

*Maciej Sabal*¹

*Tomasz Danek*²

*Mateusz Zaręba*³

*Elżbieta Węglińska*⁴

Polityka publiczna oparta na dowodach jako szansa na poprawę jakości powietrza w Krakowie

Abstrakt

Zanieczyszczone powietrze jest jednym z głównych zagrożeń zdrowotnych dla mieszkańców miast. Problem dotyczy polskich metropolii, dlatego został dostrzeżony przez władze krajowe, regionalne i lokalne. W Krakowie przez dekady odnotowywano wysokie stężenia szkodliwych substancji, w tym PM_{2,5}. W ostatnich latach w mieście dokonane zostały radykalne kroki w zakresie poprawy jakości powietrza, których ukoronowaniem był zakaz stosowania paliw stałych od 2019 r. Mimo pewnej poprawy, w Krakowie wciąż notowane są wysokie stężenia pyłów zawieszonych, spowodowane napływem zanieczyszczonego

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: sabal@agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-5816-9058>

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: tdanek@agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-8101-7469>

³ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: zareba@agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-9663-6593>

⁴ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: weglińska@agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0645-6570>

powietrza z sąsiednich miejscowości. Autorzy przeprowadzili analizę predyktorów wpływających na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie, opartą o dane z ogólnodostępnych czujników firmy Airly zlokalizowanych w okolicach miasta. Następnie zestawiono te wyniki z informacjami na temat liczby i rodzaju źródeł ogrzewania w gminach wokół Krakowa oraz poziomem zamożności w tych gminach. Na tej podstawie sporządzono rekomendacje dla władz regionalnych i lokalnych. Celem publikacji jest ocena użyteczności zintegrowanych trzech źródeł danych (dane z czujników powietrza, dane o źródłach ogrzewania, dane o dochodach) do zastosowania polityki publicznej opartej na dowodach w Aglomeracji Krakowskiej w obszarze poprawy jakości powietrza.

Słowa kluczowe: smog, polityka publiczna, powietrze, dane naukowe, dowody

Kody klasyfikacji JEL: H70, Q56, R11

Evidence-Based Public Policy as an Opportunity to Improve Air Quality in Krakow

Abstract

Air pollution is one of the main health risks for city dwellers. The problem affects Polish cities, which is why it has been recognised by national, regional and local authorities. For decades, high concentrations of harmful substances, including PM2.5, have been recorded in Krakow. In recent years, radical steps have been taken in the city to improve air quality, culminating in a ban on the use of solid fuels since 2019. Despite some improvement, high concentrations of particulate matter are still recorded in Krakow, caused by the inflow of polluted air from neighbouring towns. The authors conducted an analysis of predictors influencing air pollution in Krakow, based on data from publicly available Airly sensors located in the vicinity of the city. They then compared these results with information on the number and type of heating sources in the municipalities around Krakow and the level of prosperity in these municipalities. On this basis, recommendations were made to regional and local authorities. The aim of the publication is to assess the usefulness of integrating three data sources (air sensor data, heating source data, income data) for the application of evidence-based public policy in the Krakow agglomeration in the area of air quality improvement.

Keywords: smog, public policy, air, scientific data, evidence

JEL Classification Codes: H70, Q56, R11

Wprowadzenie

Zanieczyszczenie powietrza stanowi jedno z największych zagrożeń dla zdrowia, powodując choroby układu krążenia i układu oddechowego, a także skracając oczekiwaną długość życia (Cohen et al., 2017). W całej Europie poziomy zanieczyszczenia uważane są za zagrożenie dla zdrowia. Problem dotyczy w szczególności stopniowo obszarów miejskich. W 2021 r. 97% populacji miejskiej było narażonych na stężenia drobnych cząstek stałych przekraczające poziom wytycznych zdrowotnych ustalonych przez WHO. Najwyższe stężenia cząstek stałych, spowodowanych spalaniem paliw stałych do ogrzewania domów oraz wykorzystania ich w przemyśle, notuje się w Europie Środkowo-Wschodniej, we Włoszech i na Bałkanach (Air Quality in Europe, 2024). Według Banku Światowego 36 z 50 najbardziej zanieczyszczonych miast w Unii Europejskiej (UE) znajduje się w Polsce (BŚ, 2019).

Przykładem miasta, którego mieszkańcy zmagają się z problemami z jakością powietrza, jest Kraków. Jednym z czynników, który się do tego przyczynił, było działanie na terenie miasta i okolic przemysłu ciężkiego. Od lat 90. XX w. zaobserwowano spadek zanieczyszczenia powietrza, dzięki wdrożeniu technologii kontroli z niższymi normami emisji, a także innym procesom modernizacyjnym (Kleczkowski, 2019). Mimo to wciąż występuje problem zanieczyszczenia pyłami PM_{2,5} i PM₁₀, choć od 2019 r. w Krakowie nie można stosować paliw stałych. Problem jest dojmujący, z uwagi na konsekwencje związane z chorobami układu oddechowego, serca, przedwczesnymi zgonami (Rajagopalan et al., 2018; Chau i Wang, 2020; Hanigana et al., 2019; Cohen et al., 2017).

Choć na źródła zanieczyszczenia powietrza w mieście składają się różne czynniki, to decydujące znaczenie, obok ruchu ulicznego, ma ogrzewanie paliwami stałymi (Traczyk i Gruszecka-Kosowska, 2020). Dzięki zastosowaniu geostatystycznej analizy przestrzenno-czasowej stężeń cząstek stałych na podstawie wskazań czujników firmy Airly wykazano, iż zanieczyszczone powietrze dociera do Krakowa z sąsiednich gmin, w których nie ma zakazu stosowania paliw stałych (Danek et al., 2022). W niniejszej publikacji zestawiono te wyniki z danymi z bazy Centralnej Ewidencji Emisyjności Budynków (CEEB), w której zawarte są informacje o źródłach ciepła w podziale na gminy. Baza ta udostępniana jest pracownikom uczelni, co pozwoliło na dostęp do tego unikalnego źródła danych. W ten sposób autorzy wykazali powiązania nie tylko pomiędzy danymi z czujników i czynnikami meteorologicznymi, ale także pomiędzy liczbą i rodzajami źródeł ciepła funkcjonujących w gminach wokół Krakowa. Dodatkowo wskazano powiązania pomiędzy zamożnością poszczególnych gmin i stopniem zanieczyszczenia.

W publikacji powołano się na koncepcję polityki publicznej opartej na dowodach. Organy rządu i samorządów różnego szczebla prowadzą programy wsparcia dla mieszkańców regionu, jednak są one niewystarczające. Według autorów interwencje powinny być poparte precyzyjnymi informacjami uwzględniającymi nie tylko liczbę wymienionych źródeł ciepła czy zmodernizowanych budynków, ale także kwestię uwarunkowań geograficznych, geologicznych, meteorologicznych, a dodatkowo odnoszących się do poziomu dochodów mieszkańców. Aby opracować oparte na dowodach polityki dotyczące jakości powietrza, kluczowe znaczenie ma integracja kilku obszarów naukowych. Ta integracja wymaga wskazania klarownych powiązań. W tym celu autorzy najpierw opisali koncepcję polityki opartej na dowodach, następnie przedstawili problem jakości powietrza w Krakowie. Następnie opisano główne predyktory jakości powietrza oraz powiązано je z różnymi źródłami danych. Ta procedura miała na celu integrację tych źródeł i przedstawienie ich jako dowodów naukowych. Autorom zależało na podaniu ich w przystępnej formie.

W publikacji przedstawione zostały rysunki i mapy, z których wynika, w jaki sposób powietrze „dociera” do Krakowa, posłużono się również analizą skupień, która wskazała na miejsca newralgiczne w kontekście realizowania polityki zmierzającej do poprawy jakości powietrza. Celem publikacji jest ocena użyteczności zintegrowanych trzech źródeł danych (dane z czujników powietrza, dane o źródłach ogrzewania, dane o dochodach) do zastosowania polityki publicznej opartej na dowodach w Aglomeracji Krakowskiej w obszarze poprawy jakości powietrza.

