

Wykorzystanie systemu rejestracji danych z dużą częstotliwością do analizy nierównomierności zużycia wody

The use of a high-frequency data logging system to analyse unevenness of water consumption

PAULINA DZIMIŃSKA, JUSTYNA STAŃCZYK, STANISŁAW DRZEWIECKI, PAWEŁ LICZNAR

DOI 10.36119/15.2022.1.3

Obserwowany w ostatnich latach rozwój nowoczesnych technologii oraz idei inteligentnych miast budzi coraz większe zainteresowanie wśród eksploatorów systemów dystrybucji wody. Wdrożenie systemów monitoringu oraz zdalnego odczytu wodomierzy pozwala na zbieranie danych o rzeczywistej pracy sieci wodociągowej, co przekłada się na możliwość ich wykorzystania w procesie planowania inwestycji, modelowania, projektowania oraz w bieżącej eksploatacji i optymalizacji pracy układu. Biorąc pod uwagę obecne potrzeby przedsiębiorstw wodociągowych w tym zakresie, przeprowadzono badania nad nierównomiernością zużycia wody przez różnego typu odbiorców końcowych. Wykorzystano dane pochodzące z modułów rejestrujących szeregi czasowe z dużą częstotliwością, zlokalizowanych w pilotażowej strefie wodociągowej. Wyniki badań wskazują na znaczne różnice pomiędzy literaturowymi wielkościami współczynników nierównomierności rozbiorów wody a rzeczywistymi, określonymi na podstawie precyzyjnych pomiarów. Uwidoczniony został także wpływ pandemii COVID-19 na zmienność i nierównomierność poboru wody przez użytkowników budynków o różnym przeznaczeniu.

Słowa kluczowe: nierównomierność poboru wody, inteligentne sieci wodociągowe, wodomierze, współczynniki nierównomierności, zdalny odczyt

The development of modern technology and the idea of smart cities, which has been observed in recent years, becomes of interest to operators of water distribution systems. Implementing monitoring and remote water meter reading systems allows to collect data presenting actual operation of water supply networks. The collected data can be used in investment planning processes, as well as in modelling, designing and current operation and optimisation of the network. Taking into account current needs of water supply companies in this respect, research has been carried out into the uneven water consumption among various types of final consumers. Data from high-frequency time series recording modules located in the pilot water supply zone were used in the research. The research results indicate significant differences between the values of the non-uniformity coefficients of water consumption in the literature and the actual data, which is determined on the basis of precise measurements. The impact of COVID-19 pandemics on variability and unevenness of water consumption by users of buildings of various purpose is shown.

Keywords: variability of water consumption, smart water system, water meters, non-uniformity coefficients, remote reading

Wprowadzenie

Idea *be smart* oprócz wszelkiej działalności życia codziennego rozpowszechniana jest w coraz szerszym aspekcie infrastruktury technicznej. Kto bowiem nie słyshał jeszcze o inteligentnych miastach, inteligentnych sieciach wodociągowych czy też inteligentnym opomiarowaniu zużycia wody? W przypadku tak newralgicznego

systemu jakim jest system dystrybucji wody pojęcie *smart* nabiera szczególnego znaczenia. Miarą inteligencji systemu dystrybucji wody jest opóźnienie czasowe pomiędzy wystąpieniem danego zdarzenia na sieci wodociągowej a otrzymaniem informacji diagnostycznie użytecznej o jego pojawieniu się przez zarządców sieci. Według doniesień literaturowych opóźnienie to nie powinno przekraczać 15 minut [1].

By móc zrealizować ideę *smart* w sektorze sieci wodociągowych konieczne jest wdrożenie monitoringu, na który składa się sieć wysoko-częstotliwościowych czujników pomiarowych, zlokalizowanych w odpowiednich miejscach systemu dystrybucji wody [2, 3, 4].

Stan eksploatacyjny sieci wodociągowych odzwierciedla chwilowe wielkości poboru wody przez jej odbiorców, co

mgr inż. Paulina Dzimińska <https://orcid.org/0000-0003-0427-5960>, mgr inż. Stanisław Drzewiecki – Miejskie Wodociągi i Kanalizacja w Bydgoszczy sp. z o.o., Bydgoszcz

dr inż. Justyna Stańczyk <https://orcid.org/0000-0002-5676-1787> – Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska, Wrocław

prof. dr hab. inż. Paweł Licznar <https://orcid.org/0000-0002-2559-5296> – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, Wrocław.

Adres do korespondencji/ Corresponding author: justyna.stanczyk@upwr.edu.pl

wpływa na stan pracy urządzeń dostarczających wodę. Składowa determinująca szeregowo czasowych jest związana ze zróżnicowaniem rozbiórów wody w poszczególnych porach roku, dniach tygodnia a także godzinach w dobie, co generuje jej zmienność sezonową, dobową i godzinową. Na wielkość poboru wody wpływają czynniki socjodemograficzne, sytuacja pogodowa, stan techniczny, czynniki ekonomiczne, wynikające z klasy wyposażenia mieszkań w urządzenia wodociągowe a także zdolność finansowa gospodarstw domowych, przyczyniające się do zróżnicowania zużycia wody w obszarach różnej zabudowy przestrzennej [5]. Jak wykazali Jedlikowski i Englart [6], już samo zastosowanie odpowiedniego rodzaju baterii czerpalnych pozwala na uzyskanie oszczędności zużycia wody dochodzącej nawet do 50%. Specyficznym czynnikiem losowym wpływającym na pobór wody wodociągowej był także wybuch pandemii COVID-19, co wykazano w badaniach Dżimińska i in. [7]. Wszystkie wymienione czynniki wpływające na wielkość poboru wody wykazują zmienność w czasie oraz w przestrzeni.

