

Wpływ wilgotności względnej powietrza na występowanie pożarów w lasach w centralnej Polsce

The influence of relative humidity on fires in forests of Central Poland

Krystyna Konca-Kędzierska*^{ID}, Krystyna Pianko-Kluczyńska^{ID}

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, PSHM CMOK Sekcja ds. prognoz specjalistycznych, ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa

*Tel. +48 22 5694256, e-mail: krystyna.konca@imgw.pl

Abstract. The purpose of the present work was to answer the question of how and to what extent information about low air humidity in a selected area can be used in determining the fire risk. The central region as defined in the Classification of Territorial Units for Statistics (NUTS) was selected for the study, because this classification is also used in the National Fire Information System, which provides data on the number of forest fires. Data on humidity for a given region was taken from the synoptic or climatic station of The Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMGW-PIB) located in the region.

Two independent experiments were conducted based on various methodological assumptions. In experiment A, the main focus was on humidity deficit, as defined by nine different indicators. Using the relative risk and the Jaccard index, their connection to fire cases of third class or higher was studied. A class reconstruction of the number of fires was also carried out using the fuzzy analogues method and the obtained reconstructions were evaluated using cross-correlation indicators in contingency tables. In experiment B, correlation relationships between the number of fires and the annual characteristics of relative humidity were studied. In order to use the association measures in the cross-tabulation tables, the number of fires and humidity characteristics were categorised using quantiles. The relationship between the number of fires and the percentage share of low-humidity (<40%) days in the year was tested using the Mann-Whitney test.

The obtained values of the examined correlation indices and the analysis of correlation relationships emphasise the important role of relative humidity dynamics in determining the fire risk.

Keywords: forest fires, humidity deficiency, correlations, association measures, fuzzy analogues

Słowa kluczowe: pożary lasów, niska wilgotność powietrza, miary asocjacyjne, długoterminowe prognozy pogody, analogi rozmyte

1. Wstęp

Jednym z bardziej niebezpiecznych i przynoszących duże straty zdarzeń występujących w lasach Polski są pożary. Według danych statystycznych dostępnych w Krajowym Systemie Informacji o Pożarach Lasów (KSIPL 2017), w Polsce procent powierzchni lasów podatnych na pożary wynosi około 85%. Wśród państw Unii Europejskiej Polska należy do krajów średnio zagrożonych pożarami lasów (Szczygieł 2012). Nie należy jednak tego problemu bagatelizować. Przykładowo w 2009 roku Polska znalazła się na trzecim miejscu pod względem liczby pożarów oraz na ósmym miejscu, biorąc pod uwagę spaloną powierzchnię (Szczygieł 2012, za Forest Fires in Europe, Report No 10, 2009).

Czynnikami determinującymi powstawanie i rozprzestrzenianie się pożarów są m.in. warunki meteorologiczne.

W 2010 roku w Instytucie Badawczym Leśnictwa opracowano nową metodę prognostyczną, która – w oparciu o wybrane parametry meteorologiczne (temperaturę i wilgotność względną powietrza i ściółki, opady, prędkość wiatru, zachmurzenie) – pozwala określić aktualne i przewidywane (z wyprzedzeniem do 24 godzin) zagrożenie pożarowe lasu (Prędecka 2011; DGLP 2012).

W niniejszej pracy skupiono się na wilgotności względnej powietrza, będącej jednym z ważniejszych czynników wpływających na możliwość wystąpienia pożarów. Została przeprowadzona analiza w kontekście możliwości zastosowania tego parametru w miesięcznych, trzymiesięcznych i sezonowych prognozach pogody, opracowywanych jako narzędzie wspierające proces ochrony przeciwpożarowej lasów, a także w badaniach nad scenariuszami zagrożeń pożarowych wynikających z symulacji zmian klimatu. Rozważane długoterminowe zagadnienie prognostyczne stanowi uzupełnienie prac

Wpłynęło: 25.10.2017 r., recenzowano: 28.11.2017 r., zaakceptowano: 4.06.2018 r.

wykonanych w IBL nad prognozami zagrożeń dla okresu najbliższej doby (Kwiatkowski 2010).

Praca ma charakter pilotażowy i służy opracowaniu aparatu badawczego potrzebnego do przeprowadzania zaplanowanej analizy wpływu wilgotności względnej powietrza na liczbę pożarów w lasach. Uzyskane wyniki mogą zasygnalizować możliwości przeprowadzenia dalszych badań w tym kierunku.

Badania, przeprowadzone z zastosowaniem dwóch różnych podejść do związku wilgotności względnej powietrza z liczbą odnotowanych pożarów lasów, znacznie różniły się między sobą, zarówno sposobem sformułowania zadania badawczego, jak i zastosowaną metodyką. Pozwoliło to ocenić, jak sposób zdefiniowania zmiennych opisujących (czyli wejściowych) i opisywanych (czyli wyjściowych) oraz wybór algorytmu badającego zależności między badanymi zmiennymi wpływa na zawartą w wilgotności względnej powietrza informację o predyktandzie, czyli liczbie pożarów lasu w wybranym regionie kraju.

2. Dane

Informacja o liczbie pożarów pochodziła z Krajowego Systemu Informacji o Pożarach Lasu (KSIPL 2017) i dotyczyła zestawień rocznych z lat 2007–2016. Analizie poddano dane o liczbie pożarów w 11 podregionach regionu centralnego, zdefiniowanych przez Krajowy System Informacji o Pożarach Lasów na podstawie stosowanej przez GUS Klasyfikacji Jednostek Terytorialnych do Celów Statystycznych, NUTS (wersja z 2017 roku) (ryc. 1).

Informacja o wystąpieniach pożarów jest podawana na dwa sposoby: jako liczba odnotowanych pożarów oraz jako przedziały z następującymi zakresami liczby pożarów: klasa 1: 1–31, klasa 2: 32–62, klasa 3: 63–124, klasa 4: 125–187, klasa 5: 188–250, klasa 6: ponad 250.

W tabeli 1 przedstawiono liczby wystąpień poszczególnych klas pożarowych w podregionach w całym dziesięcioleciu. W przypadku podregionów nie należą do rzadkości sytuacje, gdy w badanym przedziale czasowym nie odnotowano wystąpień pewnych klas. Specyficzna sytuacja wystąpiła w podregionie warszawskim wschodnim, gdzie mieliśmy do czynienia jedynie z klasą 6 (liczba pożarów w roku powyżej 250). Dla porównania klasa pożarowa 1 (liczba pożarów mniejsza niż 32) dominowała w podregionie nr 9 (miasto Łódź).

W tabeli 2 przedstawiono liczbę wystąpień każdej z klas pożarowych 1–6, w poszczególnych latach okresu 2007–2016 we wszystkich podregionach łącznie. Wynika z niej, że najczęściej przypadków, gdy roczna liczba pożarów w podregionie przekroczyła 250, odnotowano w roku 2015, (klasa 6 wystąpiła 7 razy), a następnie w latach 2009 i 2012 (klasa 6 wystąpiła pięciokrotnie).

Każdy podregion był reprezentowany przez punkt pomiarowy (synoptyczny lub klimatyczny). Ze względu na ograniczony dostęp do archiwalnych danych wilgotność względna odnotowana na stacji synoptycznej Łódź reprezentowała zarówno podregion łódzki, jak i podregion miasto Łódź.

Wilgotność względna powietrza analizowana była dla dostępnych pomiarów terminowych, z bazy historycznej IMGW-PIB (w przypadku stacji synoptycznych wykonuje się 8 pomiarów, na stacjach klimatycznych – 3 lub 4 pomiary, a na stacjach automatycznych 24 pomiary w ciągu doby).