Polityka publiczna oparta na dowodach

Termin „praktyki opartej na dowodach” został wprowadzony do obiegu naukowego na polu nauk medycznych. Oparcie się na dowodach naukowych w tym obszarze zapoczątkowane zostało w latach 60. XX w. (Feinstein, 1967). Autorem książki, w której zostały zawarte podstawy tego podejścia, jest brytyjski epidemiolog Archie Cochrane (1972). Ta pozycja dedykowana była nie tylko menedżerom służby zdrowia, ale także politykom. W książce poddano krytyce fakt, iż zarządzający brytyjską służbą zdrowia nie korzystają ze wskazówek naukowych. Tymczasem w codziennej praktyce decydenci powinni opierać się o tę wiedzę w odniesieniu zarówno do skuteczności leczenia, jak i właściwego wykorzystania zasobów. Przykładem może być wykorzystanie informacji o dotychczasowym leczeniu, a nawet sytuacji finansowej pacjentów (Hoffman et al., 2013; Hammersley, 2005).

Medycynę opartą na dowodach definiuje się jako „jasne i sumienne próby znalezienia najlepszych dostępnych dowodów naukowych, aby pomóc pracownikom

służby zdrowia podejmować najlepsze decyzje dla ich pacjentów” (Sackett et al., 1996). Z czasem koncepcja przeniosła się na inne obszary, w tym edukację (Buskist i Groccia, 2011), pomoc społeczną (Bellamy et al., 2006) czy wymiar sprawiedliwości (Mears i Barnes, 2010). Koncepcja ta trafiła również do nauk o zarządzaniu, *evidence-based management* (Rousseau, 2006; Pfeffer i Sutton, 2006). W tym przypadku u źródeł narodzin koncepcji leżało przekonanie, zgodnie z którym luka pomiędzy badaniami naukowymi a praktyką powinna zostać zmniejszona, a przyszli menedżerowie winni częściej podejmować swoje decyzje w oparciu o dowody empiryczne. Takie podejście powinno zminimalizować ryzyko podejmowania błędnych decyzji (Rousseau i McCarthy, 2007). Punktem wyjścia dla podejmowania decyzji powinny być rzetelne fakty i dowody naukowe (Kepes et al., 2024; Shapiro et al., 2007). Na informacje te powinny się składać krytyczny przegląd danych empirycznych, wiedza i doświadczenie osób zajmujących się zarządzaniem, dane dostępne lokalnie oraz perspektywa osób, które zostaną objęte konsekwencjami decyzji (Rousseau, 2006).

Obszarem, w którym postulaty oparcia się na dowodach w procesie podejmowania decyzji mogą znaleźć zastosowanie, jest sfera polityk publicznych. Polityki publiczne rozumiane są jako ogół działań administracji publicznej według założonych celów (Davies, Nutley i Smith, 2009). Polityki publiczne opierają się na uporządkowanych działaniach, zmierzających do realizacji interesów społecznych, obszar ten jest zbliżony do zarządzania strategicznego (Bryson, 2004). W kontekście opisywanej koncepcji używa się terminu polityki publicznej opartej na dowodach (*evidence-based policy*), opierającej się na założeniu, iż decyzje polityczne powinny być podejmowane z wykorzystaniem racjonalnej analizy i danych naukowych (Sutcliffe i Court, 2005). Opisywany termin w języku angielskim nie pozostawia wątpliwości co do przedmiotu opisu. W języku polskim sformułowanie nastrocza problemów. W języku angielskim używa się dwóch pojęć: *politics* oraz *policy*, które na język polski tłumaczy się jako „polityka”. *Politics* rozumiemy jako sposób zdobywania i utrzymania władzy, natomiast *policy* oznacza działania podejmowane w celu realizacji zaspokajania głównych potrzeb społeczeństwa, m.in. odpowiedniego poziomu życia, bezpieczeństwa, rozwoju gospodarczego etc., które w języku polskim ma odpowiednik polityka publiczna (Cambridge Dictionary, 2025). Zatem pojęcie *evidence-based policy* należałoby przetłumaczyć jako „polityka publiczna oparta na dowodach”, jednak w polskiej literaturze stosuje się również sformułowanie „polityka oparta na dowodach”.

Podejście *evidence-based policy* zostało spopularyzowane w Wielkiej Brytanii. W 1999 r. ówczesny premier tego kraju Tony Blair użył tego stwierdzenia, tłumacząc, że polityka jego gabinetu powinna opierać się o dowody (Muers, 2020). Sama idea nie była jednak nowa. Warto podkreślić, że w nauce od lat pojawiały się głosy wskazujące na potrzebę połączenia wiedzy naukowej, wiedzy pragmatycznej oraz wiedzy

opartej na wartościach (Flyvbjerg, 2001). Wkrótce po sformułowaniu deklaracji przez brytyjskiego premiera, władze tego kraju wprost zobowiązały się do podejmowania decyzji w oparciu o dowody naukowe (Cabinet Office, 1999). W przypadku *evidence-based policy* część badaczy wskazuje, iż podejście to bywa instrumentalizowane przez polityków (Cairney, 2016; Cairney, 2022; Sullivan, 2011; Stevens, 2020).

Sama trudność tego pojęcia dotyczy również określenia dowodów. Skoro decyzje polityczne powinny być oparte na najlepszych dostępnych dowodach, to podstawowym problemem jest wskazanie zakresu tychże (Baron, 2018). Polityka publiczna obejmuje tak szerokie spektrum zagadnień, że potrzebne jest korzystanie z obszarów z wielu różnych dyscyplin, które powinny być zintegrowane i zrozumiałe, a jednocześnie tak sformułowane, aby dało się je przełożyć na tworzone prawo. Te liczne warunki mogą być spełnione w wyniku ścisłej współpracy ze środowiskiem naukowym. Sama wiedza jest bowiem dostępna w otwartych bazach i repozytoriach, jednak dostosowanie odpowiedniej wiedzy wymaga formalnej współpracy i ściśle sprecyzowanych ram jej użycia (Moldoveanu, 2005).

Również w polskim środowisku naukowym kwestia zastosowania dowodów w polityce publicznej została dostrzeżona. Przedmiotem zainteresowania był zarówno problem wpływu wiedzy naukowej na decyzje polityczne, jak i oceny skutków regulacji prawnych (Górniak, Mazur, 2011). Skoncentrowano się na problemie stosowania wiedzy naukowej na szczeblu rządowym i samorządowym. Ważnym elementem w procesie stosowania tej wiedzy jest ewaluacja, którą można zdefiniować jako użycie metod badań społeczno-ekonomicznych do systematycznego zbierania danych, analizy, interpretacji, oceny i informowania o skuteczności programów publicznych (Mathison, 2004), w Polsce upowszechniła się po przystąpieniu do UE (Górniak i Keler, 2008). W praktyce zdarzało się, że ewaluacja nie spełniała swojej roli, czyli nie prowadziła do dostarczenia rzetelnych informacji przydatnych w procesie decyzyjnym, a instytucje publiczne, które zamawiają raporty ewaluacyjne, zarazem je akceptują, co oznacza, że podmiot oceniany wpływa na ostateczny kształt oceny (Geodecki et al., 2012). Do opisanych powyżej problemów związanych z polityką publiczną opartą o dowody należy dodać problem małej współpracy samorządów różnych szczebli (Milewska i Parlińska, 2021).

Problem jakości powietrza w Krakowie

Od lat 50. XX w. czynnikiem przyczyniającym się do obniżenia jakości powietrza było umiejscowienie na terenie Krakowa przemysłu ciężkiego, z czasem sytuacja zaczęła ulegać poprawie. Duży wpływ na to miało zakończenie działalności przemy-

słowej przez część przedsiębiorstw (Kleczkowski, 2019). Władze miasta prowadzą zaawansowaną politykę w zakresie przeciwdziałania zanieczyszczeniu powietrza. Jedną z pierwszych form wsparcia były dotacje do wymiany źródeł ogrzewania dla osób o niskich dochodach, poprzez przyjęcie Programu Ograniczania Niskiej Emisji dla Miasta Krakowa w 2010 r. (Miasto Kraków, 2010). Następny ważny krok został podjęty przez władze Województwa Małopolskiego. Od 1 września 2019 r. zakazano używania paliw stałych na obszarze Krakowa do ogrzewania oraz przygotowywania posiłków przez gospodarstwa indywidualne (UMWM, 2016). Opracowano również program osłonowy, który polega na dopłatach do zwiększonych kosztów grzewczych dla osób o najniższych dochodach (Miasto Kraków, 2023). Mimo tego zakazu, mieszkańcy miasta wciąż borykają się z problemem zanieczyszczonego powietrza, zwłaszcza zimą (GIOŚ, 2023).