Dokładność opomiarowania zużycia wody, nierównomierne gromadzenie danych, zbieranie ich w postaci długookresowych ciągów pomiarowych nie sprzyjają bieżącej obserwacji zwyczajów użytkowników sieci wodociągowej i nierównomierności poboru wody. Odczyty uzyskiwane drogą radiową w stałych miesięcznych odstępach umożliwiają obserwację sezonowości w okresie rocznym, lecz nie dostarczają wiedzy na temat godzinowej czy dobowej zmienności poboru wody. W wyniku nierównoczesnego, skumulowanego sposobu pomiaru ilości wody pobranej przez użytkowników, przeprowadzanego w zróżnicowanych odstępach czasu, wnioskowanie o zmienności i nierównomierności rozbiórów wody jest obarczone błędem [8]. Analiza wysoko-częstotliwościowych danych uzyskanych z wodomierzy oraz współczynników nierównomierności rozbiórów wody, oprócz modelowania dynamicznego rozbiórów wody [9] jest istotna także w kontekście odpowiedniego wymiarowania przewodów i urządzeń sieci wodociągowych [10]. Odpowiednio dobrane wodomierze pozwalają nie tylko na ograniczenie strat pozornych, ale także dokonanie precyzyjnego bilansu wody, analizę jednostkowego zużycia wody oraz trendów zmian jej poboru [11]. Znajomość wielkości poboru wody oraz jej nierównomierności czasowo-przestrzennej umożliwia optymalizację pracy takich obiektów jak pom-

ownie, co ma swoje odzwierciedlenie w poniesionych kosztach związanych z energochłonnością systemów dystrybucji wody [12]. Wyniki badań wskazują, że wdrożone w praktyce strategie optymalizacji pracy pompowni pozwalają na obniżenie kosztów operacyjnych nawet o 7% [13]. Z tego też powodu do 2027 roku istnieje konieczność wymiany wszystkich wodomierzy na urządzenia umożliwiające zdalny odczyt wielkości poboru wody, co jest regulowane Dyrektywą nr 2018/2002 z dnia 11 grudnia 2018 r., nowelizującą Dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej [14, 15].

Zastosowanie opomiarowania wielkości zużycia wody przez użytkowników sieci wodociągowej doprowadziło nie tylko do spadku ilości pobieranej wody [16, 17, 18], ale także wykazało duże rozbieżności pomiędzy normowymi a rzeczywistymi współczynnikami nierównomierności rozbiórów wody [10, 19]. Jak wykazały liczne krajowe badania Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. [20] oraz wytyczne do programowania zapotrzebowania wody i ilości ścieków [21] zawierają w sobie znacznie zawyżone wskaźniki jednostkowego zapotrzebowania na wodę oraz niemiernodajne współczynniki godzinowe i dobowe rozbiórów wody. W efekcie, skutkuje to przewymiarowaniem przewodów, zmniejszeniem stopnia ich wykorzystania a także zwiększeniem czasu przepływu wody i pogorszeniem jej jakości [22].

Celem przeprowadzonych badań była analiza wielkości zużycia wody i poznanie jej nierównomierności z wykorzystaniem pomiarów pochodzących z wodomierzy, rejestrujących szeregi czasowe z dużą częstotliwością. Rozpatrzono rozbiór wody w odniesieniu do różnego typu zabudowy o zróżnicowanym przeznaczeniu. Uzyskane wyniki badań stanowią wiedzę przydatną do projektowania, modelowania, eksploatacji sieci wodociągowej oraz optymalizacji pracy obiektów towarzyszących, takie jak pompownie.

Charakterystyka obiektu badawczego i zakres prowadzonych pomiarów

Badaniami wielkości zapotrzebowania na wodę objęto jedną ze stref systemu dystrybucji wody Bydgoszczy, będącej pod zarządem Miejskich Wodociągów i Kanalizacji (MWiK). W analizowanej strefie, która ze względu na wysokość zabudowy zasilana jest przez lokalną hydrofornię, zlokalizowanych jest łącznie dwudziestu dwóch odbiorców końcowych wody. Zbiór

obiektów poddanych badaniu składał się z siedemnastu dużych budynków wielorodzinnych typu blok, jednego mniejszego budynku, w którym mieścił się dom kultury, jednego domu jednorodzinnego, dwóch pawilonów handlowo-usługowych oraz jednej szkoły. Spośród tych obiektów, trzy budynki wielorodzinne zasilane są dwoma osobnymi przyłączami, przez co wyposażone są w dwa oddzielne wodomierze. Szkoła składa się z dwóch budynków zasilanych indywidualnymi przyłączami, przy czym jeden z nich wyposażony jest w kryty basen pływacki.

Na przyłączach zainstalowane są wodomierze jednostrumieniowe o różnych średnicach i rozdzielczościach pomiaru. Dla wodomierzy o średnicach DN15-20 rozdzielczość wynosi 1 impuls na 1 dm³, natomiast dla średnic od DN32 rozdzielczość wodomierzy to 1 impuls na 10 dm³. W tabeli 1 zestawiono poszczególne punkty pomiarowe z podziałem na średnicę zainstalowanego wodomierza w zależności od rodzaju budynku, w którym się znajduje.

Tabela 1. Zestawienie liczby zamontowanych modułów do odczytu danych z wodomierzy z podziałem na rodzaje obiektów

Table 1. List presenting the number of installed modules used to read data from water metres, broken down by types of facilities

Lp.	Rodzaj budynku	Średnica wodomierza	Liczba punktów pomiarowych
1	Budynek jednorodzinny	DN15	1
2	Budynek wielorodzinny	DN32	8
3	Budynek wielorodzinny	DN40	12
4	Pawilon handlowy	DN20	1
5	Pawilon handlowy	DN15	1
6	Szkoła	DN50	2
7	Dom kultury	DN15	1

W ramach badań we wszystkich dwudziestu sześciu wodomierzach zostały zainstalowane moduły elektroniczne, które pozwoliły na prowadzenie odczytów z dużą częstotliwością. Moduły te rejestrowały poszczególne impulsy z wodomierzy w czasie i przesyłały informację za pomocą modemów GSM do zbiorczej bazy komputerowej. Zbudowany system automatycznie przeliczał jednodominutowe odczyty z wodomierzy i wizualizował je w formie szeregów czasowych przepływów chwilowych. Następnie wartości te były agregowane do szeregów 15-minutowych i 1-godzinnych. Pomiar poboru wody przez odbiorców stanowiły ponad ośmiomiesięczne szeregi czasowe o przepływach chwilowych, zarejestrowane od 1 stycznia 2021 r.