3. Metodyka badań

W opracowaniach poświęconych klimatycznym uwarunkowaniom pożarów lasów wskazano znaczącą rolę średniej lub terminowej (np. 9:00 i 13:00) wilgotności względnej powietrza (Kwiatkowski, Szczygieł 2015). Natomiast w pre-

Tabela 1. Liczba wystąpień poszczególnych klas pożarowych w podregionach w okresie 2007–2016

Table 1. Number of events of particular fire classes in subregions in 2007–2016

Podregion / Subregion	Klasa 1 Class 1	Klasa 2 Class 2	Klasa 3 Class 3	Klasa 4 Class 4	Klasa 5 Class 5	Klasa 6 Class 6
1. ciechanowsko-płocki	0	1	4	4	0	1
2. ostrołęcko-siedlecki	0	0	0	2	1	7
3. skierniewicki	3	2	5	0	0	0
4. warszawski zachodni	0	0	0	3	3	4
5. m. Warszawa	1	3	5	1	0	0
6. warszawski wschodni	0	0	0	0	0	10
7. sieradzki	0	2	3	1	3	1
8. łódzki	1	1	4	4	0	0
9. m. Łódź	9	1	0	0	0	0
10. piotrkowski	0	0	3	2	1	4
11. radomski	0	0	0	1	0	9

Tabela 2. Liczba wystąpień poszczególnych klas pożarowych we wszystkich podregionach regionu centralnego w latach 2007–2016

Table 2. Number of events of individual fire classes in all subregions of the central region within 2007–2016

Rok	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5	Klasa 6
Year	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6
2007	1	1	4	1	1	3
2008	1	1	1	2	2	4
2009	1	0	2	2	1	5
2010	2	3	1	2	1	2
2011	1	0	3	2	1	4
2012	0	2	2	1	1	5
2013	4	1	2	2	0	2
2014	2	1	4	2	0	2
2015	1	0	1	2	0	7
2016	1	1	4	2	1	2

zentowanych badaniach zostały również uwzględnione minimalne i maksymalne wilgotności względne.

Powyższych danych nie poddano procesowi homogenizacji, aby nie usunąć przypadków ekstremalnych, które w procesach prognostycznych są bardzo ważne. Przeanalizowano jedynie ich kompletność.

W pracy wykorzystano autorskie programy oraz procedury pakietu statystycznego R (udostępniane na zasadzie Open Source). Przeprowadzono dwa zadania badawcze: A, w którym wykorzystywano głównie programy autorskie oraz B, gdzie wykorzystano procedury pakietu statystycznego R. Oba zadania różnią się również sposobem podawania informacji wejściowej o wilgotności względnej powietrza. W zadaniu A wykorzystano charakterystyki niedoboru wilgotności, natomiast w zadaniu B wilgotność względna jest głównie charakteryzowana poprzez wartości średnie i minimalne. Obie koncepcje różni też sposób traktowania informacji o liczbie pożarów lasów. W zadaniu A wykorzystano klasyfikację liczby pożarów stosowaną przez KSIPL, w zadaniu B jest to bezpośrednio liczba wystąpień pożarów lub klasa tej liczby określona za pomocą kwantyli. Również zastosowane metody badania siły związku pomiędzy informacją o liczbie pożarów i wilgotności są odmienne w obu zadaniach. W zadaniu A badano ryzyko względne, indeks Jaccarda i wskaźniki opisujące tablice kontyngencyjne oraz dokonano prób rekonstrukcji klasy liczby pożarów z wykorzystaniem analogów rozmytych. Badania przeprowadzone w zadaniu B opierają się głównie na analizie korelacyjnej i teście istotności związku.

W zadaniu A, ze względu na specyfikę pomiarów prowadzonych przez IMGW-PIB, dzień z niską wilgotnością zdefiniowano jako dzień, w którym w czasie pomiarów dokonanych o godzinie 06, 12, 18 GMT (*Greenwich Mean Time*) odnoto-

**Rycina 1. Podregiony regionu centralnego (według NUTS) i reprezentujące je punkty pomiarowe**

Figure 1. Subregions of the central region (according to NUTS) and location of measuring points

wano spadek wilgotności względnej powietrza poniżej 40%. Na potrzeby dalszych prac wyznaczono charakterystykę wilgotnościową określającą procentowy udział w analizowanym okresie (miesiąc, sezon IV–VIII, rok) dni suchych.

Zadanie A rozpoczęto od analizy kompletności danych pomiarowych.

Na potrzeby analizy przeklasyfikowano materiał tworząc dwie klasy: nowa klasa 0 – liczba pożarów mniejsza niż 125 (przypadki z klas 1–3) oraz nowa klasa 1 – liczba pożarów większa niż 124 (przypadki z klas 4–6 podstawowej klasyfikacji).

W zadaniu A podjęto próbę powiązania informacji o klasach liczby pożarów, które odnotowano w podregionach w poszczególnych latach, z charakterystykami wilgotnościowymi roku, sezonu IV–VIII oraz poszczególnych miesięcy.

Metodyka opisana w podpunktach AA, AB i AC dotyczyła 9 wariantów, w których analizę związków między niedoborem wilgotności na stacjach reprezentujących podregiony i liczbą pożarów w poszczególnych podregionach regionu centralnego przeprowadzono dla następująco zdefiniowanych warunków wilgotnościowych:

1. W ciągu roku wystąpił co najmniej jeden miesiąc z udziałem dni suchych wynoszącym powyżej 10% (RH_MC_10).
2. W ciągu roku wystąpił co najmniej jeden miesiąc z udziałem dni suchych wynoszącym powyżej 20% (RH_MC_20).
3. W ciągu roku wystąpił co najmniej jeden miesiąc z udziałem dni suchych wynoszącym powyżej 40% (RH_MC_40).
4. W miesiącach IV–VIII udział dni suchych przekroczył 10% (RH_IV_VIII_10).
5. W miesiącach IV–VIII udział dni suchych przekroczył 15% (RH_IV_VIII_15).
6. W miesiącach IV–VIII udział dni suchych przekroczył 20% (RH_IV_VIII_20).
7. W roku udział dni suchych przekroczył 10% (RH_ROK_10).
8. W roku udział dni suchych przekroczył 15% (RH_ROK_15).
9. W roku udział dni suchych przekroczył 20% (RH_ROK_20).

Zastosowano następujące miary oszacowujące siłę związku:

AA. Ryzyko względne mówiące, czy w sytuacji, gdy wystąpiły interesujące nas warunki meteorologiczne, zwiększyło się prawdopodobieństwo przekroczenia 3 klasy pożarowej, w stosunku do sytuacji gdy założona sytuacja meteorologiczna nie miała miejsca.

$$RR = \frac{Ra}{Rb}, \quad Ra = \frac{m11}{m}, \quad Rb = \frac{b}{n} \quad (1)$$

gdzie:

$m11$ – liczba przypadków, gdy miała miejsce susza zdefiniowana przez wilgotność względną, a liczba pożarów mieściła się w zakresie nowa_klasa 1,

m – liczba przypadków, gdy miała miejsce susza zdefiniowana przez wilgotność względną,

b – liczba przypadków, gdy wilgotność względną nie wskazywała na suszę, a liczba pożarów należała do nowa_klasa 1,

n – liczba przypadków, gdy wilgotność względną nie wskazywała na suszę.

