

# Ryzyko pogodowe w funkcjonowaniu przedsiębiorstw wodno-kanalizacyjnych w Polsce

Weather risk in the functioning of water-sewage companies in Poland

JANUSZ RAK, KATARZYNA WARTALSKA, BARTOSZ KAŹMIERCZAK

DOI 10.36119/15.2021.1.4

Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne są podmiotami szczególnie wrażliwymi na wahania czynników pogodowych. Problem ten jest szczególnie istotny w obliczu postępujących zmian klimatu. W artykule przedstawiono dotychczasowy stan wiedzy o analizie i ocenie ryzyka pogodowego. Zaproponowano 3 nowe indeksy pogodowe dla systemów wodociągowych i kanalizacyjnych w Polsce, aby przedsiębiorstwa te mogły skutecznie przystąpić do zarządzania ryzykiem pogodowym: indeks opadów dobowych, indeks dób mroźnych i indeks dób bardzo ciepłych. Zweryfikowano również częstość ich występowania na podstawie danych z 19 stacji meteorologicznych z okresu 1970–2019. Wykazano, że analizowane indeksy pogodowe przekraczane były w przeszłości średnio raz na 6 lat. Szczególną uwagę należy zwrócić na indeks dób bardzo ciepłych, które występują stosunkowo najrzadziej, jednak można zauważyć wyraźny trend częstotliwości ich występowania. Analiza wykazała również, że ocieplenie klimatu nie wpływa póki co na częstość osiągnięcia indeksu dób mroźnych.

*Słowa kluczowe: ryzyko pogodowe, zmiany klimatu, wodociągi, kanalizacja, indeksy pogodowe*

Water and sewage companies are entities particularly sensitive to fluctuations in weather factors. This problem is particularly important in the face of progressive climate change. The article presents the current state of knowledge on the analysis and assessment of weather risk. Three new weather indexes for water supply and sewage systems in Poland were proposed so that these enterprises could effectively start managing the weather risk: daily precipitation index, frost day index, and hot day index. Their frequency was also verified based on data from 19 meteorological stations from the period 1970–2019. It has been shown that the analyzed weather indices were exceeded in the past once every 6 years, on average. Particular attention should be paid to very hot days and nights, which occur relatively rarely, but there is a clear trend in their frequency. The analysis also showed that global warming does not affect the frequency of reaching the frost day index.

*Keywords: weather risk, climate change, water supply, sewage systems, weather indexes*

## Wstęp

Ryzyko jest obecne we wszystkich dziedzinach działalności człowieka. Wyróżnić można ryzyko społeczne, będące efektem działalności człowieka oraz ryzyko przyrodnicze, wynikające z niepożądanych działań natury [1, 2]. Ryzyko pogodowe jest szczególnym rodzajem ryzyka przyrodniczego i odnosi się do ekspozycji działalności przedsiębiorstwa na wahania czynników pogodowych (temperatury, opadów, siły wiatru, itd.) [3, 4]. Następstwem ryzyka pogodowego może być przykładowo malejąca wartość produkcji wody. Wynikająca z tego malejąca podaż sprawia, że ceny wody mogą ulec zmianie (zwiększenie ceny 1 m<sup>3</sup> wody).

Badania związane z ryzykiem pogodowym nabierają na znaczeniu szczególnie w obliczu postępujących zmian klimatu [5].

Wzrost średnich temperatur prowadzi do zwiększenia częstości występowania anomalii i ekstremalnych zjawisk pogodowych, które wymuszają podjęcie działań adaptacyjnych do zachodzących zmian [6, 7].

Przeciwdziałanie czynnikiem pogodowym jest bardzo trudne, a ich uniknięcie – niemożliwe. Komplikuje to próby przeciwdziałania ryzyku pogodowemu [3]. Kluczowe stało się wskazanie odpowiednich instrumentów, które umożliwią ograniczenie tego rodzaju ryzyka. Instrumentami umożliwiającymi skuteczne zarządzanie ryzykiem pogodowym stały się pochodne instrumenty pogodowe, zwane również derywatami pogodowymi, które umożliwiają przeniesienie ryzyka poza przedsiębiorstwo [8, 9]. Są to dwustronne kontrakty terminowe, rozliczane na podstawie warunków atmosferycznych, takich jak indeksy temperaturowe czy opadowe.