Metodyka badań

Początkowo otrzymane z systemu dane w postaci godzinowego poboru wody z wszystkich obiektów przekształcono z szeregow czasowych do macierzy, które pozwoliły na podział wyników na poszczególne doby. Dzięki tej czynności otrzymano indywidualne dla każdej doby histogramy rozbiórów godzinowych, na podstawie których możliwe było wyznaczenie maksymalnego i minimalnego poboru wody w dobach o maksymalnym i minimalnym zapotrzebowaniu, czy też wyznaczenie uśrednionej godzinowej charakterystyki dla poszczególnych odbiorców wody. Ustalone wartości średniego, maksymalnego i minimalnego zapotrzebowania na wodę wykorzystano następnie do obliczenia współczynników nierównomierności dobowej i godzinowej.

Do wyznaczenia współczynników nierównomierności dobowej i godzinowej rozbiórów wody dla poszczególnych obiektów badawczych posłużono się metodami zaproponowanymi przez Mielcarzewicza [23]. W pierwszej z metod współczynniki nierównomierności dobowej N_d wyznaczono, jako stosunek maksymalnego dobowego zużycia (Q_{dmax}) do średniego dobowego zużycia ($Q_{d\bar{sr}}$):

$$N_d = \frac{Q_{dmax}}{Q_{d\bar{sr}}} \quad (1)$$

Następnie, współczynniki nierównomierności dobowej M_d obliczono, jako stosunek minimalnego dobowego zużycia (Q_{dmin}) do średniego dobowego zużycia ($Q_{d\bar{sr}}$):

$$M_d = \frac{Q_{dmin}}{Q_{d\bar{sr}}} \quad (2)$$

Współczynniki nierównomierności godzinowej N_h określono, jako stosunek maksymalnego godzinowego zużycia w dobie o maksymalnym zużyciu dobowym (Q_{hmax}) do średniego zużycia w tej dobie ($Q_{dmax}/24$):

$$N_h = \frac{Q_{hmax}}{\frac{Q_{dmax}}{24}} \quad (3)$$

Współczynniki nierównomierności godzinowej odniesione w stosunku do minimalnego zużycia wody M_h wyznaczono, jako stosunek minimalnego zużycia godzinowego (Q_{hmin}) do średniego zużycia w tej dobie o minimalnym zużyciu ($Q_{dmin}/24$):

$$M_h = \frac{Q_{hmin}}{\frac{Q_{dmin}}{24}} \quad (4)$$

Mając na uwadze, że ekstremalne godzinowe rozbiory wody występują bardzo często w dniach, kiedy dobowe rozbiory wody nie osiągają wartości maksymalnych, obliczano także drugą metodą, współczynniki nierównomierności N_h^r i M_h^r . Współczynnik nierównomierności N_h^r przedstawia stosunek maksymalnego godzinowego rozbioru wody (Q'_{hmax}) do średniego godzinowego rozbioru ($Q_{h\bar{sr}} = Q_{d\bar{sr}}/24$):

$$N_h^r = \frac{Q'_{hmax}}{\frac{Q_{d\bar{sr}}}{24}} \quad (5)$$

Analogicznie, wyznaczono współczynniki nierównomierności godzinowej M_h^r na podstawie wielkości minimalnego godzinowego rozbioru wody (Q'_{hmin}):

$$M_h^r = \frac{Q'_{hmin}}{\frac{Q_{d\bar{sr}}}{24}} \quad (6)$$

Podczas obliczania współczynników nierównomierności poboru wody pominięto okresy z przerwany rejestracji, kiedy występują pozornie zerowe rozbiory. W kolejnym etapie badań zbadano zależność wyznaczonych współczynników nierównomierności godzinowej w stosunku do liczby mieszkańców budynków wielorodzinnych, udostępnionej przez MWiK w Bydgoszczy.

Wyniki analiz i dyskusja

Rozkłady godzinowe zapotrzebowania na wodę

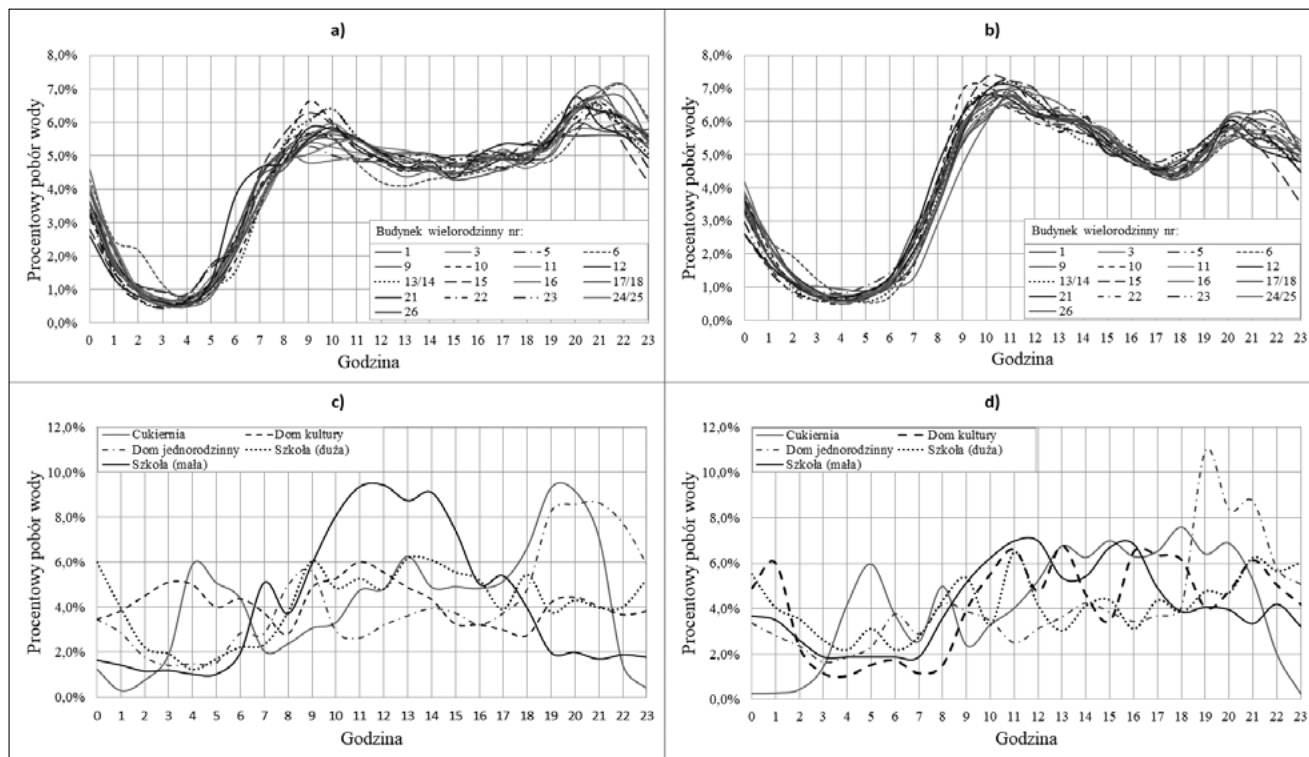
We wstępnej części badań dokonano analiz zmienności godzinowej poboru wody dla wybranych odbiorców. Na rysunku 1(a) oraz rysunku 1(b) przedstawiono rozkłady godzinowe rozbiórów wody dla budynków wielorodzinnych, które determinują rozkład godzinowy przepływów wody w hydroforni na wejściu do analizowanej strefy. Powstały one poprzez uśrednienie rozkładów obliczonych dla poszczególnych dni roboczych i wolnych od pracy. Procentowe rozkłady godzinowego zużycia wody dla każdego dnia obserwacji obliczono dzieląc kolejne godzinowe rozbiory wody w tym dniu przez łączną sumę rozbiórów danego dnia.