AB. Indeks Jaccarda (Real, Vargas 1996), będący miarą podobieństwa porównywanych zbiorów (A – opisującego sytuację meteorologiczną i B – odpowiadającego za sytuację pożarową). Indeks ten jest ilorazem mocy części wspólnej zbiorów A i B przez moc sumy tych zbiorów.

$$J(A, B) = \frac{LA \cap BI}{LA \cup BI} \quad (2)$$

$$J(A, B) = \frac{m11}{m11 + m10 + m01} \quad (3)$$

gdzie:

$m11$ – liczba przypadków, gdy miała miejsce susza zdefiniowana przez wilgotność względną, a liczba pożarów została zaklasyfikowana do nowa_klasa 1,

$m10$ – liczba przypadków, gdy miała miejsce susza zdefiniowana przez wilgotność względną, a liczba pożarów należała do nowa_klasa 0,

$m01$ – liczba przypadków, gdy wilgotność względną nie wskazywała na suszę, a liczba pożarów należała do nowa_klasa 1.

Na potrzeby tej pracy siłę związku wyrażono w procentach:

$$\text{Jacc}(A, B) = 100\% * J(A, B) \quad (4)$$

AC. Do oceny siły związku między wystąpieniem zdefiniowanego wcześniej jednego z 9 wariantów niedoboru wilgotności, a wystąpieniem dużej liczby pożarów zastosowano indeksy tablic wieloznacznych (TAB). Przyjęto, że wystąpienie niedoboru wilgotności względnej powietrza jest równoznaczne z prognozowaniem liczby pożarów większej od 124. Wprowadzono następujące oznaczenia:

TAB [1,1] – ile razy prognozowano liczbę pożarów powyżej 124 i obserwowano liczbę pożarów powyżej 124,

TAB [1,2] – ile razy prognozowano liczbę pożarów powyżej 124 i obserwowano liczbę pożarów poniżej 125,

TAB [2,1] – ile razy prognozowano liczbę pożarów poniżej 125 i obserwowano liczbę pożarów powyżej 124,

TAB [2,2] – ile razy prognozowano liczbę pożarów poniżej 125 i obserwowano liczbę pożarów poniżej 125.

Zastosowane indeksy to *Hit Rate* (HR), *False Alarm Rate* (FAR), *Hanssen and Kuipers score* (KS i KS2), rekomendowane przez World Meteorological Organization (2002).

Hit Rate (HR) to miara sukcesu, czyli trafnego przepowiedzenia, że klasa pożarowa będzie większa od 3. HR przyjmuje wartości od 0 do 1. Wraz ze wzrostem wartości tego indeksu rośnie poprawność działania modelu.

False Alarm Rate (FAR) podaje jak często wystąpiło ostrzeżenie przed dużą liczbą pożarów, a obserwowana klasa nie była większa od 3. FAR przyjmuje wartości od 0 do 1 i dolna wartość jest osiągana przy braku fałszywych alarmów. $KS = HR - FAR$ i przyjmuje wartości między -1 i 1. Wartość 1 oznacza prognozę poprawną.

Indeks KS2 skalowany według wzoru:

$$KS2 = \frac{KS + 1}{2} \quad (5)$$

waha się od w zakresie 0 do 1; dla wartości 0,5 trudno określić trafność prognozy ponieważ $FAR = HR$, a dla wartości 1 prognoza jest perfekcyjna.

AD. Podjęto próbę rekonstrukcji klasy pożarowej w oparciu o charakterystykę wilgotności względnej z wykorzystaniem analogów rozmytych (Matteucci 2017). Zastosowano odległość euklidesową między wektorami X_i i C_k , zapisywaną jako $\text{dist}(X_i, C_k)$. Wektory te odpowiadają dwóm porównywanym latom. Analizowano trzy warianty informacji wejściowej:

- udział dni suchych w poszczególnych miesiącach,
- udział dni suchych w roku,
- udział dni suchych w sezonie IV–VIII.

W pierwszym przypadku wektory X_i i C_k mają po dwanaście składowych, w pozostałych przypadkach po jednej składowej.

Na podstawie tych odległości, dla i -tego roku wyznaczono miary jego podobieństwa U_{ij} pod względem wilgotności, do pozostałych 9 analogów, $i = 1, 2, 3, \dots, 10, j = 1, 2, \dots, 10, i \neq j$.

$$U_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{10} \frac{\text{dist}(X_i, C_j) * \text{dist}(X_i, C_j)}{\text{dist}(X_i, C_k) * \text{dist}(X_i, C_k)}} \quad (6)$$

Każdy z analogów niesie ze sobą również informację o odnotowanej w danym roku klasie pożarowej. Na bazie miar podobieństwa U_{ij} warunków wilgotnościowych można wyznaczyć prawdopodobieństwo wystąpienia każdej z klas pożarowych. Poniżej umieszczono przykład ilustrujący jak od miar U_{ij} można przejść do prawdopodobieństwa wystąpienia interesującej nas klasy pożarowej.

Dla podregionu „miasto Warszawa” odnotowano w kolejnych latach następujące klasy pożarowe:

rok 1 (2007) – klasa 3, rok 2 (2008) – klasa 2, rok 3 (2009) – klasa 3, rok 4 (2010) – klasa 2, rok 5 (2011) – klasa 3, rok 6 (2012) – klasa 2, rok 7 (2013) – klasa 1, rok 8 (2014) – klasa 3, rok 9 (2015) – klasa 4, rok 10 (2017) – klasa do wyznaczenia na podstawie danych z poprzednich 9 lat.

Klasę 1 odnotowano tylko w roku 7 (2013), dlatego prawdopodobieństwo wystąpienia tej klasy $P(k11)$ w roku 2016 wynosi:

$$P(k11) = \frac{U_{10,7}}{U_{10,1} + U_{10,2} + U_{10,3} + U_{10,4} + U_{10,5} + U_{10,6} + U_{10,7} + U_{10,8} + U_{10,9}} \quad (7)$$

Następnie przeanalizowano zgodność prognozowanej najbardziej prawdopodobnej klasy pożarowej z zaobserwowaną. Zgodność tę określono poprzez procentowy udział prognoz zaniżonych, trafionych i zawyżonych. Opisane powyżej narzędzie badawcze zastosowano zarówno w przypadku podstawowych 6 klas pożarowych, jak i dla podziału na dwie nowe klasy.

W zadaniu B analizie została poddana liczba wystąpień pożarów lasu w roku oraz zdefiniowana przez kwantyle klasa liczby pożarów. Badania miały na celu potwierdzenie istnienia związku pomiędzy liczbą pożarów występujących w danym podregionie regionu centralnego a charakterystykami wilgotności względnej na stacji przyjętej za reprezentatywną. Ze względu na brak obserwacji wilgotności na stacji Puczniew, przy analizie dla regionu łódzkiego wzięte zostały pod uwagę obserwacje dla „miasta Łódź”.

Uwzględniono trzy charakterystyki wilgotności: średnią miesięczną wartość wilgotności względnej (RH_{SR_MC}), minimalną miesięczną wartość (RH_{MIN_MC}) i udział procentowy w roku dni z RH poniżej 40% ($\%RH_{40}$), który został oparty na wartościach wilgotności względnej z trzech terminów (patrz zadanie A). Ponieważ dysponowano jedynie informacją o pożarach w poszczególnych latach, w celu przeprowadzenia analizy korelacyjnej dla miesięcznych wartości średnich i minimalnych wilgotności RH posłużono się charakterystykami rocznymi lub obliczonymi dla wybranych podokresów roku. Dla RH_{MIN_MC} zostały wybrane trzy podokresy: lato – miesiące od czerwca do sierpnia, lato poszerzone o sąsiednie miesiące wiosenne (kwiecień i maj) oraz półrocze ciepłe (kwiecień – wrzesień). Analizie zostały poddane wymienione niżej charakterystyki RH otrzymane z roczną rozdzielczością czasową:

$SR^{RH}_{SR_MC}$	średnia roczna ze średniej miesięcznej wilgotności względnej / the annual average of monthly mean relative humidity;
MIN^{RH}	minimalna roczna wilgotność względna / the annual minimum of relative humidity;
$SR^{4-9}RH_{MIN_MC}$	średnia w półroczu ciepłym (miesiące od kwietnia do września) z minimalnej miesięcznej wilgotności względnej / the warm half-year (months from April to September) average of monthly minimum relative humidity;
$SR^{4-8}RH_{MIN_MC}$	średnia dla okresu kwiecień – sierpień z minimalnej miesięcznej wilgotności względnej / the average of the period April – August of monthly minimum relative humidity;
$SR^{6-8}RH_{MIN_MC}$	średnia w sezonie letnim (miesiące od czerwca do sierpnia) z minimalnej miesięcznej wilgotności względnej / the average in the summer season (months from June to August) of monthly minimum relative humidity;
$\%RH_{40}$	procentowy udział w roku dni z niską wilgotnością (poniżej 40%) / the annual percentage of days with low relative humidity (below 40%).