Umowa taka określa warunki płatności pomiędzy stronami zawierającymi transakcję, w zależności od zajścia określonych zdarzeń pogodowych w okresie trwania kontraktu [1]. Jako stosunkowo młody, rynek derywatów nie jest jeszcze wystarczająco elastyczny. Wiele branż czy przedsiębiorstw nie oszacowało jeszcze swojej ekspozycji na ryzyko pogodowe, nie mówiąc już o opracowaniu polityki zabezpieczającej przed tym rodzajem ryzyka [9].

Głównym celem pracy jest podsumowanie wiedzy o analizie i ocenie ryzyka pogodowego, aby przedsiębiorstwa gospodarki komunalnej mogły skutecznie przystąpić do zarządzania ryzykiem pogodowym. W pracy przedstawiono metody zarządzania ryzykiem pogodowym i zaproponowano nowe indeksy pogodowe dla systemów wodociągowych

Prof. dr hab. inż. Janusz Rak, <https://orcid.org/0000-0001-7713-5841> – Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska; dr inż. Katarzyna Wartalska, <https://orcid.org/0000-0002-5855-3607>, dr hab. inż. Bartosz Kaźmierczak, <https://orcid.org/0000-0003-4933-8451> – Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska. Adres do korespondencji / Corresponding author: [katarzyna.wartalska@pwr.edu.pl](mailto:katarzyna.wartalska@pwr.edu.pl).

i kanalizacyjnych, jako podmiotów równie mocno wrażliwych na warunki atmosferyczne.

## Ryzyko pogodowe

Biorąc pod uwagę wpływ na otoczenie, rozróżnić należy dwa rodzaje ryzyka pogodowego: o charakterze katastroficznym i niekatastroficznym [10, 11]. Ryzyko o charakterze katastroficznym jest niebezpieczeństwem związanym z występowaniem ekstremalnych zjawisk pogodowych, które mają niewielkie prawdopodobieństwo wystąpienia, wywołują jednak ogromne straty finansowe lub zagrożenie życia. Ryzyko pogodowe o charakterze niekatastroficznym wiąże się natomiast z odchyleniami od „normalnych” warunków pogodowych. Zjawiska takie mają wpływ na działalność przedsiębiorstwa, jednak nie zagrażają życiu ani mieniu [12]. Ryzyko pogodowe o charakterze niekatastroficznym opisuje więc narażenie na finansowy zysk lub stratę w wyniku zmienności warunków pogodowych, nieprowadzącej jednak do katastrof naturalnych [1, 13]. W literaturze pojęcie ryzyka pogodowego jest zwykle utożsamiane właśnie z ryzykiem pogodowym o charakterze niekatastroficznym [11].

W przeszłości wiele przedsiębiorstw nie brało pod uwagę zarządzania ryzykiem pogodowym, a jedynie starały się jak najlepiej radzić sobie z negatywnymi konsekwencjami niekorzystnej pogody. Systemowe zarządzanie ryzykiem pogodowym staje się jednak koniecznością, wynikającą z trendu zmieniającego się klimatu [10]. Pojawiające się z coraz większą częstotliwością katastrofy naturalne wymuszają zwiększenie efektywności zarządzania ryzykiem.

W Polsce prowadzone są działania mające na celu zarządzanie ryzykiem katastrof. Przykładowe to System Monitoringu Suszy Rolniczej w Polsce (SMSR) czy Informatyczny System Osłony Kraju (ISOK) mający na celu systemową ochronę społeczeństwa, gospodarki i środowiska przed nadzwyczajnymi zagrożeniami.