Rozkłady godzinowe zapotrzebowania na wodę określono osobno dla dni roboczych i wolnych od pracy, kierując się wynikami badań nad rozbiorami wody z Warszawy [9], w których wykazano istotne zróżnicowanie rozkładów w dni robocze (od poniedziałku do piątku) i w weekendy (soboty i niedziele). Dla największej grupy obiektów, a więc budyn-

ków wielorodzinnych, występował typowy rozkład dwumodalny ze szczytami rozbiórów w godzinach porannych i wieczornych (rys.1 (a)). W wielu budynkach wielorodzinnych rozbiory wody w ciągu dnia roboczego pozostawały na stosunkowo wysokim poziomie, tzn. po porannym szczycie około godziny 8:00, rozbiory jedynie w niewielkim stopniu obniżały się, na przykład w budynku wielorodzinnym nr 16. Zjawisko to można wytłumaczyć faktem, że rejestracje rozbiórów prowadzone były podczas trwania ograniczeń związanych z pandemią COVID-19, kiedy to wielu mieszkańców nie wychodziło do pracy i świadczyło pracę zdalnie ze swoich mieszkań. W tego typu obiektach bardzo wyraźnie zaznaczała się także różnica pomiędzy wzorcami poborów wody w dni robocze i wolne od pracy. W dni wolne od pracy (rys.1 (b)) zwiększone rozbiory były opóźnione w czasie (mieszkańcy zaczynali być aktywni później), ale zarazem pobierali około południa więcej wody niż nawet późnym wieczorem. Zauważyć można także znaczny spadek ilości pobieranej wody około godziny 18:00-19:00, co może wskazywać na czas odpoczynku weekendowego.

Jak można zauważyć przebiegi uzyskane dla różnych obiektów tego samego typu odbiorców, w tym przypadku budownictwa wielorodzinnego, są bardzo do siebie podobne zarówno w przypadku dni roboczych jak i wolnych od pracy. Oznacza to, że uzyskane w trakcie badań rozkłady mogą być traktowane jako referencyjne, a więc wiarygodne także dla innych obiektów na terenie miasta, należących do kategorii budynków wielorodzinnych. Uzyskane rozkłady mogą znaleźć zastosowanie do modelowania systemu dystrybucji wody w Bydgoszczy, zwłaszcza w przypadku prowadzenia długookresowych symulacji komputerowych EPS (ang. Extended Period Simulations). Rozkłady te można przyjmować jako domyślne przy definiowaniu wzorców zapotrzebowania na wodę w węzłach sieci związanych z budownictwem wielorodzinnym.

W trakcie trwania badań pilotażowych okazało się, że pawilon handlowy, będący niefunkcjonującym salonem kosmetycznym, nie generuje poboru wody. Drugi z pawilonów, w którym mieściła się cukiernia, funkcjonował z pewnymi ograniczeniami z uwagi na pandemię COVID-19. Pandemia odcisnęła także swoje piętno na rozbiory wody notowane w innych obiektach, takich jak szkoły. W małym budynku szkoły z młodszymi klasami, które miały krótszy okres zdalnej nauki, zauważono rozkład jednomodalny poboru wody



Rys. 1.

Rozkłady godzinowe rozborów wody dla: a) budynków wielorodzinnych w dni robocze, b) budynków wielorodzinnych w dni wolne od pracy, c) innych obiektów w dni robocze, d) innych obiektów w dni wolne od pracy

Fig. 1. Hourly breakdowns of water consumption for tested facilities on working and non-working days

z maksymalnymi rozborami w godzinach od 7:00 do 15:00 (rys. 1(c)). W dużym budynku ze starszymi klasami, połączonym z basenem pływackim, obliczony rozkład poboru wody jest bardzo nieregularny. Oprócz funkcjonowania samego basenu, na to zróżnicowanie nałożyły się okresy nauki zdalnej. Jego charakterystycznym elementem jest tylko wyraźne minimum poborów wody w godzinach wczesno porannych od 3:00 do 5:00. Podobnie nieregularny jest także rozkład poboru wody dla domu kultury. W tym obiekcie większa aktywność ma miejsce w weekendy, co tłumaczy większe pobory wody i wyraźną różnicę pomiędzy rozborami nocnymi a w godzinach od 9:00 do 18:00 w dni wolne od pracy. W przypadku pawilonu handlowego, tak jak dla bloków wielorodzinnych, można mówić o dwumodalnym rozkładzie poborów wody (rys. 1 (c) i (d)). Niemniej pierwsze poranne maksimum wynikające najprawdopodobniej z przygotowywania produkcji cukierni jest jednak wyraźnie mniejsze od maksimum około godzin 19:00 i 20:00, kiedy to woda jest wykorzystywana do mycia i sprzątania obiektu. Dwumodalny rozkład poboru wody jest także widoczny dla domu jednorodzinnego, dla którego można zauważyć znacznie większe maksimum w godzinach wieczornych od 19:00 do 22:00.