W analizie wykorzystano wartości współczynnika korelacji powyższych charakterystyk wilgotności względnej i liczby pożarów. Ponadto zastosowano metody analizy współzależności w tablicach kontyngencyjnych i test Manna-Whitneya (Bauer 1972; Hollander, Wolfe 1973) do badania istotności związku pomiędzy liczbą pożarów a udziałem procentowym dni w roku z niską wilgotnością względną powietrza. Do przeprowadzenia testów Manna-Whitneya wykorzystano próbę złożoną z wartości liczby pożarów dla wszystkich podregionów, przyjmując jej stratyfikację za pomocą zmiennej kategorycznej dla klas procentowego udziału dni z wilgotnością poniżej 40%.

Obliczenia zostały wykonane w środowisku programistycznym R przeznaczonym do obliczeń statystycznych i graficznego przedstawiania danych i wyników, przy wykorzystaniu procedur pakietów stats i vcd (R Core Team 2017).

W celu wykorzystania metod analizy współzależności w tablicach kontyngencyjnych zmienne liczbowe (zarówno charakterystyki wilgotności, jak i dane o liczbie pożarów) zostały przekształcone do zmiennych kategorycznych przy wykorzystaniu kwantyli z próby:

Q25 – kwantyl 25%, Q50 – mediana, Q75 – kwantyl 75%.

Otrzymane zmienne kategoryczne przyjmują wartości:

- 1 – dla $RH \leq Q25$,
- 2 – dla $Q25 < RH$ i $RH \leq Q50$,
- 3 – dla $Q50 < RH$ i $RH \leq Q75$,
- 4 – dla $RH >$ wartości powyżej $Q75$.

Dla pięciu charakterystyk wilgotności posłużono się wartościami standaryzowanymi zmiennych i kwantylami rozkładu normalnego $Q25 = -0,76$, $Q50 = 0,0$, $Q75 = 0,67$. Liczba pożarów została podzielona na cztery klasy za pomocą kwantyli z próby $Q25 = 72$, $Q50 = 146$ i $Q75 = 299$. Podziału na cztery klasy udziału procentowego dni z niską wilgotnością dokonano za pomocą kwantyli $Q^{U25} = 7,7\%$, $Q^{U50} = 10,8\%$, $Q^{U75} = 13,05\%$.

4. Wyniki badań

Kompletność danych

Informacja o pożarach i wilgotności w latach 2007–2016 jest kompletna. Niestety zabrakło reprezentatywnego punktu pomiarowego dla podregionu łódzkiego, a w konsekwencji tego stacja Łódź reprezentuje dwa podregiony – łódzki i miasto Łódź.

Zadanie A

Dla podregionu ostrołęcko-siedleckiego raz posłużono się wilgotnością ze stacji klimatycznej w Pułtusku, a drugi raz ze stacji synoptycznej w Siedlcach. Końcowe wyniki nie wykazały różnic wynikających z wyboru punktu pomiarowego. Oznacza to, że w przypadku zastosowanego w pracy aparatu badawczego, obydwie punkty pomiarowe są tak samo reprezentatywne dla tego podregionu.

Ciekawym zjawiskiem jest przyjmowanie tych samych wartości przez indeksy dla roku z progim 10% i dla okresu

IV–VIII z progiem 20% (ryc. 2–5). Przeprowadzone dodatkowe testy potwierdziły, że podwojenie wartości progu dla okresu IV–VIII w stosunku do progu dla całego roku zwiększa zgodność wyznaczonych indeksów.

AA. Ryzyko względne

Wartość „-1” na rycinie 2 oznacza brak możliwości określenia wartości indeksu ze względu na zbyt krótki okres, z którego analizowano dane. W pozostałych przypadkach ryzyko względne jest większe od 1, co oznacza, że niedobór wilgotności sprzyja dużej liczbie pożarów lasu.

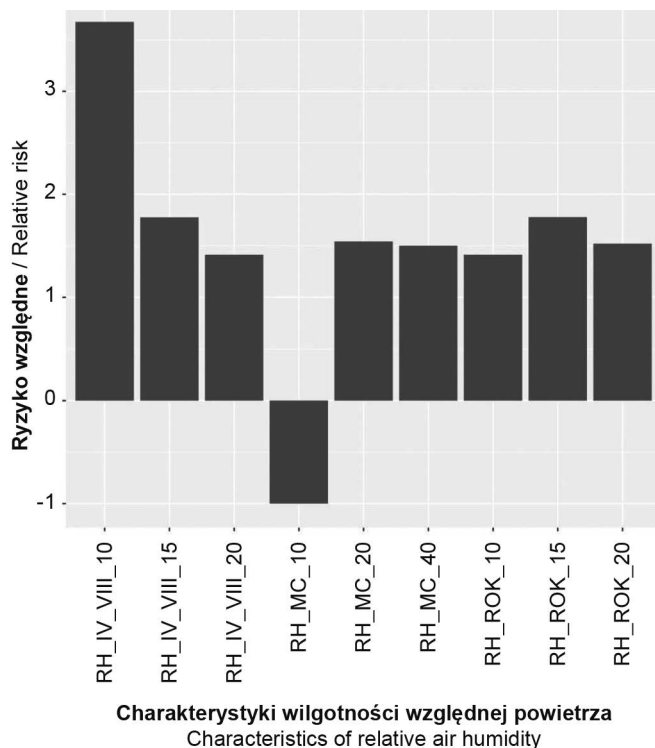
Największe ryzyko względne wystąpienia pożarów lasu przy niskiej wilgotności względnej powietrza odnotowano dla okresu IV–VIII z progiem 10%.

AB. Indeks Jaccarda

Kilkakrotnie zaobserwowano przekroczenie przez indeks Jaccarda progu 50% (ryc. 3) co oznacza, że tak zdefiniowany niedosyt wilgotności jest ważnym czynnikiem nie tylko towarzyszącym, ale i kształtującym liczbę pożarów w lasach. Również w tym przypadku indeks wskazał najsilniejszy związek między wilgotnością i liczbą pożarów dla okresu IV–III z progiem 10%.