Dostępne strategie zarządzania ryzykiem można podzielić, niezależnie od rodzaju ryzyka pogodowego, na cztery grupy działań: unikanie i redukcję (metody fizyczne), oraz retencję i transfer ryzyka (metody finansowe) [5]. Strategia unikania zakłada unikanie wszelkich działań związanych z ryzykiem, szczególnie w odniesieniu do katastrof naturalnych. Przedsiębiorstwo stosujące tę strategię rezygnuje ze sprzedaży lub produkcji na obszarach o niekorzystnej pogodzie [10]. Redukcja ryzyka polega na zastosowaniu metod

zmniejszających prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka i redukcji szkód w przypadku, gdy ryzyko już wystąpi. Następuje to m.in. poprzez stosowanie odpornych rozwiązań konstrukcyjnych różnego rodzaju budowlani, a także tworzenie systemów wczesnego ostrzegania i zarządzania kryzysowego [14]. Retencja ryzyka wymusza pokrycie ewentualnych strat ze środków własnych. Jeżeli jest to świadome działanie, to wymaga stworzenia odpowiedniej rezerwy finansowej na pokrycie strat. Jeżeli wynika z braku wiedzy, to prowadzi do bankructwa, a nawet odpowiedzialności zawodowej lub karnej. Transfer ryzyka polega na jego przeniesieniu na wyspecjalizowany podmiot – firmę ubezpieczeniową. Ubezpieczyciel zwykle dokonuje ponownego transferu ryzyka na reasekuranterów. Wybór odpowiedniej strategii (lub ich kombinacji) powinien być poprzedzony identyfikacją ryzyka (identyfikacją zagrożeń, ich potencjalnego wpływu i prawdopodobieństwa wystąpienia) [5].

Instrumenty mające na celu ochronę branż gospodarki przed ryzykiem pogodowym można podzielić na dwie główne grupy, wykorzystywane w zależności od rodzaju ryzyka, i są to ubezpieczenia i instrumenty pochodne. Ubezpieczenia są rozwiązaniem adekwatnym w przypadku ekstremalnych zjawisk pogodowych, oferując przedsiębiorstwom długoterminową ochronę [1]. Długoterminowe rozwiązania proponowane przez ubezpieczycieli często nie są jednak wystarczające dla przedsiębiorstw w wielu branżach, które narażone są nawet na krótkotrwałe wahania warunków pogodowych. Każde odchylenie od średniej może mieć bowiem wpływ na ograniczenie zysków. Rozwiązaniami finansowymi najlepiej zabezpieczającymi przed ryzykiem pogodowym o charakterze niekatastroficznym stały się pochodne instrumenty (derywaty) pogodowe.

Zależnie od czynnika atmosferycznego mającego wpływ na przychody przedsiębiorstwa, obecnie, przede wszystkim na amerykańskim rynku, można wyróżnić następujące rodzaje terminowych kontraktów pogodowych [11]: kontrakty zależne od temperatury, kontrakty deszczowe, na opad śniegu, mrozowe oraz huraganowe. Zdefiniowany indeks pogody umożliwia wycenę wartości zabezpieczenia. Wszelka analiza ryzyka pogodowego w przedsiębiorstwie wymaga więc bogatej bazy danych meteorologicznych. Problem jakości, dostępności i kosztu danych pogodowych różni się w poszczególnych krajach, co jest istotne z punktu widzenia ryzyka bazowego. W tym kontekście dostępność wiarygodnych historycznych danych mete-

orologicznych dla danego regionu pozostaje jedną z najważniejszych barier szerszego wykorzystania pochodnych instrumentów pogodowych [5].