Współczynniki nierównomierności rozboru wody

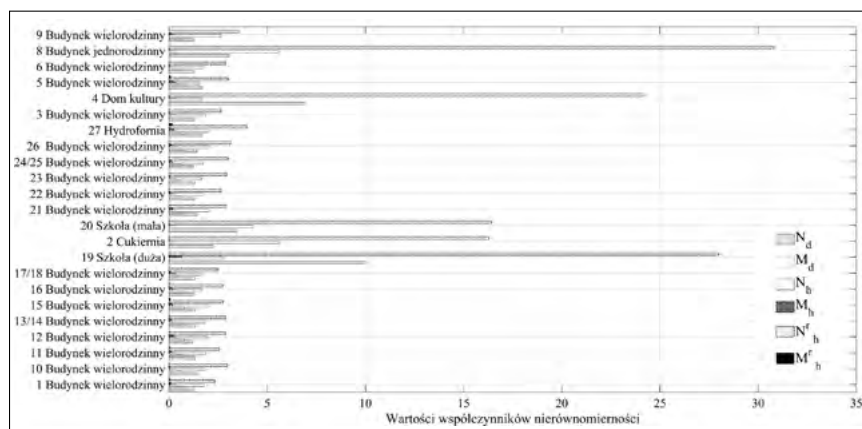
Na podstawie zarejestrowanych wartości poboru wody wyznaczono współczynniki nierównomierności. Dla większości obiektów terminy wystąpienia maksymalnych rozborów wody pokrywają się z terminami świąt. Na przykład w dwunastu spośród siedemnastu budynków wielorodzinnych, maksymalne rozbiory dobowe zanotowano w Wielką Sobotę 03-04-2021, a w jednym z pozostałych bloków (obiekt nr 23) w Wielki Piątek. W przypadku trzech spośród wymienionych bloków wielorodzinnych w Wielką Sobotę odnotowano także największe rozbiory godzinowe wody (obiekty nr 11, 15 i 21). W innych typach obiektów termin wystąpienia maksymalnych rozborów dobowych i godzinowych były inne, ale także determinowane funkcją danego obiektu i kalendarzem świąt. Przykładowo, w pawilonie handlowo-usługowym, pełniącym funkcję cukierni, największy rozbiór wody odnotowano 11-02-2021 w tłusty czwartek. Pod kątem eksploatacji sieci wodociągowej w całej strefie warto zaznaczyć, że maksymalne przepływy w hydroforni na wejściu do strefy nie wystąpiły w wymienionych terminach, co oznacza, że nie pokrywają się z okresami maksymalnych rozborów, zarejestrowanych u samych odbiorców. Maksymalny

przepływ dobowy na wejściu do strefy zarejestrowano 09-08-2021, a więc w trakcie maksymalnych poborów w dużym budynku szkoły, co było wynikiem wykorzystania wody wodociągowej na potrzeby krytego basenu.

Terminy wystąpienia minimalnych poborów wody zarówno dobowych jak i godzinowych są trudniejsze do interpretacji z uwagi na większą losowość ich wystąpienia. Często pojawienie się minimalnych rozborów wody nie jest skorelowane z żadnym ze świąt. Jedynie w przypadku minimalnych godzinowych rozborów w czterech budynkach wielorodzinnych (obiekty nr 21, 22, 23 i 24/25) zanotowano je w dniu 17-02-2021, a więc w Popielec. W obiektach o funkcji innej, niż budynek wielorodzinny (pawilon handlowo-usługowy, dom kultury, szkoła, dom jednorodzinny) minimalny godzinowy pobór wody miał miejsce w Nowy Rok. Podobnie jak w przypadku terminów wystąpienia maksymalnego poboru wody, okresy minimalnych rozborów zarejestrowanych u odbiorców nie pokrywają się z datami ich rejestracji w hydroforni, co jest wynikiem tego, że nadrzędne pomiary prowadzone na poziomie hydroforni oprócz samego zużycia wody, rejestrują pewną ilość wody w postaci jej strat na sieci. Minimalny przepływ godzinowy w hydroforni zanotowano 06-01-2021,

czyli w Święto Trzech Króli. Natomiast minimalny przepływ dobowy miał miejsce 03-08-2021 i można jedynie domniemywać, że był efektem wyjazdów znacznej części odbiorców wody na wypoczynek wakacyjny.

Obliczone wartości współczynników nierównomierności dobowej i godzinowej dla każdego z analizowanych obiektów przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 2. W świetle przeprowadzonych badań, współczynniki nierównomierności godzinowej i dobowej poborów wody różnią się pomiędzy kategorią budynków wielorodzinnych a pozostałymi obiektami. Współczynniki nierównomierności rozbiórów wody w dobie N_d dla mieszkalnictwa wielorodzinnego oscylują wokół podobnych wartości a ich średnia wynosi 1,34. Podobnie jest w przypadku współczynników M_d odniesionych do minimalnych rozbiórów dobowych. Dla budownictwa wielorodzinnego współczynnik M_h , poza wyjątkiem obiektu nr 3, miał niezerowe wartości, sięgające 0,252 dla obiektu nr 5. Wartości współczynników nierównomierności N_h dla budynków wielorodzinnych mieściły się w zakresie od 1,55 (obiekt nr 5) do 2,65 (obiekt nr 9). Wartości współczynników nierównomierności N'_h dla tych samych budynków wielorodzinnych przyjmowały odpowiednio wyższe wartości z zakresu



Rys. 2. Wartości współczynników nierównomierności rozbiórów wody dla wszystkich obiektów
Fig. 2. Values of non-uniformity coefficients of water consumption for all facilities

od 2,33 (obiekt nr 1) do 3,54 (obiekt nr 9). Odnosząc obliczone wartości współczynników nierównomierności N_h do wytycznych projektowych w literaturze branżowej (m.in. Knapiak i Bajer [24]) należy stwierdzić, że dla większości badanych budynków wielorodzinnych wartości współczynnika były wyższe od rekomendowanego zakresu 1,4 ÷ 1,6. Oznacza to znacznie większą nierównomierność i nieregularność poboru wody od zakładanej w piśmiennictwie (wykazaną także w badaniach, m.in. Tuz i Gwoździej-Marzur [10]), pomimo zauważalnego na pod-

stawie innych badań spadku jednostkowego zużycia wody [25, 26, 16]. Wpływa na to także większa szczelność instalacji wodociągowych, która powoduje zmniejszenie ilości strat wody i jednocześnie uzyskanie większych wartości współczynników nierównomierności jej zużycia.