W regionie również obowiązują ograniczenia w zakresie źródeł ogrzewania, ale nie tak restrykcyjne jak w samym Krakowie. W Małopolsce obowiązuje uchwała ograniczająca stosowanie kotłów na paliwa stałe do tych urządzeń, które spełniają normy ekoprojektu (UMWM, 2017). Najbardziej emisyjne urządzenia miały zostać zlikwidowane do 1 maja 2024 r. Aby zyskać wsparcie, mieszkańcy regionu mogą skorzystać z ogólnopolskiego programu Czyste Powietrze, zapoczątkowanego w 2020 r. (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2024). Osoby, które chcą skorzystać z dofinansowania, muszą wyłożyć stosunkowo wysoki wkład własny. Program jest często aktualizowany, na początku jego realizacji można było otrzymać wsparcie na zakup kotłów na paliwa stałe, choć stopniowo polskie władze wycofują się z tego rozwiązania. Popularnym urządzeniem, które jest kupowane w ramach programu, jest pompa ciepła. Te urządzenia z kolei przeznaczone są dla budynków o odpowiedniej termoizolacji, która wprawdzie też może być przedmiotem wsparcia, ale wymaga wysokiego wkładu własnego. Ponadto programowi nie towarzyszy działanie osłonowe dla rodzin o niższych dochodach. W związku z tym proces wymiany urządzeń grzewczych przebiega powoli. Warto podkreślić, że na poziomie regionu czy kraju nie ma specjalnego programu osłonowego dotyczącego kosztów ogrzewania.

Na problemy formalne i finansowe związane z jakością powietrza w Krakowie nakładają się uwarunkowania geograficzne. Południowa część Polski, szczególnie Małopolska i Górny Śląsk, charakteryzuje się niekorzystnymi warunkami środowiskowymi powodującymi, że w miesiącach zimowych jakość powietrza jest bardzo niska (Jędruszkiewicz et al., 2017). Kraków położony jest w dolinie przeciętej równoleżnikowo doliną rzeki Wisły. Specyficzna morfologia obszaru Krakowa sprawia, że pionowa i pozioma, naturalna wentylacja powietrza jest utrudniona (Morawska-Horawska i Lewik, 2003; Bokwa, 2019). Wisła wpływa do miasta od zachodu,

gdzie znajduje się Kotlina Oświęcimska i Brama Krakowska. Dolina rzeki znajduje się pomiędzy wzgórzami blokowo-uskokowymi. Rzeka opuszcza miasto od wschodu (nizinna Kotlina Sandomierska). Północne wypiętrzenie jest związane z występowaniem wapieni jurajskich (Polska Wyżyna Jurajska). Południowe wypiętrzenie jest częścią Pogórza Wielickiego. Tatry i śródgórskie zagłębienie Karpat znajdują się w linii prostej na południe od miasta w odległości mniejszej niż 100 km, co powoduje występowanie silnych, ciepłych wiatrów halnych typu fenowego w Krakowie (Hrehorowicz-Gaber, 2015; Ośróodka et al., 2010).

Na jakość powietrza ma wpływ transport mas powietrza z sąsiednich gmin. Dokładny kierunek ruchu tych mas udało się poznać dzięki unikalnemu badaniu opartemu m.in. o dane z czujników Airly rozmieszczonych w Krakowie i wokół miasta. Pomiar obejmował również ciśnienie atmosferyczne, temperaturę i wilgotność. Dane zostały zebrane w trakcie częściowego lockdownu podczas pandemii COVID-19 w Polsce. Pozwoliło to na obserwację zanieczyszczeń powietrza z ogrzewania paliwem stałym przy znacznie obniżonym zanieczyszczeniu generowanym przez ruch drogowy. W badaniu przeanalizowano stężenia PM_{2,5} i PM₁₀ w Krakowie i gminach ościennych oraz pokazano główne kierunki migracji zanieczyszczeń powietrza w powiązaniu z kierunkiem wiatru. Wyniki badania wskazały, iż zanieczyszczenia powietrza w Krakowie w badanym okresie wynikały głównie z migracji zanieczyszczeń. Pochodziły więc z gmin, w których nadal do ogrzewania stosować można paliwa stałe (Danek et al., 2022).

Metody

W publikacji skorzystano z wyników stacji pomiarowych Airly⁵ oraz danych meteorologicznych z NOAA z API OpenMeteo (Zippenfenig, 2023). Gęsta sieć czujników pozwoliła na przeprowadzenie analizy przestrzennej. Zmierzone wielkości były weryfikowane i kalibrowane przy użyciu algorytmów uczenia maszynowego i wskazań ze stacji referencyjnych. Przedstawione dane zbierano przez tydzień od wtorku 15 marca do poniedziałku 21 marca 2022 r., co pozwoliło przeanalizować poszczególne dni tygodnia, a także weekend i jego skutki. Wszystkie obliczenia zostały wykonane w R przy użyciu pakietów *party* i *imb* (Strobl et al., 2008; Molnar et al., 2018). Dane pochodzą z 52 czujników.

W pracy skorzystano również z informacji o liczbie źródeł ogrzewania w poszczególnych gminach. W Polsce od 1 lipca 2022 r. każdy posiadacz domu ma obowiąz-

⁵ <https://map.airly.org/>

zek zgłoszenia źródła ogrzewania do Centralnej Ewidencji Emisyjności Budynków (CEEB). Informacje te są zebrane w rządowej bazie (Sejm RP, 2020). Zgodnie z formularzem ankiety, jako źródło ciepła na paliwo stałe można było wskazać: kocioł na paliwo stałe z ręcznym podawaniem paliwa; kocioł na paliwo stałe z automatycznym podawaniem; kominek/koza na paliwo stałe; piec kaflowy na paliwo stałe; trzon kuchenny/kuchnia węglowa.

Dane z bazy mogą być udostępnione uczelniom i jednostkom badawczym (Sejm RP, 2023). W publikacji posłużono się tym unikatowym źródłem i zebrano informacje o źródłach ogrzewania w gminach wokół Krakowa. Chodzi o następujące gminy: Liszki, Zabierzów, Wielka Wieś, Zielonki, Michałowice, Kocmyrzów-Luborzycza, Igołomia-Wawrzeńczyce, Niepołomice, Biskupice, Wieliczka, Świątyniki Górne, Mogilany, Skawina, Czernichów oraz Koniusza, nazywanych potocznie „obwarzankiem” Krakowa. Dodatkowo posłużono się informacjami o dochodach podatkowych na 1 mieszkańca gminy za 2022 r. Dane te są zbierane przez Ministerstwo Finansów (MF) na potrzeby obliczania subwencji dla poszczególnych gmin, ale służą również szacowaniu ich zamożności (Ministerstwo Finansów, 2024).

Skorzystanie z trzech źródeł danych: Airly, CEEB oraz MF, pozwoliło na zestawienie unikalnych informacji o wpływie źródeł ciepła na jakość powietrza, a także wpływie zamożności mieszkańców na wybór źródeł ogrzewania.