Pochodne instrumenty pogodowe mogą stanowić dobre narzędzie zabezpieczenia dochodów podmiotów gospodarczych, jakimi są firmy wodociągowo-kanalizacyjne. Aby zilustrować działanie mechanizmu pogodowego instrumentu pochodnego, najlepiej odnieść się do indeksu temperatury. W momencie, gdy gminna firma wodociągowa nie jest w stanie dostarczać wody w ilości wynikającej z popytu w upalne dni (studnie nie gwarantują wymaganej wydajności), ograniczenia w dostawach wody generują straty finansowe. Firma wodociągowa może zawrzeć kontrakt na określony czas (np. od czerwca do września), na każdy dzień, w którym temperatura przekroczy daną wysokość (np. 25°C). W efekcie firma uzyska odszkodowanie w ustalonej wysokości i dzięki temu osiągnie przychody mimo zbyt wysokiej temperatury w danym okresie. Aby przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne mogły skutecznie zabezpieczać się przed ryzykiem pogodowym, sprawą pierwszorzędną staje się tworzenie modeli wyceny instrumentów pogodowych, a także wskazania indeksów pogodowych adekwatnych dla tej branży.

Branża wodociągowo-kanalizacyjna wrażliwa jest przede wszystkim na obfite opady deszczu oraz okresy wysokich i niskich temperatur. W czasie dni z wysokimi sumami opadów deszczowych występuje zjawisko przeciążenia hydraulicznego kanalizacji deszczowej, co zwiększa ryzyko wystąpienia wylewów z kanałów i w efekcie zalewania ulic, piwnic, podtopień terenów czy zrzutów burzowych w przypadku kanalizacji ogólnośpławnej [15, 16]. Z kolei w dni mroźne rośnie ryzyko awarii przewodów wodociągowych, a w dni upalne znacznie zwiększa się popyt wody (ponad wydajność ujęć wody) [17, 18, 19, 20]. W związku z powyższym proponuje się następujące indeksy pogodowe dla branży wodno-kanalizacyjnej w Polsce (nie obejmujące obszarów górskich):

- indeks opadów dobowych (dla kanalizacji deszczowej i ogólnośpławnej) – jeżeli opad dobowy przekracza 50 mm,
- indeks dób mroźnych (dla podłączeń wodociągowych) – jeżeli średnia temperatura jest niższa niż -15°C przez kolejne 5 dni,
- indeks dób bardzo ciepłych (dla zużycia wody wodociągowej) – jeżeli średnia temperatura jest wyższa niż 25°C przez kolejne 5 dni.

W celu zweryfikowania częstości występowania zaproponowanych indeksów pogodowych wykorzystano dane meteorologiczne z 19 stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) z lat 1970–2019 (50 lat obserwacji). Dane pochodzą ze stacji meteorologicznych zlokalizowanych w Białymstoku, Gdańsku, Gorzowie Wielkopolskim, Katowicach, Kielcach, Koszalinie, Krakowie, Lublinie, Łodzi, Olsztynie, Opolu, Poznaniu, Rzeszowie, Suwałkach, Szczecinie, Toruniu, Warszawie, Wrocławiu i Zielonej Górze.

