nich maksymalne natężenie przepływu dla zmywarki przyjmowało wartości prawie sześciokrotnie wyższe (na poziomie 0,0096 m³/min) niż wartości zidentyfikowane w niniejszych badaniach.

Natężenia przepływu występujące w instalacji mieściły się w podstawowym zakresie pracy wodomierzy, w którym wykazują one najwyższą dokładność. Ponadto po zakończeniu badań zastosowane wodomierze poddano badaniom właściwości metrologicznych na stanowisku pomiarowym w akredytowanym laboratorium legalizacji wodomierzy. Badania wykazały, że w zakresie przepływów występujących w instalacji błędy wskazań miały znak dodatni, a różnice między nimi wynosiły poniżej 0,5%. W tej sytuacji różnice między wskazaniami wodomierzy można uznać za nieistotne.

Wnioski

Porównanie pomiarów objętości wody zużywanej przez mieszkańców zabudowy jednorodzinnej, dokonywanych za pomocą dwóch wodomierzy objętościowych tego samego typu, wyposażonych w różne nakładki P i S służące do zdalnego odczytu wskazań i przekazu danych, pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Zaobserwowano wyraźną dobową zmienność zużycia wody, z niskim poborem w godzinach nocnych oraz jego intensyfikacją w godzinach porannych i maksymalną zmiennością wieczorem. Rozkłady dobowe konsumpcji wody w gospodarstwie domowym ujawniają wyraźne zróżnicowanie pomiędzy dniami roboczymi a weekendami.
2. Oba sposoby rejestracji charakteryzują się wysoką zgodnością danych, przejawiającą się zbliżonym kształtem przebiegów zużycia wody, minimalnymi różnicami amplitudowymi oraz brakiem wyraźnych



Rys. 7. Czasowe przebiegi natężenia przepływu wody dla wybranych zdarzeń zarejestrowane przez urządzenia pomiarowe P i S
Fig. 7. Time series of water flow rates for selected events recorded by measuring devices P and S

przesunięć fazowych. Potwierdza to poprawną synchronizację pomiarów i duże podobieństwo rejestrowanych sygnałów.

3. Pomimo dynamicznego charakteru rozbioru wody i występowania charakterystycznych maksimów w ciągu doby wysoka zgodność obu sposobów rejestracji została zachowana i potwierdzona niemal identycznymi rozkładami godzinowymi oraz jedynie incydentalnymi różnicami. Różnice w rejestracjach między urządzeniami P i S pozostają niewielkie również dla poszczególnych dni tygodnia, co potwierdza porównywalność rejestrowanych wolumenów wody.

4. Podobną, wysoką zgodność i dobrą synchronizację zdarzeń zaobserwowano w danych minutowych, jednak obecność kwantyzacji danych dyskretnych w urządzeniu P prowadziła do incydentalnych różnic, szczególnie przy bardzo niskich przepływach. Znajduje to potwierdzenie zarówno w przeprowadzonej analizie Blanda-Altmana, jak i w zaobserwowanym rozrzucie danych zmniejszającym się wraz ze wzrostem chwilowego natężenia przepływu wody.

5. Wykresy pojedynczych zdarzeń poboru wody wskazują na wysoką zgodność czasową rejestracji sygnałów przez urządzenia P i S, co potwierdza ich zdolność do wiarygodnego odwzorowania dynamiki pracy urządzeń sanitarnych. Różnice między pomiarami mają głównie charakter amplitudowy i są największe przy niskich natężeniach przepływu, przy czym wraz ze wzrostem natężenia przepływu zgodność pomiarów ulega poprawie.

6. Z powyższych względów agregacja danych do przedziałów godzinowych jest pożądana, gdyż prowadzi do wyraźnej poprawy zgodności metrologicznej, co ma szczególne znaczenie podczas krótkookresowego bilansowania wody.

7. Różnice minutowe mają znaczenie głównie w analizach zdarzeń krótkotrwałych i dynamiki przepływu, natomiast w ujęciu godzinowym urządzenia można traktować jako metrologicznie równoważne i zamienne w analizach bilansowych. Ma to istotne znaczenie aplikacyjne, ponieważ stanowi podstawę monitorowania i obróbki danych dotyczących rozbiórów wody, wspomagając tym samym procesy zarządzania, eksploatacji oraz optymalizacji pracy systemów wodociągowych.

8. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się zasadność stosowania obu typów urządzeń, przy czym wybór konkretnej nakładki powinien zależeć od celu analizy. W badaniach opartych na agregacji godzinowej i bilansowaniu wody optymalnym i w pełni wystarczającym wyborem jest nakładka P, natomiast do szczegółowych analiz krótkotrwałych zda-

rzeń i dynamiki niskich przepływów w skali minutowej bardziej uzasadnione jest wykorzystanie nakładki S.

9. Otrzymane wyniki badań empirycznych odnoszą się do profilu zużycia wody w jednorodnym budynku mieszkalnym i zostały pozyskane w stosunkowo krótkim horyzoncie czasowym. W dalszych badaniach należy mieć na uwadze zmienność sezonową, tygodniową oraz indywidualne nawyki mieszkańców, a w konsekwencji wrażliwość uzyskiwanych wyników na chwilowe piki poboru i ryzyko błędów estymacyjnych. Pełna ocena charakterystyki zużycia wody oraz ewaluacja wyników wymagają dalszej weryfikacji w ramach długookresowych badań prowadzonych na wysoce zróżnicowanej próbie obiektów.

Podziękowania

Autorzy składają serdeczne podziękowania dr hab. inż. Jadwidze Królikowskiej, prof. PK, która zainicjowała ich współpracę. Pierwszym efektem tej współpracy jest niniejszy artykuł.