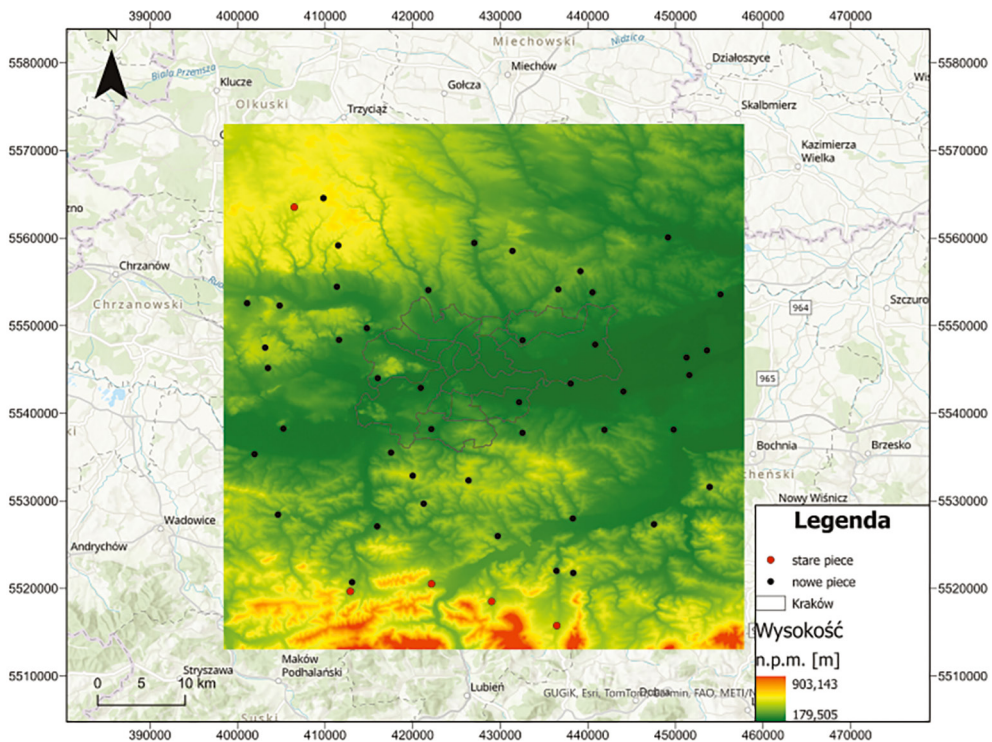
Rezultaty

W pierwszej kolejności przedstawiona zostanie analiza wskazująca na główne trendy dotyczące zanieczyszczenia powietrza. Autorzy wyróżnili dwie grupy kotłów na paliwo stałe wokół Krakowa: z automatycznym podajnikiem (KAP, nowe piece) i pozostałe, bez takiego podajnika (kotły z ręcznym podawaniem, KRP, stare piece). Dla tych grup wyróżniono odmienne predyktory wpływające na zanieczyszczenie powietrza. Następnie zestawiono informacje wynikające z tej analizy z liczbą źródeł ciepła na paliwo stałe w gminach ościennych Krakowa, a także z poziomem zamożności mieszkańców tychże gmin w oparciu o wysokość podatków.

Zbiór danych gromadzonych w dniach 15–21 marca 2022 r. obejmuje dane godzinowe dla PM_{2,5}, godzinę roku, godzinę dnia, temperaturę (2 m), wilgotność względną (2 m), punkt rosy (2 m), temperaturę pozorną, ciśnienie powierzchniowe, opady, deszcz, opady śniegu, zachmurzenie, prędkość wiatru (10 m), kierunek wiatru (10 m), temperaturę gleby (0–7 cm), wilgotność gleby (0–7 cm), szerokość geograficzną, długość geograficzną, datę i identyfikator czujnika. Przestrzenne rozmieszczenie czujników i obszar badań pokazano na rysunku 1. Należy zauważyć, że

na rysunku uwzględniono również czujniki poza obszarem wymienionych gmin, aby w pełniejszy sposób przedstawić tendencje opisane w publikacji.

Rysunek 1. Lokalizacje czujników zmapowane na profilu wysokościowym obszaru Krakowa, ze wskazanymi granicami aglomeracji miejskiej



Uwagi: Czerwone kropki oznaczają lokalizację czujników Airly wykazujących dominację KRP (stare piece), czarne kropki wskazują KAP (nowe piece).

Źródło: opracowanie własne.

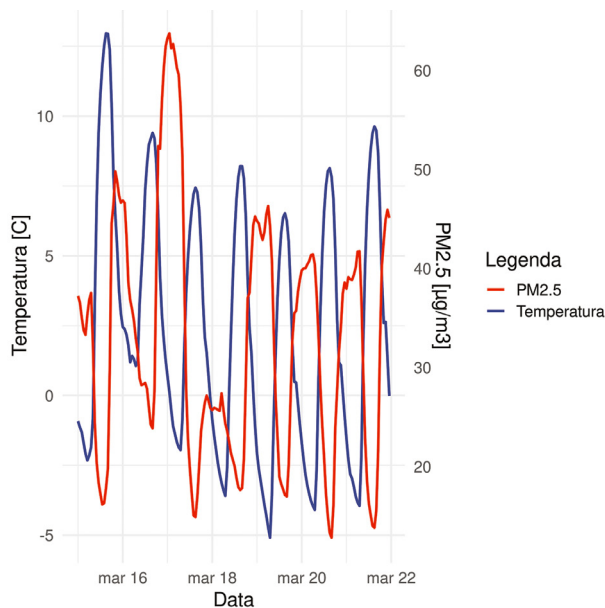
Główne predyktory związane z zanieczyszczeniem powietrza

Rysunek 2 przedstawia średnie stężenia PM_{2,5} wraz ze średnią temperaturą na badanym obszarze. Nie ma bezpośredniej korelacji między temperaturą a poziomami PM_{2,5} – np. w nocy z 17 na 18 marca spadek PM_{2,5} był spowodowany silnym wiatrem. Wyraźnie wskazuje to, że zależności w danych są bardziej złożone niż prosty związek między niskimi temperaturami a potrzebami grzewczymi, a analiza modelowa zgodności PM_{2,5} wymaga zniuansowanego podejścia.

Mając do czynienia ze złożonymi i rozbudowanymi zbiorami danych i próbując je modelować, pierwszym krokiem powinno być sprawdzenie wszelkich podstawo-

wych wzorców, które łączą dane. Analiza głównych składowych (*Principal Component Analysis*, PCA) odpowiada temu celowi, ponieważ jest skuteczna w identyfikowaniu skorelowanych szeregów czasowych i odkrywaniu ukrytych struktur w danych.

Rysunek 2. Średnie stężenia PM2,5 i średnia temperatura obserwowana na całym badanym obszarze



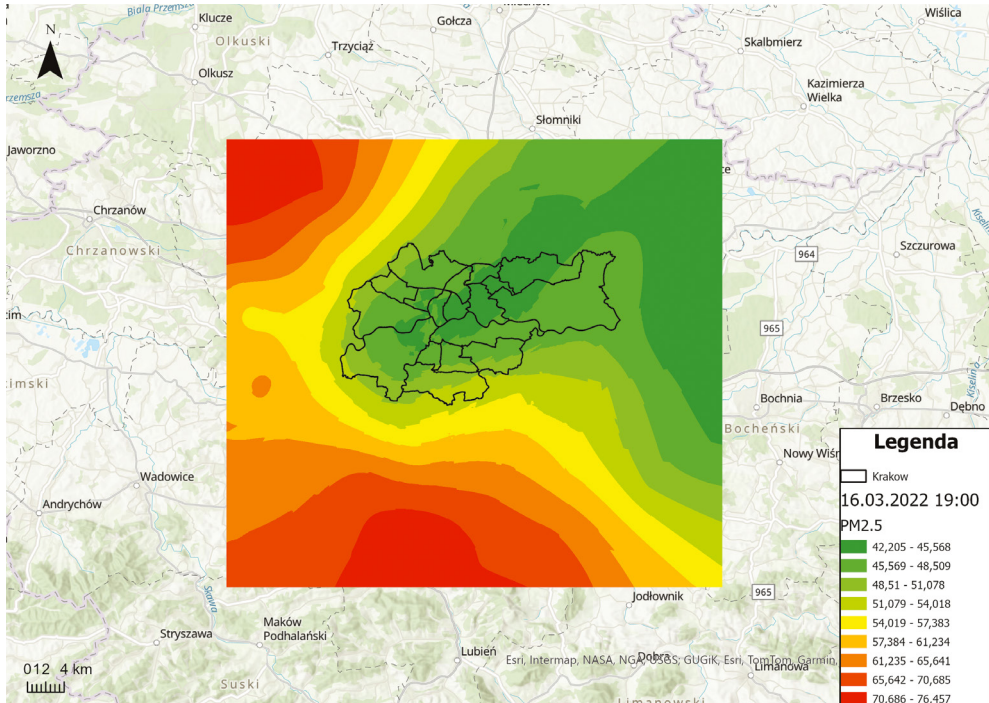
Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiona na rysunku 3 mapa przedstawia przestrzenny rozkład stężeń PM2,5 podczas epizodu z 16 marca 2022 r. (19:00), przy stabilnym słabym wietrze (~8 km/h) (Zippenfenig, 2023), co sprzyja akumulacji zanieczyszczeń i ogranicza ich rozpraszanie. Kraków widoczny jest jako obszar relatywnie niższych stężeń na tle otoczenia. Podwyższone stężenia występują głównie na zachód i południe od miasta, co wskazuje na dominującą rolę lokalnych emisji pozamiejskich przy słabej wentylacji. Brak wysokich stężeń na wschód od Krakowa sugeruje mniejszą stwierdzoną przez czujniki presję emisyjną w tym sektorze w danym momencie oraz brak efektywnego transportu zanieczyszczeń przy niskich prędkościach wiatru.