AC. Tablice wielodzielcze

Otrzymane wyniki wskazały, że najlepszym podejściem jest wykorzystanie danych dotyczących wilgotności względ-



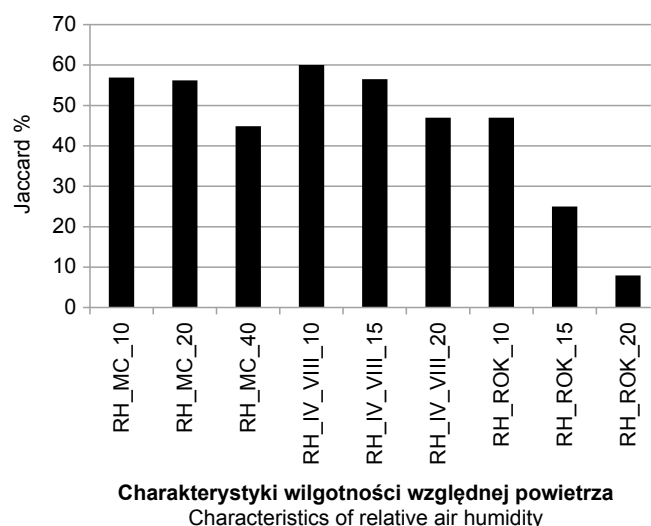
Rycina 2. Ryzyko względne dla analizowanych eksperymentów
Figure 2. The relative risk for the analyzed experiments

nej z okresu IV–VIII (ryc. 2, 3). Specyficzne wartości w przypadku zastosowania danych miesięcznych i przyjęcia progu 10% związane były z długością serii danych (10 lat), w której pewne kombinacje zmiennych w podregionach nie wystąpiły (np. wysoka wilgotność i duża liczba pożarów).

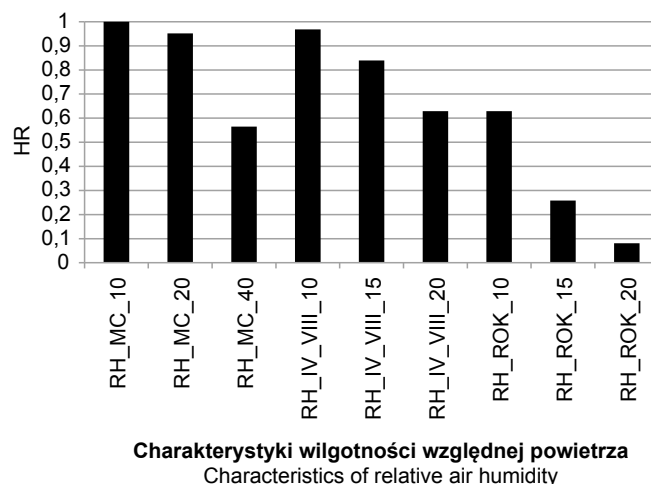
W przypadku progu 10% dla dni z niską wilgotnością w miesiącu lub ciepłym okresie IV–VIII, wskaźnik HR jest bliski 1 (ryc. 4), co oznacza, że niedosyt wilgotności dobrze wskazuje na wystąpienie co najmniej 125 pożarów w danym podregionie.

We wszystkich 9 wariantach „fałszywy alarm” (FAR) przyjmował wartość 1. Potwierdziło to skłonność modelu rekonstrukcyjnego do zawyżania liczby pożarów.

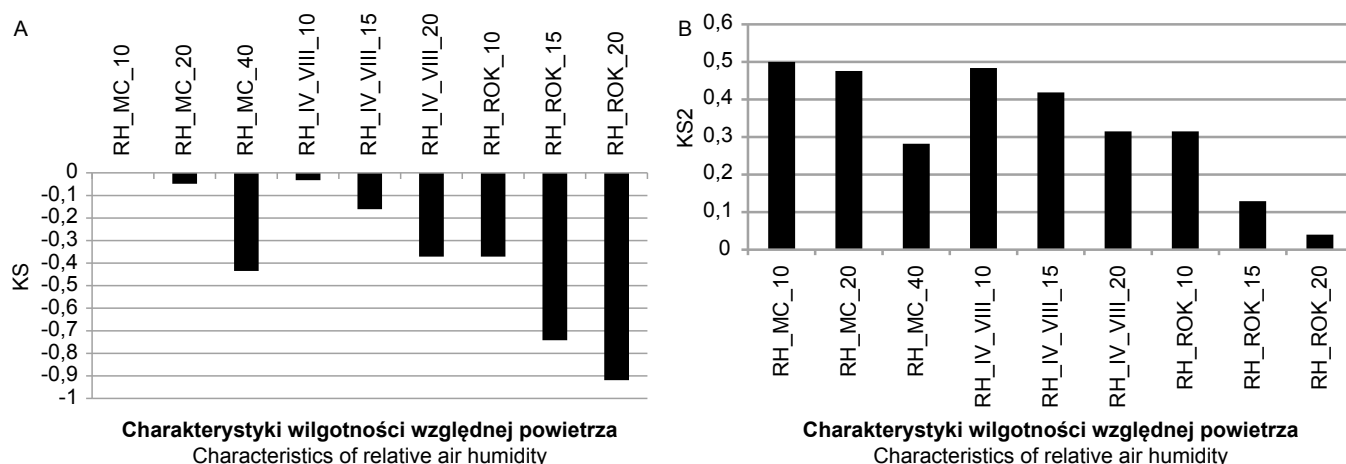
Indeks KS nie przyjmował wartości dodatnich, a skalowany KS2 był nie większy niż 0,5 (ryc. 5), co świadczy o tym, że informacja o niskiej wilgotności jest przydatna w badaniach



Rycina 3. Indeks Jaccarda dla omawianych eksperymentów
Figure 3. The Jaccard's index for the experiments discussed



Rycina 4. Wartości indeksu HR (miara sukcesu) dla wybranych charakterystyk wilgotnościowych i klasy pożarowej nowa_klasa 1
Figure 4. The hit rate (HR) values for selected humidity characteristics and a fire class the new_class 1



Rycina 5. Indeks KS (A) i skalowany indeks KS2 (B)
Figure 5. The KS index (A) and the scaled KS2 index (B)

nad liczbą pożarów lasów, ale nie jest ona wystarczająca do prawidłowego przewidywania zagrożenia.

AD. Rekonstrukcja klas pożarowych metodą rozmytych analogów

Na rycinach 6–8 przedstawiono procentowy rozkład w podregionach liczby niedoszacowanych, trafionych i przeszacowanych rekonstrukcji przy podejściu sześcioklasowym i dwuklasowym.

Zadanie B

Wartości uzyskanego współczynnika korelacji dla średniej miesięcznej i minimalnej miesięcznej wilgotności względnej RH oraz udziału procentowego w roku dni z niską wilgotnością ($\%RH_{40}$) zawarto w tabeli 3. Współczynnik korelacji osiągnął najwyższe, dodatnie wartości dla $\%RH_{40}$, dla pozostałych parametrów był ujemny, a najwyższe wartości bezwzględne osiągnął w przypadku średniej rocznej ze średnich miesięcznych ${}^{SR}RH_{SR_MC}$ (tylko dla trzech stacji wartość bezwzględna współczynnika korelacji była poniżej 0,5) i średniej dla półrocza ciepłego z minimalnej miesięcznej ${}^{SR4-9}RH_{MIN_MC}$ (tylko dla Sulejowa wartość bezwzględna współczynnika korelacji była poniżej 0,5). W przypadku tej ostatniej charakterystyki dla pięciu podregionów wartość bezwzględna współczynnika korelacji przekroczyła 0,7. Poza dwoma przypadkami (dla Sulejowa i Kozienc oraz charakterystyki ${}^{SR6-8}RH_{MIN_MC}$, gdzie przyjmuje wartości bardzo bliskie zera) współczynnik korelacji przyjmował wartości ujemne, sugerując oczekiwaną odwrotną zależność liniową pomiędzy liczbą pożarów a daną charakterystyką wilgotności. Wyłączenie danych z września z obliczania średniej minimalnej miesięcznej wilgotności względnej spowodowało obniżenie współczynnika korelacji. Przy ograniczeniu się tylko do miesięcy letnich (czerwiec, lipiec i sierpień) efekt ten był jeszcze bardziej widoczny. To obniżenie wartości bezwzględnej współczynnika kore-