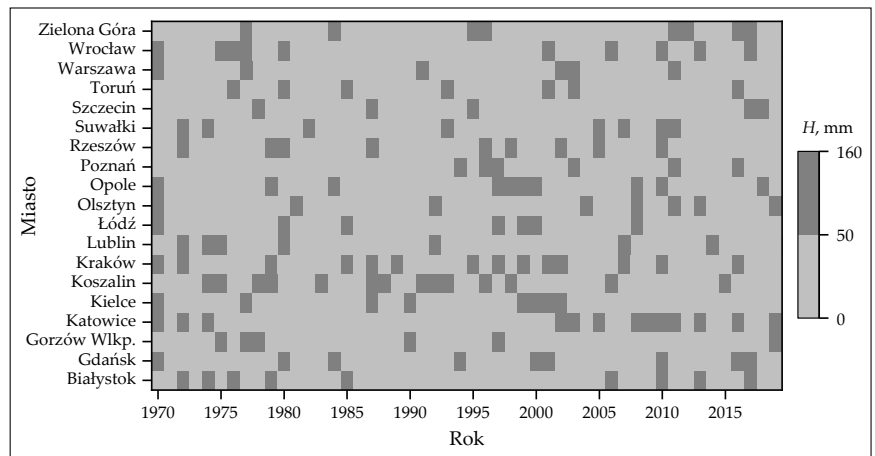
## Wyniki

Intensywne opady deszczowe występują w Polsce przede wszystkim w miesiącach letnich – od czerwca do sierpnia. Na rys. 1 przedstawiono lata, osobno dla każdej miejscowości, w których indeks opadowy (50 mm) został osiągnięty co najmniej raz. Pomimo dużej zmienności czaso-prze-strzennej opadów można wyróżnić lata 1971, 1973 i 1986, w których indeks opadów dobowych nie został osiągnięty w żadnym z 19 analizowanych miast. Odmienna sytuacja wystąpiła w 1970 roku, kiedy to indeks opadów dobowych został osiągnięty aż w 9 lokalizacjach.

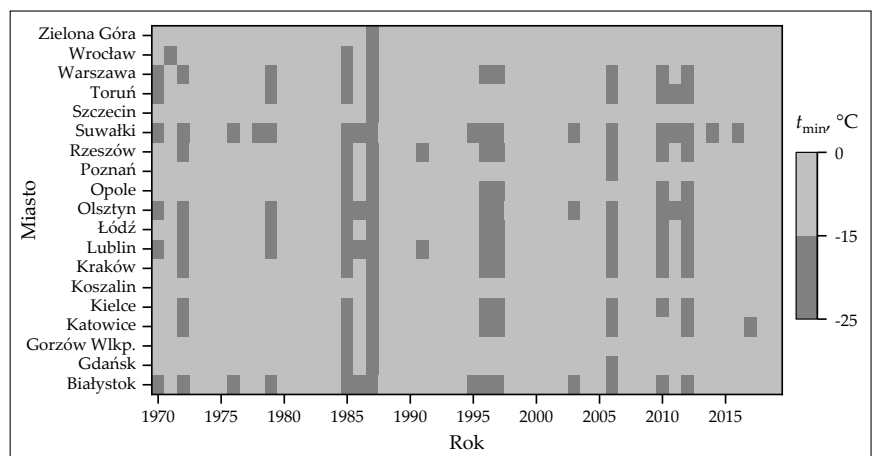
Absolutnie maksymalny opad dobowy wynoszący aż 155,2 mm zarejestrowano w Kielcach w 2001 roku, natomiast minimalny (z maksymalnych) wynoszący zaledwie 12,3 mm zarejestrowano w Poznaniu w 1992 roku. W przypadku każdej z analizowanych miejscowości występowały lata, w których opady przekraczały proponowany indeks opadów dobowych. Opady takie najczęściej występowały w Katowicach, Koszalinie i Krakowie – po 16 razy, najrzadziej natomiast w Szczecinie (5 razy) i Gorzowie Wlkp., Poznaniu i Warszawie (po 6 razy).

Doby mroźne występują w Polsce przede wszystkim w miesiącach zimowych – od grudnia do lutego, przy czym polskim biegunem zimna (nie licząc terenów górzystych) jest Suwalszczyzna. Na rys. 2 przedstawiono lata, osobno dla każdej miejscowości, w których indeks dób mroźnych (średnia temperatura jest niższa niż  $-15^{\circ}\text{C}$  przez kolejne 5 dni) został osiągnięty co najmniej raz.