Wyniki PCA (rysunek 4) wyraźnie wyróżniają grupę kilku czujników, w szczególności 37932, 37933, 37927, 37925 i 38556 (czerwone kropki na rysunku 1). Na rysunku 5 przedstawiono średnie uzyskane z obu grup utworzonych na płaszczyźnie PC1/PC2. Wyraźny spadek wartości w późnych godzinach nocnych jest szczególnie widoczny w danych z mniejszej, oddzielonej grupy. Sugeruje to, że pomiary zostały

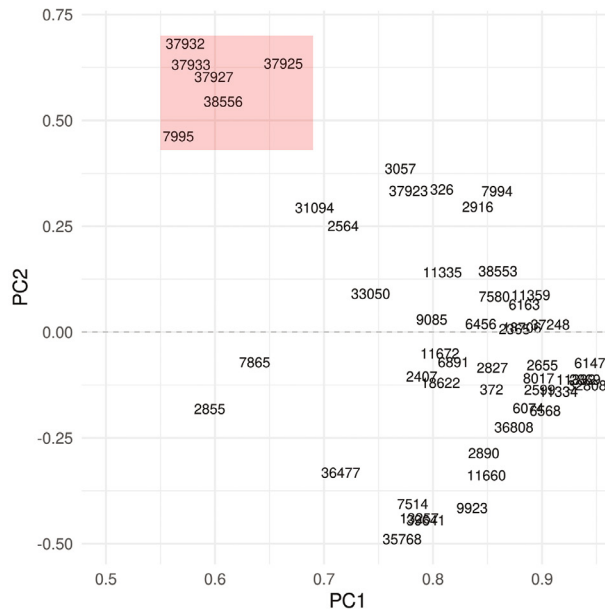
wykonane w pobliżu starych, ręcznie obsługiwanych kotłów, które nie otrzymują paliwa, gdy domownicy śpią. Urządzenia te są generalnie odpowiedzialne za zwiększoną emisję, co wyraźnie widać na skali pionowej na rysunku 4 (KRP).

Rysunek 3. Wartości stężeń PM_{2,5} wyinterpolowane metodą krigingu na badanym obszarze 16.03.2022 r. o godz. 19:00



Źródło: opracowanie własne.

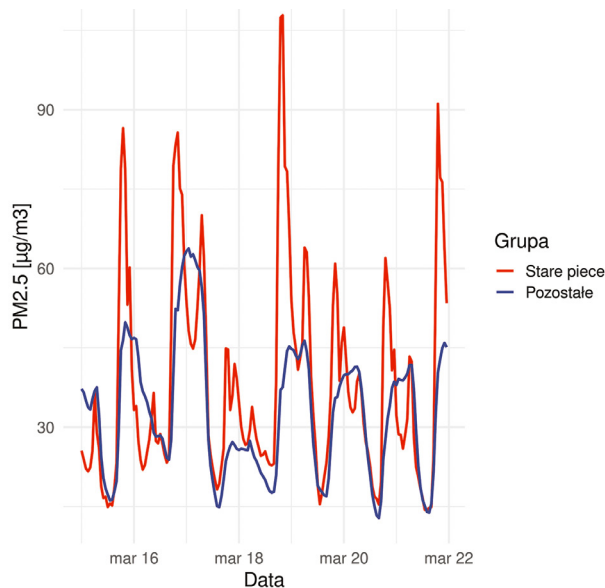
Rysunek 4. Wyniki PCA – poszczególne stacje są oznaczone identyfikatorami



Uwagi: Grupa KRP jest wyraźnie oddzielona od innych czujników w lewym górnym rogu płaszczyzny PC1/PC2 (czerwone kropki na rysunku 1).

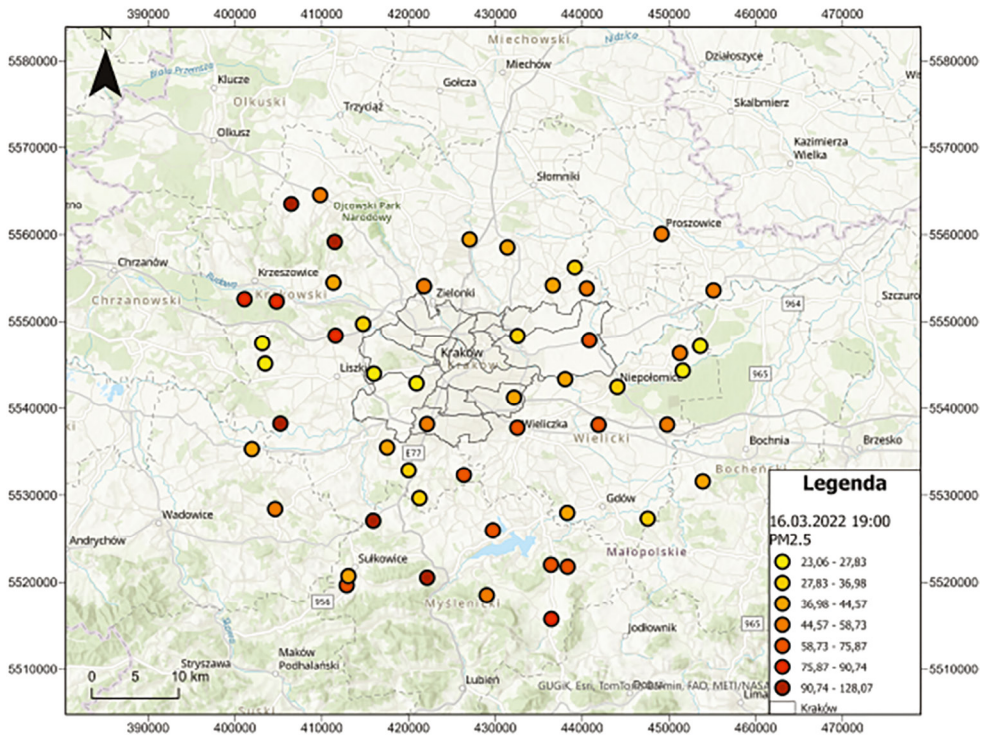
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 5. Średnie odczyty czujników KRP w porównaniu do wszystkich innych czujników



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6. Przestrzenny rozkład stężeń PM_{2,5} na badanym obszarze w wybranej godzinie analizowanego tygodnia



Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6 można zauważyć, że punkty związane ze wzorcem KRP mają wyraźnie podniesione wartości stężeń PM_{2,5} (16.03.2022, godz. 19:00) oraz że na obszarze Krakowa wartości są wyraźnie mniejsze.

Analiza ważności predyktorów pokazała, że w przypadku grupy starych urządzeń grzewczych głównym predyktorem była wyraźnie pora dnia. Wskazuje to, że powstawanie zanieczyszczeń w tej grupie w analizowanym tygodniu, w którym panowały typowe dla Polski zimowe warunki pogodowe, było całkowicie uzależnione od wzorca zachowań mieszkańców. W przypadku KAP głównym predyktorem była wilgotność, która znacznie przewyższa następnego najważniejszego predyktora, temperaturę. Na podstawie naszych ustaleń możemy założyć, że zanieczyszczenie jest „uwięzione” przez wilgoć, wychwytywane z powietrza i utrzymywane blisko ziemi ze względu na zwiększoną masę cząstek. Obecność cząsteczek wody w aerozolu wpływa również na pomiary PM_{2,5}, ponieważ zawartość wody w aerozolu waha się od 20 do 35% przy wilgotności względnej 50% (Tsyro, 2005). Warto zauważyć, że opady są kolejnym ważnym predyktorem dla tej grupy. Chociaż wilgotność odgrywa rów-

niez znaczącą rolę w przypadku grupy starych kotłów, nie jest to czynnik krytyczny. Na podstawie statystyki H (Friedman i Popescu, 2008) można zbadać interakcję między predyktorami. Należy skupić się nie tylko na wkładzie interakcji do wpływu poszczególnych zmiennych (mierzonych jako procent wariacji wyjaśnionej przez konkretny predyktor), ale raczej na identyfikacji parametrów wykazujących najbardziej wpływowe dwukierunkowe relacje z głównym predyktorem. Analiza ważności predyktorów została przeprowadzona z wykorzystaniem permutacyjnej analizy ważności zmiennych, która ocenia spadek jakości modelu po losowej permutacji wartości danego predyktora, pozwalając na porównywanie ich względnego znaczenia w sposób niezależny od skali i rozkładu zmiennych. Zestaw predyktorów obejmował wszystkie zmienne zawarte w zbiorze danych opisanych na początku rozdziału „Rezultaty”.