Bibliografia

- [1] Cichoń, T., & Królikowska, J. (2024). Rola i znaczenie inteligentnych wodomierzy w systemie zaopatrzenia w wodę. *INSTAL*, (12), 38–42. <https://doi.org/10.36119/15.2024.12.7>
- [2] Stańczyk, J., Ramm, K., & Licznar, P. (2025). Assessing the operating condition of a domestic distribution system based on the power spectra of high-frequency water consumption signals. *Water Research*, 278, 123320. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123320>
- [3] Almeida, G., Vieira, J., Marques, J., & Cardoso, A. (2011). Pattern recognition of the household water consumption through signal analysis. In L. M. Camarinha-Matos (Ed.), *Technological innovation for sustainability: DoCEIS 2011 (IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 349, pp. 349–356)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19170-1_38
- [4] Cominola, A., Nguyen, K., Giuliani, M., Stewart, R. A., Maier, H. R., & Castelletti, A. (2019). Data mining to uncover heterogeneous water use behaviors from smart meter data. *Water Resources Research*, 55(11), 9315–9333. <https://doi.org/10.1029/2019WR024897>
- [5] Ritu. (2024). The role of smart technologies in water distribution management. *Frontiers in Health Informatics*, 13(6), 1404–1412.
- [6] Belfik, M., & Nowakowska, M. (2026). Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do predykcji rozbioru wody na potrzeby optymalizacji eksploatacji sieci. *INSTAL*, (7), 27–31. <https://doi.org/10.17512/INSTAL.2026.07.02>
- [7] Koral, W. (2019). Research in unitary water consumption in multifamily building for daily recording. *INSTAL*, (11), 46–49. <https://doi.org/10.36119/15.2019.11.5>
- [8] Torres-Gutiérrez, J. L., Castañeda-Miranda, C. L., Martínez-Blanco, M. D. R., Guerrero-Osuna, H. A., Jiménez-Díaz, G., Espinoza-García, G., Moreno-Lucio, M., Ibarra-Pérez, T., & Solís-Sánchez, L. O. (2026). Development and implementation of a smart water metering and monitoring system for homes with intermittent water supply. *Technologies*, 14(2), 135. <https://doi.org/10.3390/technologies14020135>
- [9] Khaki, M., & Mortazavi, N. (2022). Water consumption demand pattern analysis using uncertain

smart water meter data. In *Proceedings of the 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2022)* (Vol. 3, pp. 436–443). SciTePress. <https://doi.org/10.5220/0010834900003116>

- [10] Obaid, S., Hosoi, K., Ngoc, N. M., Inoue, T., & Yokota, K. (2024). Assessment of water consumption behavior in single households using smart water meters. *Applied Sciences*, 14(19), 8857. <https://doi.org/10.3390/app14198857>
- [11] Dżimińska, P., Stańczyk, J., Pałczyński, K., Licznar, P., & Andrysiak, T. (2024). Potencjał algorytmów inteligencji obliczeniowej w interpretacji rozproszonych danych wodomierzowych. *INSTAL*, (1), 36–43. <https://doi.org/10.36119/15.2024.1.5>
- [12] Ustawa z dnia 20 kwietnia 2021 r. o zmianie ustawy o efektywności energetycznej oraz niektórych innych ustaw, Dz.U. 2021 poz. 868; Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2002 z dnia 11 grudnia 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej.
- [13] Cichoń, T., & Królikowska, J. (2021). Remote reading of water meters as an element of a smart city concept. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 23, 883–890. <https://doi.org/10.54740/ros.2021.060>
- [14] Doğan, N. Ö. (2018). Bland-Altman analysis: A paradigm to understand correlation and agreement. *Turkish Journal of Emergency Medicine*, 18(4), 139–141. <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.09.001>
- [15] Fadlalla, D., Holagh, S. G., Ahmed, W. H., Weales, D., & Moussa, M. (2024). Using machine vision algorithms for characterizing gas-liquid slug flows in vertical pipes. *Flow Measurement and Instrumentation*, 99, 102671. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102671>
- [16] Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- [17] Mazzoni, F., Marsili, V., & Alvisi, S. (2025). Characterizing hot-water consumption at household and end-use levels based on smart-meter data. *Water*, 17(13), 1906. <https://doi.org/10.3390/w17131906>
- [18] Wang, R., Zhao, X., Qiu, H., Cheng, X., & Liu, X. (2024). Uncovering urban water consumption patterns through time series clustering and entropy analysis. *Water Research*, 262, 122085. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122085>
- [19] Naseri, M. Y., Bernosky, G., Mayer, P. W., & Marston, L. T. (2025). Patterns and predictors of residential indoor water use across major US cities [Preprint]. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5098971/v2>
- [20] Borchling, A., Kroner, C., & Tränckner, J. (2022). Effect of the sampling interval on the measurement accuracy of electronic water meters under real consumption conditions. *Water Supply*, 22(12), 8405–8417. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.404>
- [21] Pavlou, P. V., Filippou, S., Solonos, S., Vrachimis, S. G., Malialis, K., Eliades, D. G., Theocrides, T., & Polycarpou, M. M. (2024). Monitoring domestic water consumption: A comparative study of model-based and data-driven end-use disaggregation methods. *Journal of Hydroinformatics*, 26(4), 709–726. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.120>
- [22] Knutsson, J. (2026). Household water consumption patterns revealed through high-resolution fixture-level monitoring in a Swedish living lab [Preprint]. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6657318>
- [23] Naseri, Y., Bernosky, G., Mayer, P., & Marston, L. (2026). Analysis of fixture efficiency and behavioral factors of indoor residential water use of single-family households. *Water Resources Research*, 62, e2025WR040452. <https://doi.org/10.1029/2025WR040452>