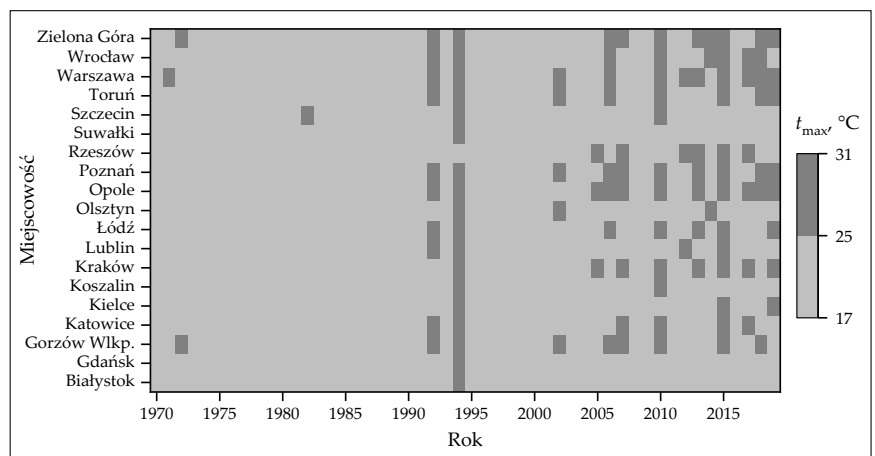
W przeciwieństwie do indeksu opadów dobowych, w przypadku indeksu dób mroźnych widać podobieństwo między stacjami w poszczególnych latach. Wyróżnić można rok 1987, w którym indeks dób mroźnych został osiągnięty w każdej z analizowanych miejscowości. Z kolei w latach 1973–1975, 1977, 1980–1984,



Rys. 1. Osiągnięcie indeksów opadowych w latach 1970–2019  
Fig. 1. Achieving the precipitation indexes in the years 1970–2019



Rys. 2. Osiągnięcie indeksów dób mroźnych w latach 1970–2019  
Fig. 2. Achieving the frost day indexes in the years 1970–2019



Rys. 3. Osiągnięcie indeksów dób bardzo ciepłych w latach 1970–2019  
Fig. 3. Achieving the hot day indexes in the years 1970–2019

1988–1990, 1992–1994, 1998–2002, 2004–2005, 2007–2008, 2013, 2015 i 2018–2019 indeks dób mroźnych nie został osiągnięty w żadnej z analizowanych lokalizacji. Minimalną pięciodniową temperaturę (średnią z pięciu dni) wynoszącą jedynie  $-23,2^{\circ}\text{C}$  zarejestrowano

w Suwałkach w 1987 roku, natomiast maksymalną (z minimalnych) wynoszącą aż  $-1,4^{\circ}\text{C}$  zarejestrowano w Gdańsku w 1989 roku. W przypadku każdej z analizowanych miejscowości występowały lata, w których pięciodniowa temperatura spadała poniżej proponowanego indeksu

dób mroźnych. Temperatury takie najczęściej występowały w Suwałkach (28 razy) i Białymstoku (19 razy), najrzadziej natomiast w Koszalinie, Szczecinie i Zielonej Górze (po 2 razy).

Doby bardzo ciepłe, podobnie jak maksymalne opady, występują w Polsce przede wszystkim w miesiącach letnich – od czerwca do sierpnia. Na rys. 3 przedstawiono lata, osobno dla każdej miejscowości, w których indeks dób bardzo ciepłych (średnia temperatura jest wyższa niż 25°C przez kolejne 5 dni) został osiągnięty co najmniej raz.

Podobnie jak w przypadku indeksu dób mroźnych, w przypadku indeksu dób bardzo ciepłych widać podobieństwo między stacjami w poszczególnych latach. Wyróżnić można rok 1994, w którym indeks dób bardzo ciepłych został osiągnięty w każdej z analizowanych miejscowości z wyjątkiem Rzeszowa. Z kolei w latach 1970, 1973–1981, 1983–1991, 1993, 1995–2001, 2003–2004, 2008–2009, 2011 i 2016 indeks dób bardzo ciepłych nie został osiągnięty w żadnej z analizowanych lokalizacji. Maksymalną pięciodniową temperaturę wynoszącą aż 29,5°C zarejestrowano w Zielonej Górze w 1994 roku, natomiast minimalną (z maksymalnych) 17,9°C zarejestrowano w Suwałkach w 1987 roku. W przypadku każdej z analizowanych miejscowości występowały lata, w których pięciodniowa temperatura przekraczała proponowany indeks dób bardzo ciepłych. Temperatury takie najczęściej występowały w Opolu, Warszawie i Zielonej Górze (po 13 razy), najrzadziej natomiast w Białymstoku, Gdańsku i Suwałkach (po 1 razie). Należy jednak zauważyć, że w przypadku większości miejscowości indeks dób bardzo ciepłych osiągany był zdecydowanie częściej na początku XXI wieku, w porównaniu z ostatnimi 3 dekadami wieku XX. Związane jest to z ociepleniem klimatu. Należy się więc spodziewać, że w kolejnych latach indeks ten będzie osiągany coraz częściej.