W przypadku pozostałych obiektów, o przeznaczeniu innym niż budownictwo wielorodzinne, widoczne jest znaczne zróżnicowanie współczynników nierównomierności dobowej N_d , w szczególności dla domu kultury oraz dużej szkoły z krytą pływalnią (odpowiednio $N_d = 6,91$ oraz 10,00). Współczynnik M_h dla obiektów innego typu miał czasami zerową wartość, a jedynym odstępstwem od tego był budynek dużej szkoły o bardzo wysokim współczynniku ($M_h = 0,62$), co zapewne można tłumaczyć specyfiką działającego basenu lub ewentualnymi nieszczelnościami instalacji wodociągowej. Współczynniki nierównomierności N_h i N'_h dla budynków takich, jak pawilon handlowo-usługowy, dom jednorodzinny, szkoła (mały budynek), były większe odpowiednio od 4 i 16. Wspomniane wartości powinny być w przyszłości skorygowane, poprzez dłuższe badania na większej liczbie podobnych obiektów, gdyż mogą być silnie zniekształcone przez występujące obostrzenia wywołane pandemią COVID-19. Ponadto jak zauważył także Koral [11], widoczna jest liniowa zależność pomiędzy liczbą zasilanych odbiorców a nierównomiernością rozbiórów wody. Największą zmiennością zużycia wody charakteryzują się budynki o najmniejszej liczbie potencjalnych jej użytkowników.

Dzięki udostępnieniu przez MWiK dodatkowych danych o liczbie mieszkańców i mieszkańców, w zbiorze czternastu spośród analizowanych budynków wielorodzinnych, możliwe było przeanalizowanie, czy obliczone współczynniki nierównomierności rozbiórów wody wykazują

Tabela 2. Zestawienie obliczonych współczynników nierównomierności dobowej i godzinowej dla każdego badanego obiektu

Table 2. List presenting the calculated daily and hourly non-uniformity coefficients for each tested facility

Nr obiektu	Rodzaj obiektu	N_d	M_d	N_h	M_h	N'_h	M'_h
1	Budynek wielorodzinny	1,27	0,76	1,80	0,08	2,33	0,04
3	Budynek wielorodzinny	1,30	0,16	1,88	0	2,65	0
5	Budynek wielorodzinny	1,69	0,81	1,55	0,25	3,01	0,08
6	Budynek wielorodzinny	1,29	0,83	1,79	0,03	2,90	0
9	Budynek wielorodzinny	1,27	0,77	2,65	0,11	3,54	0,02
10	Budynek wielorodzinny	1,45	0,75	1,85	0,04	2,98	0
11	Budynek wielorodzinny	1,35	0,87	1,9	0,13	2,55	0,04
12	Budynek wielorodzinny	1,19	0,79	1,97	0,24	2,89	0
13 i 14	Budynek wielorodzinny	1,35	0,64	1,85	0,13	2,90	0,02
15	Budynek wielorodzinny	1,34	0,79	2,07	0,16	2,76	0,06
16	Budynek wielorodzinny	1,29	0,71	1,68	0,17	2,75	0,02
17 i 18	Budynek wielorodzinny	1,34	0,43	1,63	0,07	2,50	0,02
21	Budynek wielorodzinny	1,41	0,73	2,06	0,18	2,90	0
22	Budynek wielorodzinny	1,33	0,69	1,72	0,06	2,65	0
23	Budynek wielorodzinny	1,30	0,53	1,65	0,04	2,93	0
24 i 25	Budynek wielorodzinny	1,26	0,66	1,74	0,14	3,00	0
26	Budynek wielorodzinny	1,41	0,82	2,05	0,11	3,15	0
	Średnia	1,34	0,69	1,87	0,11	2,85	0,02
	Minimum	1,19	0,16	1,55	0	2,33	0
	Maksimum	1,69	0,87	2,65	0,25	3,54	0,08
Pozostałe obiekty							
2	Cukiernia	2,24	0,23	5,63	0	16,30	0
4	Dom kultury	6,91	0,01	1,68	0	24,20	0
19	Szkoła (duża)	10,00	0,05	2,79	0,62	28,00	0
20	Szkoła (mała)	3,47	0,02	4,28	0	16,40	0
8	Budynek jednorodzinny	3,09	0,34	5,58	0	30,80	0
27	Hydrofornia (na wejściu do strefy)	1,68	0,83	2,04	0,24	3,96	0,17

związek z parametrami opisującymi skalę tych obiektów. Jak zauważył Szafflik [27] liczba lokatorów jest istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość poboru wody, jednak sposób jej pobierania i zachowania użytkowników sieci wodociągowej są kwestią indywidualną. W tym celu sporządzono wykresy zależności współczynników nierównomierności: N_h , N'_h , M_h i M'_h od liczby mieszkańców, prezentowane na rysunku 3(a-d). Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, że nie występuje skorelowanie współczynników nierównomierności rozbiórów minimalnych M_h i M'_h z parametrem takim, jak liczba mieszkańców, w przeciwieństwie do współczynników nierównomierności rozbiórów maksymalnych N_h i N'_h wykazujących ten związek. W sposób zgodny z oczekiwaniami, ich wartości maleją wraz ze zwiększaniem liczby mieszkańców. Na wielkość współczynników rozbiórów minimalnych ma wpływ przede wszystkim stopień szczelności instalacji wewnętrznej, stąd też brak jest korelacji z liczbą mieszkańców. Współczynnik nierównomierności godzinowej N_h jest najsilniej skorelowany z liczbą mieszkańców a współczynnik korelacji wynosi $r = 0,65$. Opracowane zależności pomiędzy wielkością współczynników nierównomierności rozbiórów maksymalnych N_h i N'_h a liczbą mieszkańców muszą być jeszcze zweryfikowane na podstawie większej liczby obiektów badawczych. Demonstrują one jednak nowe podejście

co do precyzyjnego oszacowania w przyszłości wartości współczynników nierównomierności rozbiórów maksymalnych do projektowania przyłączy lub też całych układów sieci wodociągowych, zaopatrujących w wodę nowe osiedla mieszkaniowe. Warto przy tym podkreślić, że zgodnie z najlepszą wiedzą autorów analogiczne zależności nie są dostępne, jak dotąd, w literaturze branżowej i wytycznych projektowych.