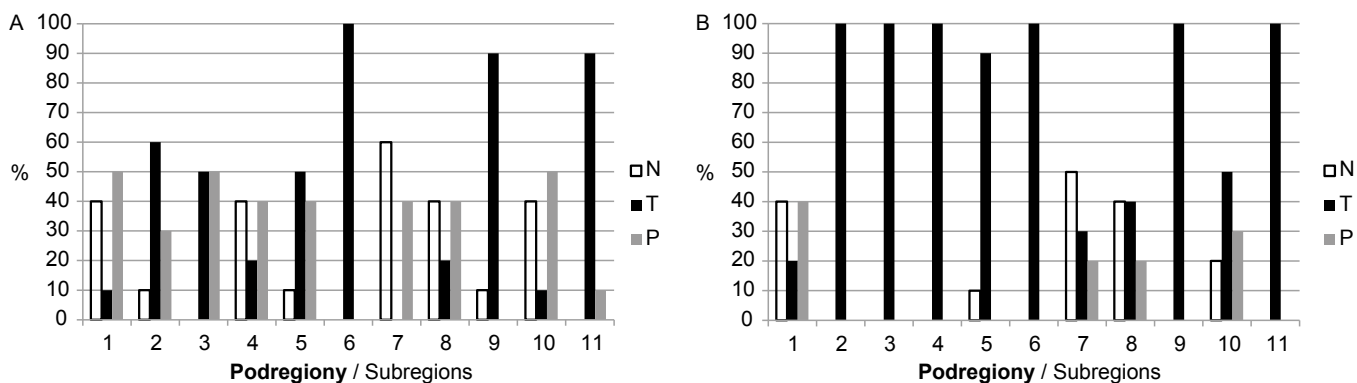
lacji sugeruje istotną rolę sąsiednich dla lata miesięcy wiosennych i jesiennych, uwzględnianych w półroczu ciepłym.

Najsilniejsze związki korelacyjne wystąpiły dla zmiennej opisującej procentowy udział dni w roku z wilgotnością poniżej 40% (tab. 3), bowiem w przypadku trzech podregionów: Siedlce, Warszawa-Okęcie i Legionowo współczynnik korelacji wyniósł ponad 0,9, a poziom istotności tego współczynnika wyniósł mniej niż 0,001. Dla sześciu podregionów wahał się od 0,7 do 0,95 i był istotny statystycznie na poziomie $p=0,01$, dla podregionu miasto Warszawa wyniósł 0,69 i był istotny statystycznie na poziomie $p=0,05$.

Analizie zostały poddane wszystkie podregiony łącznie (wtedy wielkość próby wynosi $N=110$). Współczynnik korelacji liczby pożarów w roku i udziału procentowego dni w roku z niską wilgotnością dla całej próby wyniósł 0,45, wskazując na występowanie korelacji umiarkowanej, inaczej mówiąc, istotnej zależności liniowej pomiędzy zmiennymi.

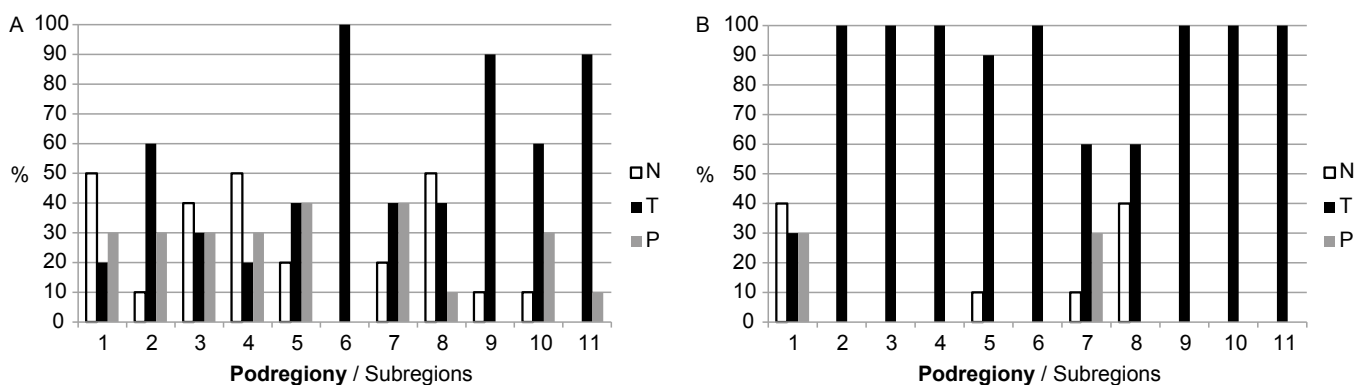
Poziom istotności powyższego współczynnika korelacji jest mniejszy od 0,01. Obliczenia przeprowadzono również dla opisanych w metodyce zadania B zmiennych kategoriycznych (klasy określone na podstawie kwantyli). Dla tak przetworzonych zmiennych związek korelacyjny został potwierdzony jedynie w przypadku charakterystyki ${}^{SR4-9}RH_{MIN_MC}$. Dla tej charakterystyki istotność statystyczną poniżej 0,05 otrzymano dla pięciu podregionów: Siedlce, Skierniewice, Warszawa-Okęcie, Sulejów, Koziencice.

Otrzymane wyniki wskazały, że w przypadku połączonych par klasy 1 (liczba pożarów mniejsza od 72) z klasą 3 (liczba pożarów od 146 do 299) oraz klasy 1 z klasą 4 (liczba pożarów większa od 299) zachodzą istotne statystycznie zmiany w rozkładach udziału procentowego dni z niską wilgotnością. Wyniki testu Manna-Whitneya wykazały istotną statystycznie różnicę jedynie pomiędzy rozkładami liczby pożarów w pierwszej grupie ($\%RH_{40} \leq Q^{U25}$) a każdą z pozostałych grup. Dla grupy $Q^{U25} < \%RH_{40} \leq Q^{U50}$ istotność wynosi $p=0,025$; dla grupy $Q^{U50} < \%RH_{40} \leq Q^{U75}$ $p=0,039$, a dla ostatniej grupy $\%RH_{40} > Q^{U75}$ $p=0,006$. Dla pozostałych zestawień grup podziału próby wartość p waha się od 0,3 do



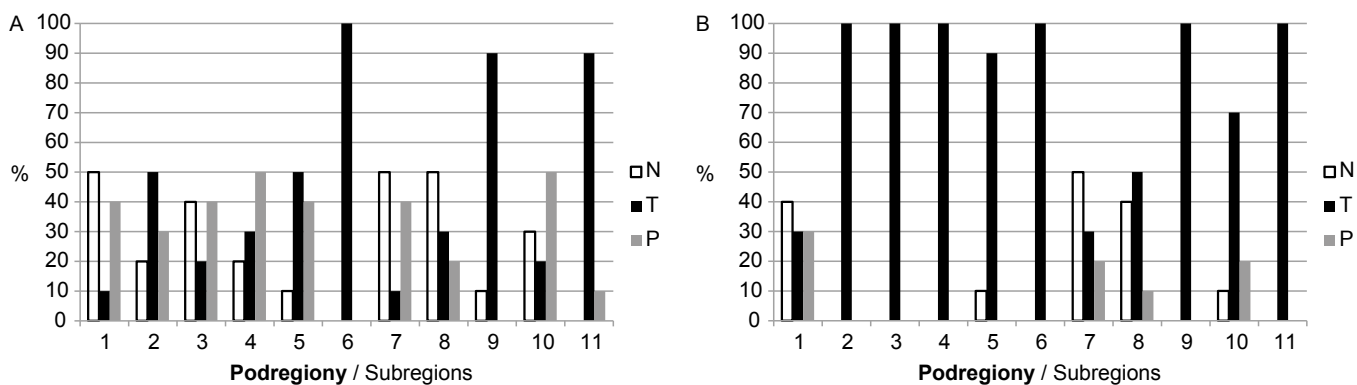
Rycina 6. Procentowy udział niedoszacowań (N), trafionych rekonstrukcji (T) i przeszacowań (P) klas pożarowych wyznaczonych na podstawie informacji o miesięcznych niedoborach wilgotności względnej. A dla 6 klas, B dla przypadków: klasa >3 / klasa <4. Numeracja podregionów jak w tabeli 1.