## Wnioski

W przypadku indeksu opadów dobowych (opady dobowe przekraczające 50 mm) odnotowano jego przekroczenie w latach 1970–2019 w każdym z 19 analizowanych miast – średnio 9,5 razy na 50 lat, przy czym najrzadziej w Szczecinie (5 razy), Gorzowie Wlkp., Poznaniu i Warszawie (po 6 razy), a najczęściej w Katowicach, Koszalinie i Krakowie (po 16 razy). W przypadku indeksu dób mroźnych (średnia temperatura jest niższa niż -15°C przez kolejne 5 dni) odnotowano jego przekroczenie również w każdym

z 19 analizowanych miast – średnio 9,7 razy na 50 lat, przy czym najrzadziej w Koszalinie, Szczecinie i Zielonej Górze (po 2 razy), a najczęściej w Suwałkach (28 razy) i Białymstoku (19 razy). W przypadku indeksu dób bardzo ciepłych (średnia temperatura jest wyższa niż 25°C przez kolejne 5 dni) odnotowano jego przekroczenie również w każdym z 19 analizowanych miast – średnio 6,5 razy na 50 lat, przy czym najrzadziej w Białymstoku, Gdańsku i Suwałkach (po 1 razie), a najczęściej w Opolu, Warszawie i Zielonej Górze (po 13 razy).

Zaproponowane indeksy pogodowe dla branży wodociągowo-kanalizacyjnej przekraczane były w przeszłości średnio raz na 6 lat. Oczywiście, ze względu na lokalne uwarunkowania, w niektórych miejscowościach (Suwałki czy Białystok) indeks dób mroźnych osiągany był częściej, a indeks dób bardzo ciepłych rzadziej – niż w innych miejscowościach. Szczególną uwagę należy zwrócić na indeks dób bardzo ciepłych. Z jednej strony występują one stosunkowo najrzadziej, lecz z drugiej strony można zauważyć wyraźny trend częstotliwości ich występowania. Biorąc pod uwagę globalne ocieplenie należy spodziewać się, że indeks ten będzie osiągany coraz częściej. Indeks dób bardzo ciepłych osiągany był w pierwszych dwóch dekadach XXI wieku znacznie częściej, niż w ostatnich trzech dekadach XX wieku. Co ciekawe należy zauważyć, że ocieplenie klimatu nie wpływa póki co na częstość osiągania indeksu dób mroźnych.

Rozwój rynku instrumentów pogodowych, z uwagi na przynależność do Unii Europejskiej, będzie prawdopodobnie dynamicznie rozwijał się również w Polsce. Ryzyko pogodowe staje się bardzo ważną kategorią dla wielu przedsiębiorstw; jakkolwiek pogoda oddziałuje na funkcjonowanie przedsiębiorstw od zawsze. Branża wodociągowo-kanalizacyjna w Polsce wrażliwa jest przede wszystkim na obfite opady deszczu oraz okresy wysokich i niskich temperatur. W czasie dni z wysokimi sumami opadów deszczowych występuje zjawisko przeciążenia hydraulicznego kanalizacji deszczowej. Z kolei w dni mroźne rośnie ryzyko awarii przewodów wodociągowych, a w dni upalne znacznie zwiększa się popyt na wodę. Zaproponowane w pracy trzy indeksy pogodowe pomogą chronić interesy branży wodociągowo-kanalizacyjnej w Polsce. Dostawa wody w gorące dni (charakteryzujące się zazwyczaj zwiększonym zapotrzebowaniem na wodę), będzie stanowić jedno z największych wyzwań branży wodociągowo-kanalizacyjnej w Polsce.