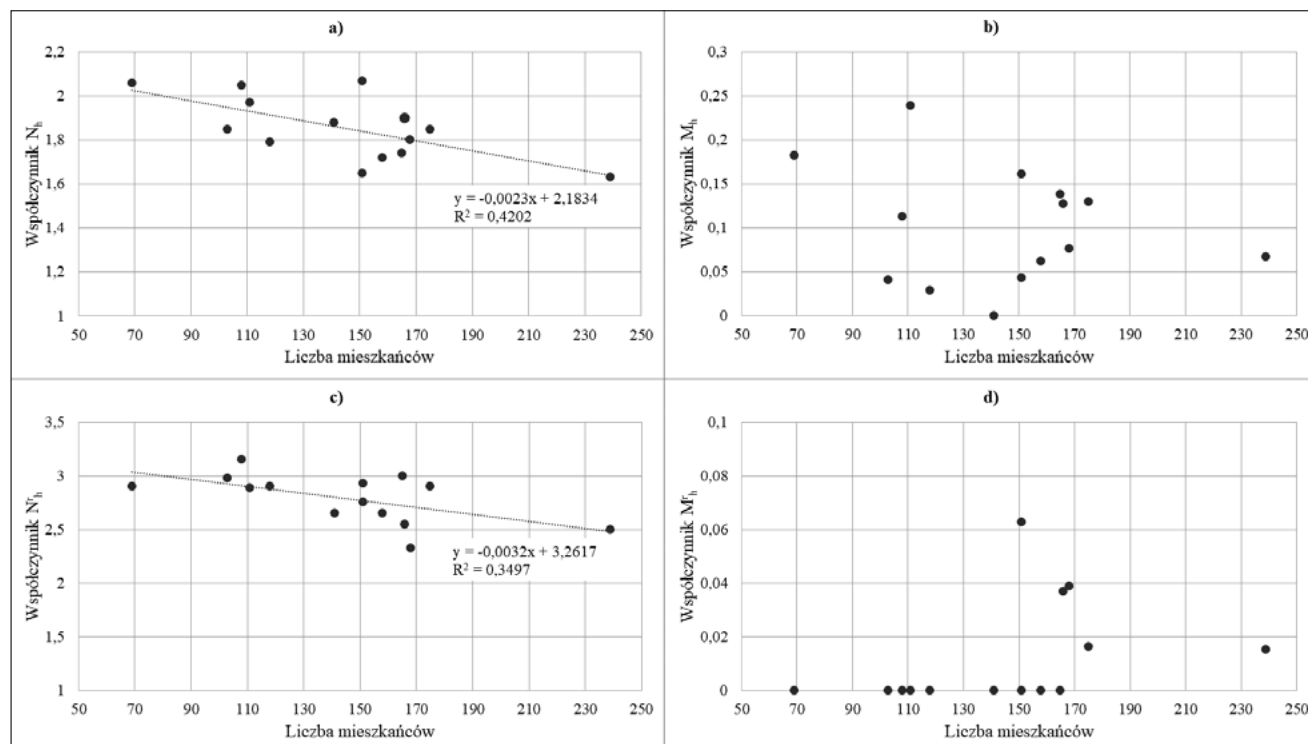
Wnioski

Potrzeba zaktualizowania jednostkowych norm zużycia wody i współczynników nierównomierności wynika z wykazanych, nie tylko w niniejszej pracy, ale również w wielu badaniach krajowych, rozbieżności między rzeczywistymi a normowymi wartościami tych parametrów. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. [20] oraz wytyczne do programowania zapotrzebowania wody i ilości ścieków [21] określają znacznie zawyżone wskaźniki jednostkowego zapotrzebowania na wodę oraz niemiarodajne współczynniki godzinowe i dobowe rozbiórów wody.

Na wielkość poboru wody wpływa wiele czynników, w tym socjodemograficznych oraz losowych, czego przykładem w ostatnim czasie na podstawie przeprowadzonych badań stała się pandemia COVID-19. Wiedza na temat rzeczywistych

wartości jednostkowego zapotrzebowania na wodę oraz współczynników nierównomierności dobowej i godzinowej jest niezbędna do eksploatacji oraz optymalizacji pracy obiektów towarzyszących, projektowania i modelowania sieci wodociągowej. Znajomość wielkości zużycia wody oraz jej zmienności powinna być także podstawą wytycznych dla nowo projektowanej infrastruktury, dzięki czemu wyeliminowany zostałby obserwowany problem z wymiarowaniem przewodów wodociągowych. Ponadto warto wspomnieć, że dynamika poboru wody wpływa bezpośrednio na dynamikę zrzutu ścieków, dlatego też parametry jednostkowego zużycia wody oraz współczynniki nierównomierności mogą być jednocześnie wykorzystane w eksploatacji, projektowaniu i modelowaniu sieci kanalizacji sanitarnej.

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły rozbieżności między parametrami rzeczywistego a normatywnego poboru wody. Prezentowane wstępne wyniki badań, uzyskane w ramach rozwoju systemu eksperckiego rozbioru wody i usług sieciowych, opracowywanego przez firmę Softblue S.A. we współpracy z MWiK w Bydgoszczy, dowodzą konieczności prowadzenia ciągłej rejestracji danych o rozbiorach wody przez odbiorców końcowych ze zdecydowaną większą częstotliwością, niż stosowana standardowo do celów bilingowych. W pełni wiarygodne wartości współczynników nierównomierności można



Rys. 3.

Zależność wartości współczynników nierównomierności rozbiórów wody od liczby mieszkańców w budynkach wielorodzinnych

Fig. 3. Dependence of the non-uniformity coefficients of water consumption on the number of inhabitants in multi-family buildings

uzyskać dopiero w wyniku opracowania szeregów czasowych z wieloletnia, jednak przeprowadzone analizy już na tym etapie są źródłem wiedzy przydatnej w eksploatacji, projektowaniu i modelowaniu sieci wodociągowych.