Figure 6. Percentage of underestimations (N), accurate reconstructions (T) and overestimations (P) of fire classes determined on the basis of information on monthly relative humidity deficiencies. A for 6 classes, B for cases: class > 3 / class < 4. Numbers of subregions as in table 1.



Rycina 7. Procentowy udział niedoszacowań (N), trafionych rekonstrukcji (T) i przeszacowań (P) klas pożarowych wyznaczonych na podstawie informacji o rocznych niedoborach wilgotności względnej. A dla 6 klas, B dla przypadków: klasa >3 / klasa <4. Numeracja podregionów jak w tabeli 1.

Figure 7. Percentage of underestimations (N), accurate reconstructions (T) and overestimations (P) of fire classes determined on the basis of information on annual relative humidity deficiencies. A for 6 classes, B for cases: class > 3 / class < 4. Numbers of subregions as in table 1.



Rycina 8. Procentowy udział niedoszacowań (N), trafionych rekonstrukcji (T) i przeszacowań (P) klas pożarowych wyznaczonych na podstawie informacji o niedoborach wilgotności względnej w miesiącach IV–VIII. A dla 6 klas, B dla przypadku klasa >3 / klasa <4. Numeracja podregionów jak w tabeli 1.

Figure 8. Percentage of underestimations (N), accurate reconstructions (T) and overestimations (P) of fire classes determined on the basis of information on relative humidity deficiencies in the months of IV–VIII. Fig. 8A for 6 classes, Fig. 8B for the case, class > 3 / class < 4. Numbers of subregions as in table 1.

Tabela 3. Wartości współczynnika korelacji pomiędzy rocznymi charakterystykami wilgotności względnej a liczbą pożarów w podregionie, lata 2007–2016. Poziom istotności wartości współczynnika korelacji oznaczono: * dla $p < 0,05$, ** dla $p < 0,01$ i * dla $p < 0,001$.**Table 3. Values of the correlation coefficient between the annual relative humidity characteristics and the number of fires in the subregion, 2007–2016. Significance level for correlation coefficient: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

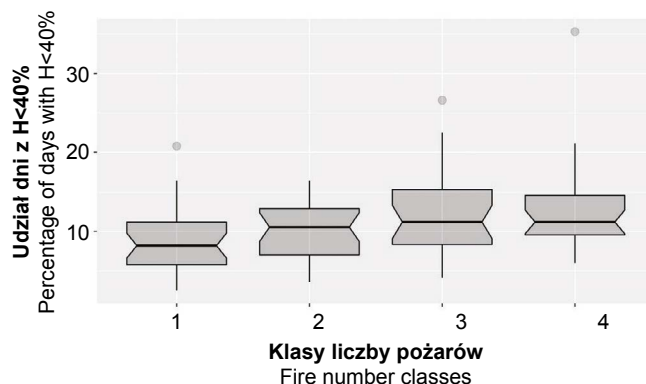
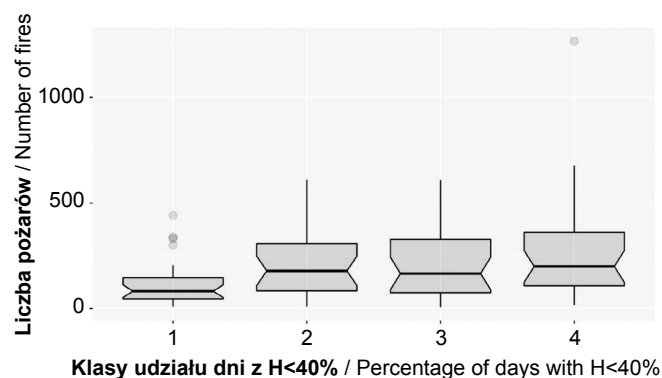
Stacja / Station	SRRH _{SR_MC}	MINRH	SR4-9RH _{MIN_MC}	SR4-8RH _{MIN_MC}	SR6-8RH _{MIN_MC}	%RH ₄₀
Płock	-0,66*	-0,40	-0,67*	-0,61	-0,49	0,76*
Siedlce	-0,60	-0,58	-0,71*	-0,67*	-0,48	0,90***
Skieriewice	-0,72*	-0,46	-0,70*	-0,57	-0,29	0,70*
Warszawa-Okęcie	-0,80**	-0,57	-0,78**	-0,67*	-0,62	0,93***
Warszawa-Bielany	-0,63*	-0,47	-0,53	-0,49	-0,38	0,69*
Legionowo	-0,93**	-0,31	-0,80**	-0,72*	-0,64*	0,95***
Wieluń	-0,65*	-0,75*	-0,77**	-0,73*	-0,31	0,75*
Puczniew	-0,20	-0,38	-0,50	-0,42	-0,26	0,48
Łódź	-0,41	-0,67*	-0,65*	-0,59	-0,32	0,40
Sulejów	-0,58	0,23	-0,40	-0,24	0,04	0,33
Kozienice	-0,28	-0,54	-0,68*	-0,25	0,09	0,55

0,8. Ilustracją opisaną wyżej zależności są rozkłady jednej zmiennej w klasach podziału według drugiej zmiennej (ryc. 9, 10).

Przeprowadzone w tym przypadku testy wykazały istotną statystycznie różnicę pomiędzy rozkładem liczby pożarów w klasie pierwszej (udział procentowy dni z niską wilgotnością poniżej 7,7%) a rozkładem w każdej z pozostałych trzech klas udziału procentowego dni z niską wilgotnością. Przeprowadzone obliczenia sugerują występowanie związku statystycznego pomiędzy udziałem procentowym dni z niską wilgotnością a liczbą pożarów w ciągu roku.

5. Podsumowanie

Czynniki meteorologiczne mają duży wpływ na występowanie i rozprzestrzenianie się pożarów w lasach. Wiler i Wcisło (2013) wymieniają m.in. wiatr, który może przemieścić pożar z terenów poza lasem, opady, zachmurzenie, ciśnienie, wymianę ciepła w atmosferze. Szczygieł i in. (2009) podkreślają znaczenie temperatury, wilgotności względnej powietrza, prędkości wiatru oraz opadów. W przypadku krótko- i średnioterminowych prognoz pogody (np. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) istnieją modele, które w oparciu o powyższe czynniki potrafią określić zagrożenie pożarami lasów na danym obszarze z wyprzedzeniem kilkudziesięciu godzin. Z punktu widzenia zarządzania sytuacjami kryzysowymi przydatne wydają się prognozy na najbliższy miesiąc, a nawet sezon. Badacze klimatu interesuje zarówno wpływ zmian klimatu na występowanie pożarów lasu, jak i sposób w jaki pożary lasu oddziałują na klimat. Opracowanie takiego długoterminowego modelu prognostycznego wymaga zbudowania odpowiednie-

**Rycina 9. Rozkład udziału procentowego liczby dni z niską wilgotnością %RH₄₀ w klasach liczby pożarów**Figure 9. Distribution of the percentage of the number of days with low humidity %RH₄₀ in the classes of the number of fires**Rycina 10. Zależność liczby pożarów od klasy wartości udziału procentowego dni z niską wilgotnością %RH₄₀**Figure 10. The dependence of the number of fires on classes by percentage of days with low humidity %RH₄₀

go algorytmu prognozującego oraz wyboru predyktorów, czyli sposobu podania informacji wejściowej o stanie atmosfery. Zaawansowanie prac nad miesięcznymi, kwartalnymi i sezonowymi prognozami pogody dotyczącymi temperatury, sumy opadów i liczby dni z opadem napawa optymizmem. Mamy nadzieję, że zastosowany model sprawdzi się również jeśli chodzi o długoterminowe prognozy wilgotności powietrza. Przedstawione w pracy badania nad wilgotnością względną potwierdzają, że zaproponowane charakterystyki niosą dużo informacji o zagrożeniu pożarami lasu.