Obserwowany związek z wilgotnością może być częściowo związany ze sposobem działania czujników niskokosztowych, w których krople wody lub uwodnione aerozole mogą być klasyfikowane jako cząstki pyłu, co zostało jasno zaznaczone i poparte literaturą.

Rysunek 7 pokazuje, że w przypadku starych kotłów procent wariacji wyjaśniony przez główny predyktor (godzina dnia) jest w największym stopniu zależny od temperatury. Wskazuje to, że ich skumulowany efekt kształtuje lokalny poziom zanieczyszczenia. Natomiast w przypadku KAP efekt interakcji wydaje się być bardziej losowy, a interakcja między głównym (wilgotność) oraz innymi predyktorami jest mniej istotna. Niemniej można zaobserwować skumulowane znaczenie wilgotności i temperatury.

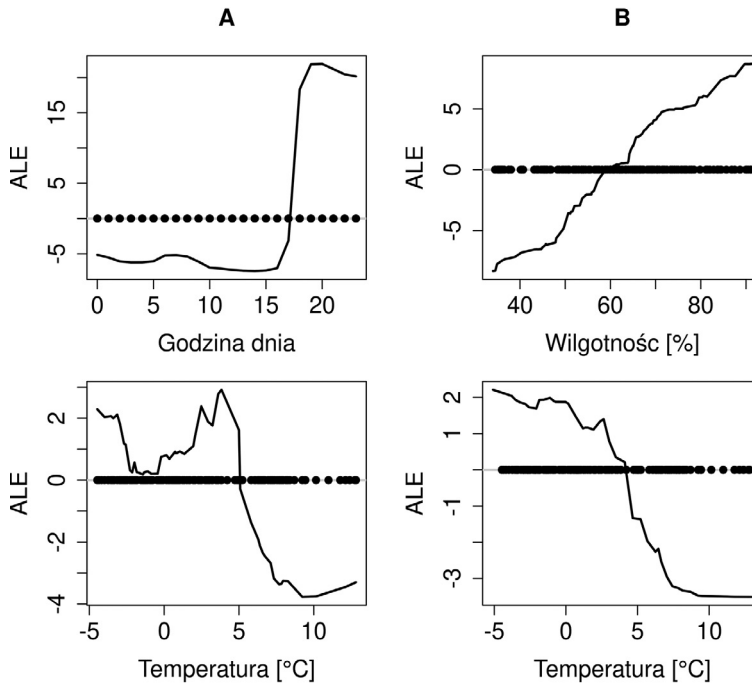
Aby dokładniej zbadać opisywane zależności, w kolejnym kroku zastosowano metodę *Accumulated Local Effects* (ALE) (Apley i Zhu, 2020). ALE służy do interpretacji wpływu poszczególnych cech na przewidywanie opisanego zjawiska, umożliwiając zrozumienie nieliniowych zależności między predyktorami. Ta metoda przedstawia skumulowane efekty cech na przewidywanie, umożliwiając analizę modeli ze złożonymi zależnościami. Rysunek 6 przedstawia wyniki uzyskane dla głównych predyktorów w obu grupach, a także dla temperatury.

W przypadku grupy KRP wpływ głównego predyktora (godziny dnia) jest wyraźnie nieliniowy. Kluczowym czynnikiem wydaje się być rozpoczęcie ogrzewania po południu, tradycyjnie kojarzone z ludźmi wracającymi do domu z pracy. Obserwowany wzór prawdopodobnie odpowiada brakowi automatyzacji w starych kotłach. Jeśli chodzi o temperaturę, wpływ temperatury powietrza na wysokości 2 m przechodzi z ujemnego na dodatni około 6°C, osiągając szczyt około 4°C. Następnie spada prawie do zera, zanim nieznacznie wzrośnie ponownie w przypadku temperatur poniżej zera. Należy zauważyć, że w analizowanym okresie średnia różnica między odczuwalną temperaturą a temperaturą w odległości 2 m wynosiła około 4,1°C. Jest

to zgodne z wcześniejszymi ustaleniami, które wskazują na znaczącą rolę odczuwalnej temperatury 0°C w emisjach PM_{2,5} (Jendritzky et al., 2001).

W przypadku KAP główny predyktor, wilgotność, ma liniowy wpływ na obserwowane poziomy PM_{2,5}, co wydaje się potwierdzać hipotezę możliwego „uwięzienia” zanieczyszczeń. Jeśli chodzi o temperaturę, obserwujemy bardziej regularny wpływ tego predyktora, z wyraźnymi punktami przegięcia w nieliniowej relacji przy około 6°C (gdzie jego istotność wzrasta) i około 0°C (gdzie jego istotność się stabilizuje). Przejście od ograniczenia do zwiększenia zanieczyszczenia następuje przy około 4°C. Skumulowany wpływ na PM_{2,5} w tym przypadku stanowi prawie połowę obserwowanego udziału w grupie KRP. Wyniki dla wilgotności i temperatury sugerują, że zanieczyszczenie jest transportowane ze źródeł zewnętrznych, a lokalne emisje prawdopodobnie pochodzą z nowocześniejszych, zautomatyzowanych urządzeń grzewczych.

Rysunek 7. Wyniki uzyskane dla głównych predyktorów w grupach KRP (A) oraz KAP (B)

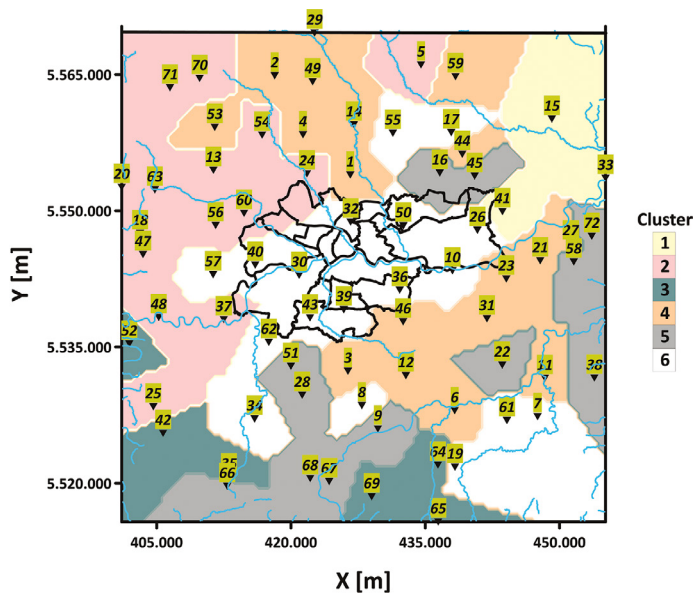


Źródło: opracowanie własne.

Liczba i rodzaj źródeł ciepła a poziom zanieczyszczenia

Wśród wyróżnionych dwóch grup, KRP i KAP, można zaobserwować korelacje związane z liczbą urządzeń i dynamiką wymiany źródeł ciepła. Istotne obserwacje poczyniono za pomocą klastrów, pokazanych na rysunku 8. Ujawniły one rozróżnienie między Krakowem a innymi gminami. Klastry 3 i 5 podkreślają złożoność i heterogeniczność wzorca KRP, jak pokazano na rysunku 2. Klaster 4 prawdopodobnie odpowiada obszarom z mniejszą liczbą KRP, co może być powiązane z wyższym poziomem dochodów i skuteczną wymianą źródeł ciepła. Klasteryzację przeprowadzono z wykorzystaniem algorytmu K-średnich z miarą Dynamic Time Warping (DTW), odpowiednią do analizy szeregów czasowych stężeń PM. Analizę wykonano dla różnych liczb klastrów, aby ocenić stabilność i jakość grupowania. Optymalną liczbę klastrów wybrano na podstawie indeksu Daviesa–Bouldina oraz Calinskiego–Harabasz, uzupełnionych interpretacją ekspercką uzyskanych wzorców. Ostatecznie wybrano sześć klastrów, które najlepiej odzwierciedlały zróżnicowane roczne profile stężeń PM, niezależnie od położenia geograficznego czujników.