Przedstawione wartości progowe indeksów pogodowych mają charakter wstępny i autorzy są otwarci na merytoryczną dyskusję w tym temacie.

## LITERATURA

- [1] Michalak D. (2011). Derywaty pogodowe jako instrument efektywnego zarządzania ryzykiem pogodowym. *Acta Innovations*, (1), 41-47.
- [2] Preś J. (2014). Zarządzanie ryzykiem pogodowym. CeDeWu, Warszawa 2007, s. 17.
- [3] Blachowski D. (2011). Ryzyko pogodowe i pogodowe instrumenty pochodne w przedsiębiorstwach energetycznych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia*, (38), 639-648.
- [4] Clemmons L.: Introduction to Weather Risk Management, [w:] Weather Risk Management. Markets, products and applications, red. E. Banks, Palgrave 2002, Nowy Jork, s. 3
- [5] Wieczorek-Kosmala M. (2020). Weather Risk Management in Energy Sector: The Polish Case. *Energies*, 13(4), 945.
- [6] Aaron Ray, Llewelyn Hughes, David M. Konisky, Charles Kaylor. Extreme weather exposure and support for climate change adaptation. *Global Environmental Change*, 2017, vol. 46, 104-113.
- [7] Guthrie G. Real options analysis of climate-change adaptation: investment flexibility and extreme weather events. *Climatic Change* 156, 231–253 (2019).
- [8] Campbell S. D., & Diebold F. X. (2005). Weather forecasting for weather derivatives. *Journal of the American Statistical Association*, 100(469), 6-16.
- [9] Alaton P., Djehiche B., & Stillberger D. (2002). On modelling and pricing weather derivatives. *Applied mathematical finance*, 9(1), 1-20.
- [10] Śtulec I., Bałković T., & Hruška D. (2012, January). Weather risk management in energy sector. In 23rd International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Sustainability.
- [11] Czekaj Z. (2016). Derywaty pogodowe jako instrument zarządzania ryzykiem pogodowym. *Ruch prawniczy, ekonomiczny i socjologiczny*, 78(1).
- [12] Liu X. (2006) Weather derivatives: a contemporary review and its application in China, Master Thesis, University of Nottingham
- [13] Brockett P. L., Wang M., Yang C. (2005) Weather derivatives and weather risk management, *Risk Management and Insurance Review*, Vol. 8, No. 1, pp. 127-139.
- [14] Burchard-Dziubińska M. (2016). Ryzyko pogodowe na rynku ubezpieczeń. *Ekonomia XXI wieku*, (12), 46-56.
- [15] Wartalska K., Kaźmierczak B., Nowakowska M., Kotowski A. Precipitation patterns for modeling land drainage in Poland *Urban Water Journal*, 2020, 17(4), pp. 333-343.
- [16] Pieniaszek A. Przepustowość istniejącego układu kanalizacyjnego a metody wyznaczania natężeń deszczu miarodajnych. *Instal* 2018, nr 2, 46–49.
- [17] Żywiec J., Piegoła I., Tchórzewska-Cieślak B. Failure analysis of the water supply network in the aspect of climate changes on the example of the Central and Eastern Europe region. *Sustainability (Switzerland)*, 2019, 11(24), 6886.
- [18] Kutylowska M. Forecasting failure rate of water pipes. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2019, 19(1), pp. 264-273.
- [19] Dawidowicz J., Czapczuk A., Piekarski J. The application of artificial neural networks in the assessment of pressure losses in water pipes in the design of water distribution systems. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2018, 20, pp. 292-308.
- [20] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Szpak D. Paradygmaty analizy i oceny ryzyka w systemach wodociągowych. *Instal* 2019, nr 10, 47–51 DOI 10.36119/15.2019.10.8.