Odniesienie w zadaniu A (ryc. 3) przypadków, gdy indeks Jaccarda przekracza 50% oznacza, że niska wilgotność względna powietrza nie tylko towarzyszy wystąpieniom pożarów lasu, ale jest z nimi nierozdzielnie związana. Otrzymane wartości wskaźnika KS (brak wartości dodatnich) i skalowanego wskaźnika KS2 (nieprzekraczające progu 0,5) (odpowiednio ryc. 5A, B) oznaczają, że lista predyktorów wymaga poszerzenia. W związku z tym w dalszych pracach należałoby dołączyć charakterystyki temperaturowo-opadowe. Interesujące byłoby sprawdzenie w roli predyktora nie tylko temperatury powietrza na wysokości 2 m, ale i przy gruncie (ze względu na wpływ stanu ściółki na pojawianie się i rozprzestrzenianie pożarów w lasach). Długoterminowe prognozowanie zachmurzenia i wiatru wydaje się w chwili obecnej obciążone zbyt dużym błędem, jednak nie jest wykluczone, że w dalszych pracach badawczych zostanie podjęta również ta tematyka.

Rekonstrukcja klasy pożarowej przy pomocy analogów rozmytych wydaje się dobrym kierunkiem prac nad modelem długoterminowej prognozy. Wyraźnie widać, że przy zastosowaniu dwóch klas pożarowych trafność rekonstrukcji jest znacznie wyższa niż z użyciem sześciu klas. Należy pamiętać, że znaczący wpływ na otrzymane wyniki miała ograniczona długość serii danych (tylko 10 lat). Idzie za tym brak odnotowanych wielu sytuacji (np. wystąpienia w podregionie warszawskim wschodnim innej klasy pożarowej niż klasa 6) i nie zawiera wszystkich możliwych sytuacji pożarowych i pogodowych. Model może więc nie być wystarczający do prawidłowego wnioskowania przy większym zróżnicowaniu „na wyjściu”. Natomiast dobór najlepszego przedziału czasowego dla predyktora (miesiąc, rok, okres IV–VIII), jest uzależniony od wyboru podregionu (ryc. 6–8).

Na podstawie wyników uzyskanych w zadaniu B można stwierdzić, iż spośród rozważanych tam charakterystyk wilgotności istotne znaczenie przy konstrukcji modelu prognostycznego mogą mieć średnia roczna i średnia w półroczu ciepłym z miesięcznej minimalnej wilgotności powietrza oraz udział procentowy w roku dni z niską wilgotnością.

Jak już wspomniano wcześniej, praca ma charakter pilotażowy, a uzyskane wyniki pozwalają przygotować aparat badawczy do dalszych analiz. Z otrzymanych rezultatów wynika, że powiązanie niedoborów wilgotności względnej powietrza z liczbą pożarów i uwzględnienie tych zależności w dalszych pracach nad doskonaleniem długoterminowych

prognoz pogody ma ogromne znaczenie. Współpraca specjalistów z zakresu prognoz pogody oraz badaczy zmian klimatu z osobami zajmującymi się zagrożeniem pożarowym w Polsce może przynieść wiele korzyści. Efekty współpracy pozwolą udoskonalić metody zapobiegania skutkom wystąpienia zjawisk zagrażających życiu ludzi i środowisku.

Dalsze prace nad tym zagadnieniem powinny dotyczyć:

- pozyskania informacji o liczbie pożarów przed rokiem 2007,
- rozszerzenia listy meteorologicznych punktów pomiarowych o stacje leśne,
- przejścia z informacją o pożarach do skali sezonowej lub miesięcznej,
- poszerzenia listy potencjalnych predyktorów o charakterystyki temperaturowo-opadowe,
- adaptację i weryfikację różnych modeli prognoz miesięcznych, trzymiesięcznych i sezonowych do potrzeb ochrony przeciwpożarowej.

Konflikt interesów

Autorki deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Źródło finansowania

Pracę zrealizowano ze środków własnych IMGW-PIB.

Literatura

- Bauer D.F. 1972. Constructing confidence sets using rank statistics. *Journal of the American Statistical Association* 67: 687–690. DOI 10.2307/2284469.
- DGLP 2012. Instrukcja ochrony przeciwpożarowej lasów. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 108 s. ISBN 978-83-61633-59-4.
- Forest Fire in Europe 2009. Report no 10. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 88 s. DOI 10.2788/74089.
- Hollander M.I., Wolfe D.A. 1973. *Nonparametric Statistical Methods*. John Wiley & Sons, New York, 848 s. ISBN 978-0-470-38737-5.
- Klasyfikacja NUTS. 2017. <http://stat.gov.pl/statystyka-regionalna/jednostki-terytorialne/klasyfikacja-nuts/> [5.01.2017].
- KSIPL 2017. Krajowy System Informacji o Pożarach Lasów. http://bazapozarow.ibles.pl/ibl_ppoz/faces/index.jsp [15.01.2017].
- Kwiatkowski M., Szczygieł R., Piwnicki J. 2010. Opracowanie nowej metody prognozowania zagrożenia pożarowego lasu. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary, 90 s.
- Kwiatkowski M., Szczygieł R. 2015. Klimatyczne aspekty ochrony przeciwpożarowej lasu. Konferencja pt. „Klimatyczne uwarunkowania życia lasu”, Rogów, 16-17 czerwca 2015 r. http://cepl.sggw.pl/konferencja/klimat/abstract/Klimatyczne_aspekty_ochrony_przeciwpozarowej_lasu.htm [5.02.2017].
- Matteucci M. 2017. A Tutorial on Clustering Algorithms. https://home.deib.polimi.it/matteucc/Clustering/tutorial_html/cmeans.html [7.03.2017].
- World Meteorological Organization 2002. Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New attachment II-9. *Manual on the GDPS* 485(1).

- Prędecka A. 2011. Ogień w lesie a przyroda. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa, 166 s.
- R Core Team 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> [11.01.2017].
- Real R., Vargas H.M. 1996. The Probabilistic Basis of Jaccard's Index of Similarity. *Systematic Biology* 45(3): 380–385. DOI 10.1093/sysbio/45.3.380.
- Szczygieł R., Ubysz B., Piwnicki J. 2009. Kryteria oceny ryzyka zagrożenia pożarowego lasu. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 15(3): 83–113.
- Szczygieł R. 2012. Wielkoobszarowe pożary lasów w Polsce. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 25(1): 67–78.
- Wiler K., Wcisło P. 2013. Ochrona lasów przed pożarami. CILP, Warszawa, 6–88. ISBN 978-83-61633-95.

Wkład autorów

Pracę napisano we współpracy na każdym z etapów, z procentowym udziałem: K. P.-K. – 60%, K. K.-K. – 40%.