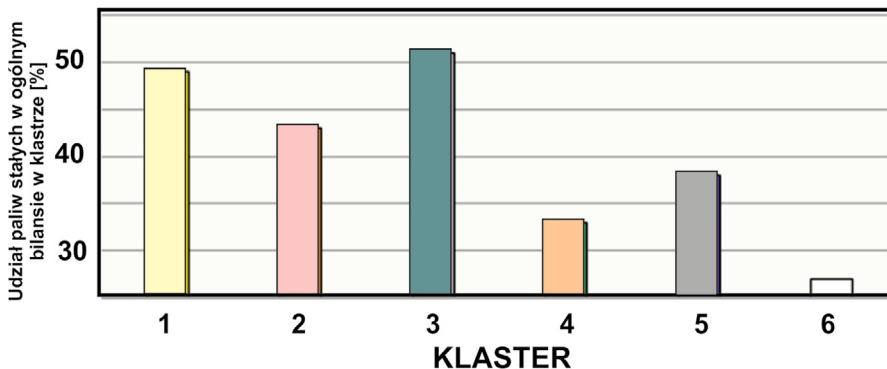
Rysunek 8. Wizualizacja wyników czasowo-przestrzennej klasteryzacji profili stężeń PM_{2,5} (2019–2022), z naniesionymi lokalizacjami czujników LCS (oznaczone żółto-zielonymi polami z czarnym opisem), przebiegiem rzek (niebieskie linie) oraz administracyjnym podziałem Krakowa na dzielnice (czarne granice)



Źródło: opracowanie własne.

Średni odsetek kotłów na paliwo stałe (*average percentage heaters, AHP*) w ogólnej liczbie urządzeń na klastery pokazano na rysunku 8. Dane z miast i wsi z mniej niż 20 całkowitymi źródłami ciepła zostały wyłączone. Wykluczone lokalizacje (*low cost sensors, LCS*) obejmują LCS 8 – Gołoszyn (8 źródeł ciepła, THS), LCS 11 – Pierzchów (16 THS), LCS 59 – Waganowice (5 THS), LCS 72 – Chobot (4 THS), LCS 45 – Karniów (18 THS), LCS 7 – Jaroszkówka (14 THS), LCS 19 – Kwapinka (4 THS), LCS 43 – Prandocin (6 THS) i LCS 55 – Zagorzyce Stare (7 THS). Dla klastra 1 AHP wynosi 49%, z niewielką zmiennością między czujnikami. W klastrze 2, z AHP na poziomie 43%, najwyższy odsetek wskazujący na „grupę starych pieców” występuje w LCS 71 – Czubrowice (62%), a najniższy w LCS 13 – Więckowice (25%). Klastery 3 ma AHP na poziomie około 51%, przy czym najwyższa wartość wynosi 76% w obu LCS 64 – Czaślaw i LCS 65 – Wiśniowa. Klastery 4, 5 i 6 wykazują znacznie niższe wartości AHP, od 27% do 34%, przy czym najniższe wartości w Klastrze 6 w dużej mierze reprezentują Kraków. Co godne uwagi, sam Kraków ma AHP poniżej 5%, co jest bezpośrednim wynikiem prawnych ograniczeń dotyczących wykorzystania paliw kopalnych.

Rysunek 9. Średni udział źródeł ciepła opartych na paliwach stałych w całkowitym bilansie energetycznym dla poszczególnych klastrowyodrębnionych na podstawie czasowo-przestrzennej klasteryzacji stężeń PM_{2,5} w Krakowie w latach 2019–2022



Źródło: opracowanie własne.

W przypadku grupy KAP główny predyktor, wilgotność, ma liniowy wpływ na PM_{2,5}. Potwierdza więc hipotezę możliwego „wychwytywania” zanieczyszczeń. Tabela 1 przedstawia liczbę KAP oraz liczbę wszystkich źródeł ogrzewania na paliwo stałe w podziale na gminy. Niższy udział KAP sugeruje większe wykorzystanie innych urządzeń wymagających ręcznej obsługi sprzętu. Wyniki klastrowania

są zgodne z rozkładem przestrzennym kotłów na paliwo stałe na rysunku 8, wyraźnie pokazując, że czynniki takie jak wydajność cieplna i rodzaj źródła ogrzewania w budynkach są związane z czasowym i przestrzennym rozkładem zanieczyszczenia powietrza w regionie. Jest to kluczowa obserwacja, podkreślająca potrzebę zintegrowania ochrony środowiska z energią i planowaniem urbanistycznym w celu rozwiązania długoterminowego problemu zanieczyszczenia powietrza.

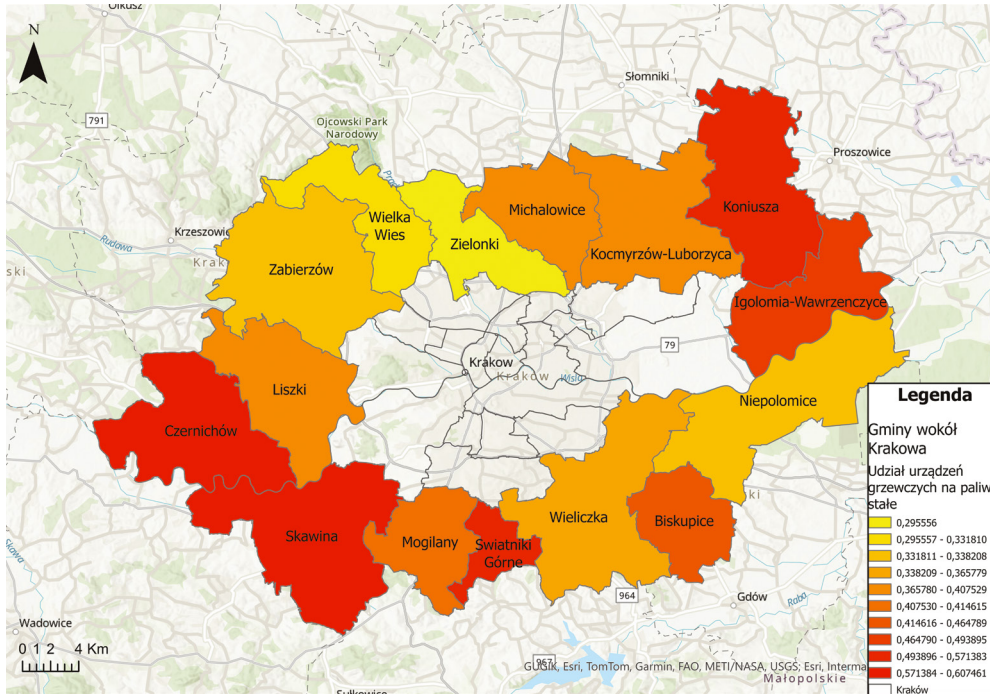
Tabela 1. Liczba kotłów na paliwa stałe w wybranych gminach na dzień 31.12.2023 r.

Gmina	Liczba źródeł ciepła na paliwa stałe	Liczba KAP
Liszki	3486	642
Zabierzów	5615	825
Wielka Wieś	2687	356
Zielonki	3758	512
Michałowice	2543	339
Kocmyrzów-Luborzycza	3239	509
Koniusza	1809	383
Igołomia-Wawrzeńczyce	1618	426
Niepołomice	5227	501
Biskupice	2277	315
Wieliczka	9669	1103
Świątynki Górne	1995	272
Mogilany	3251	445
Skawina	5325	1301
Czernichów	4802	1256

Źródło: Główny Urząd Nadzoru Budowlanego (2024).