Podziękowanie

Pracę zrealizowano w ramach projektu „System ekspercki rozbioru wody i usług sieciowych” –POIR. 01.01.01-00-1115/20, dofinansowanego z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

LITERATURA

- [1] J. Li, Y. Xiafei i R. Sitzenfrei, „Rethinking the Framework of Smart Water System: A Review,” *Water*, 12.2: 412 2020. DOI: 10.3390/w12020412
- [2] T. Cichoń i J. Królikowska, „W jakim kierunku zmierza gospodarka wodociągowa – szanse i zagrożenia wynikające z zastosowania elektronicznych liczników,” *Instal*, pp. 51-54, 11 2019. DOI: 10.36119/15.2019.11.6
- [3] T. Cichoń, J. Królikowska i E. Nachlik, *Gospodarka wodociągowa. Wyzwania i możliwości*, Kraków: Politechnika Krakowska, 2020.
- [4] D. Kowalski, B. Kowalska, M. Kwietniewski i E. Sysa, „Koncepcja lokalizacji punktów pomiaru ciśnienia w systemie monitoringu wybranej sieci wodociągowej,” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, pp. 394-400, 10 2013.
- [5] M. Ghiassi, F. Fa’al i A. Abrishamchi, „Large metropolitan water demand forecasting using DAN2, FTDNN, and KNN models: A case study of the city of Tehran, Iran,” *Urban Water Journal*, pp. 655-659, 14.6 2017. DOI: 10.1080/1573062X.2016.1223858
- [6] A. Jedlikowski i S. Englart, „Wpływ zastosowania baterii czepalnych na zużycie wody w budynkach,” *Rynek Instalacyjny*, pp. 74-77, 11 2019.
- [7] P. Dzirnińska, S. Drzewiecki, M. Ruman, K. Kosek, K. Mikołajewski i P. Licznar, „The Use of Cluster Analysis to Evaluate the Impact of COVID-19 Pandemic on Daily Water Demand Patterns,” *Sustainability*, p. 5772, 13(11) 2021. DOI: 10.3390/su13115772
- [8] J. Wawrzosek, S. Ignaciuk, J. Stańczyk i J. Kajewska-Szkudlarek, „Water Consumption Variability Based on Cumulative Data From Non-simultaneous and Long-term Measurements,” *Water Resources Management*, p. 2799-2812, 35 2021. DOI: 10.1007/s11269-021-02868-6
- [9] P. Licznar i K. Ramm, *Analiza baz danych zapisów wodomierzy do dynamicznego modelowania rozbiorów wody*, Warszawa: Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., 2021.
- [10] K. P. Tuz i J. Gwoździej-Mazur, „Nierównomierność rozbioru wody w obiektach użyteczności publicznej w aspekcie doboru wodomierzy,” *Instal*, pp. 51-54, 5 215.
- [11] W. Koral, „Badania jednostkowego zużycia wody w budynku wielorodzinnym dla pomiarów dobowych,” *Instal*, pp. 46-49, 11 2019. DOI: 10.36119/15.2019.11.5
- [12] L. Cimorelli, C. Covelli, B. Malino i D. Pianese, „Optimal Regulation of Pumping Station in Water Distribution Networks Using Constant and Variable Speed Pumps: A Technical and Economical Comparison,” *Energies*, 13.10: 2530 2020. DOI: 10.3390/en13102530
- [13] [13] W. Chen, T. Tao, A. Zhou, L. Zhang, L. Liao, X. Wu i Z. Li, „Genetic optimization toward operation of water intake-supply pump stations system,” *Journal of Cleaner Production*, p. 123573, 279 2021.
- [14] K. Kowalczyk, „Inteligentne i ekonomiczne opomiarowanie zużycia wody,” *Rynek Instalacyjny*, pp. 89-90, 4 2021.
- [15] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2002 z dnia 11 grudnia 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej, tom Dz. U. L 328/210 21.12.2018.
- [16] M. Jaszewska, „Zmiany jednostkowego zużycia wody na cele socjalno-bytowe w ostatnich latach na przykładzie Szczecina,” *Instal*, pp. 44-47, 11 2015.
- [17] D. Kowalski, B. Kowalska, M. Skwarek i D. Czuryło, „Zmiany wielkości zużycia wody w wybranych krajach europejskich, w latach 1990-2016,” *Instal*, pp. 42-44, 6 2019.
- [18] D. Szpak i B. Tchórzewska-Cieślak, „Analiza zmian produkcji oraz zużycia wody w miastach powiatowych południowo-wschodniej Polski,” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, pp. 175-177, 4 2017. DOI: 10.15199/17.2017.4.16
- [19] M. Świętochowska, „Nierównomierność godzinowa rozbioru wody w wybranych budynkach wielokomunalnych,” *Technologia Wody*, pp. 28-33, 5 (73) 2020.
- [20] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody., *Dz.U.* 2002 nr 8 poz. 70.
- [21] *Wytyczne do programowania zapotrzebowania wody i ilości ścieków w miejskich jednostkach osadniczych*, Warszawa: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, 1991.
- [22] E. Ogiłda, I. Nowogórski i M. Walas, „Charakterystyka zużycia wody w Nowogrodzie Bobrzańskim,” *Rynek Instalacyjny*, pp. 76-79, 11 2015.
- [23] E. W. Mielcarzewicz, *Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę*, Arkady, 2000.
- [24] K. Knapik i J. Bajera, *Wodociągi: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*, Kraków: Politechnika Krakowska, 2011.
- [25] J. Bajera i R. Iwanek, „Dynamika zmian jednostkowego zużycia wody w wybranych miastach Polski południowej” *Instal*, pp. 64-68, 4 2014.
- [26] J. Chudzicki i A. Sołduszkiewicz, „Badania jednostkowego zużycia wody w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych na przykładzie Spółdzielni Mieszkaniowej „URSUS” w Warszawie,” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, pp. 16-19, 1 2006.
- [27] W. Szaflik, „Zmienność jednostkowego średniego rocznego zużycia ciepłej i zimnej wody w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych,” *Instal*, pp. 26-30, 3 2021. DOI: 10.36119/15.2021.3.3