Czujniki rejestrujące najwyższe wartości PM_{2,5} i wykazujące najsilniejsze wzorce emisji KRP nie znajdują się w „obwarzanku” otaczającym Kraków, ale są położone dalej na północ (gmina Jerzmanowice-Przeeginia) i na południe (gminy Sułkowice, Myślenice i Wiśniowa), co widać na rysunku 1. Podczas gdy zanieczyszczenia pochodzące z tych obszarów mogą mieć pewien wpływ na jakość powietrza w Krakowie, ważne jest, aby ponownie wziąć pod uwagę dominujące w regionie wiatry zachodnie. Wysiłki na rzecz poprawy jakości powietrza w Krakowie powinny priorytetowo traktować gminy położone bezpośrednio na zachód od miasta, w których nadal występuje wysoki odsetek kotłów na paliwo stałe, w szczególności Czernichów i Skawina. Gminy te prawdopodobnie mają większy wpływ na jakość powietrza w Krakowie i dlatego powinny być przedmiotem ukierunkowanych interwencji, które odpowiadają wynikom z poprzedniej sekcji.

Rysunek 10. Rozkład przestrzenny udziału urządzeń grzewczych na paliwo stałe w gminach wokół Krakowa



Źródło: opracowanie własne.

Związek z czynnikami ekonomicznymi

Wzory ogrzewania w gminach sąsiadujących z Krakowem są uwarunkowane zarówno czynnikami ekonomicznymi, jak i przestrzennymi, odzwierciedlając różnice w źródłach energii gospodarstw domowych i ich dystrybucji. Rysunek 11 pokazuje zależności związane z ogrzewaniem w kontekście ekonomicznym i przestrzennym. Tabela 2 wizualizuje związek między przychodami podatkowymi gminy a odsetkiem gospodarstw domowych korzystających z kotłów na paliwo stałe w gminach wokół Krakowa, a także trend, zgodnie z którym gminy o wyższych przychodach podatkowych wykazują niższy udział kotłów na paliwo stałe. Ten związek podkreśla różnice społeczno-ekonomiczne między gminami, co może stanowić podstawę ukierunkowanych interwencji publicznych w celu zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza. Rysunek 9 ilustruje odsetek gospodarstw korzystających z kotłów na paliwo stałe w gminach otaczających Kraków. Ta wizualizacja podkreśla dużą zmienność geograficzną źródeł ogrzewania i lokalizuje gminy o największym uzależnieniu od kotłów na paliwo stałe. Ta współzależność między warunkami ekonomicznymi

a zmiennością przestrzenną ma kluczowe znaczenie dla projektowania skutecznych i ukierunkowanych polityk mających na celu rozwiązanie problemu zanieczyszczenia powietrza i stanowi niezbędne tło dla bardziej dogłębnej analizy.

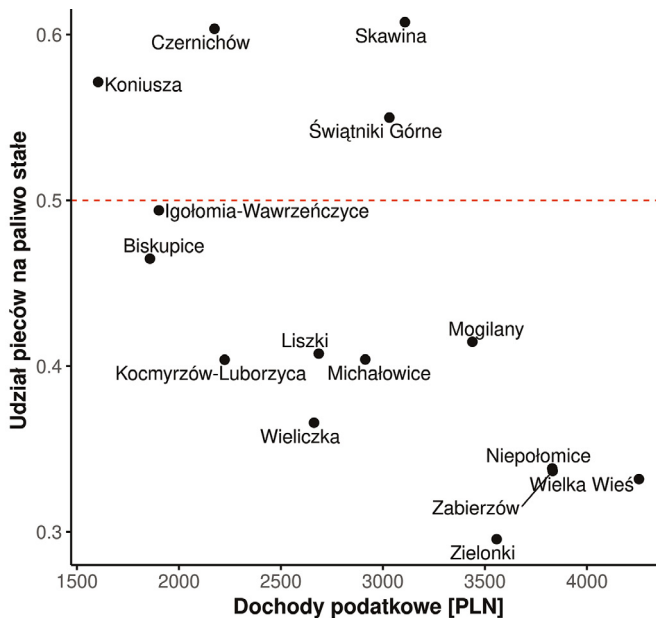
Tabela 2. Dochody podatkowe na mieszkańca gminy w 2022 r. (PLN)

Gmina	Dochody podatkowe na mieszkańca
Liszki	3486
Zabierzów	5615
Wielka Wieś	2687
Zielonki	3758
Michałowice	2543
Kocmyrzów-Luborzycza	3239
Koniusza	1809
Igołomia-Wawrzeńczyce	1618
Niepołomice	5227
Biskupice	2277
Wieliczka	9669
Świątniki Górne	1995
Mogilany	3251
Skawina	5325
Czernichów	4802

Źródło: Ministerstwo Finansów (2024).

W oparciu o rozkład przestrzenny i trendy ekonomiczne, gminy położone bezpośrednio na zachód od Krakowa, takie jak Czernichów i Skawina, powinny być traktowane priorytetowo w działaniach mających na celu zmniejszenie liczby kotłów na paliwo stałe. Obszary te charakteryzują się nie tylko wysokim udziałem takich urządzeń, ale także leżą na przeważającej ścieżce wiatrów zachodnich, co zwiększa ich potencjalny wpływ na jakość powietrza w Krakowie. Z kolei gminy o zwiększonym udziale kotłów na paliwo stałe, położone na wschód lub południe, takie jak Koniusza lub Świątniki Górne, są prawdopodobnie mniej krytyczne w warunkach wietrznych, ponieważ ich emisje mają mniejsze prawdopodobieństwo bezpośredniego wpływu na Kraków. Jednak wyniki te opierają się wyłącznie na danych dotyczących źródeł ogrzewania i dochodów podatkowych. Prawdziwe zrozumienie złożoności zanieczyszczenia powietrza wymaga bardziej zaawansowanych metod analizy danych. Aby skutecznie przekazać te ustalenia zarówno opinii publicznej, jak i decydentom, ważne jest wyjaśnienie problemu zanieczyszczenia powietrza przestrzennie i czasowo. Bez jasnej i przejrzystej komunikacji wysiłki na rzecz promowania zrównoważonego ogrzewania mogą napotkać znaczny opór.

Rysunek 11. Zależność wpływów podatkowych od udziału urządzeń grzewczych na paliwo stałe w gminach podkrakowskich



Źródło: opracowanie własne.

Identyfikacja obszarów o największym wpływie na stężenie PM_{2,5} w Krakowie

Ramy niniejszej publikacji nie pozwalają na wykroczenie poza przekazanie dowodów naukowych. Niemniej przedstawione informacje ewidentnie wskazują na związki pomiędzy liczbą i rodzajem źródeł ciepła, wartością stężenia pyłów zawieszonych oraz dochodem gmin. Na tej podstawie wskazano cztery grupy gmin, których specyfikę można określić jako podobną. Jest to jedynie przykład uszeregowania problemów, który może być pomocny przy opracowaniu interwencji publicznej.

Tabela 3. Podział gmin w oparciu o dochody i udział kotłów na paliwo stałe

Gminy o niskich dochodach z dużym udziałem kotłów na paliwo stałe	Gminy o przeciętnych dochodach z dużym udziałem kotłów na paliwo stałe	Gminy o przeciętnych dochodach i z przeciętnym udziałem kotłów na paliwo stałe	Gminy o niskich dochodach i z wysokim udziałem kotłów na paliwo stałe
Czernichów, Koniusza, Igołomia-Wawrzeńczyce, Biskupice	Skawina, Świętniki Górne	Liszki, Kocmyrzów-Luborzycza, Michałowice, Wieliczka, Mogilany	Niepołomice, Zabierzów, Wielka Wieś, Zielonki

Źródło: opracowanie własne.

Wnioski

Przeprowadzona w tekście analiza dowodzi, że trzy źródła informacji – dane z czujników Airly, dane z CEEB oraz dane o dochodach – pozwalają na precyzyjne określenie nie tylko źródeł zanieczyszczeń powietrza, ale także rekomendowanych obszarów interwencji. Integracja tych źródeł danych, a także wiedzy na temat uwarunkowań geograficznych (położenie miasta w dolinie Wisły, dominacja wiatrów zachodnich) pozwala na opracowanie polityki opartej na dowodach. Warunkiem zastosowania tej polityki jest wdrożenie odpowiedniej procedury metodologicznej. Opisane w publikacji tendencje wskazujące na stosowanie KRP (starych pieców) oraz KAP (nowych pieców) może pomóc w opracowaniu nowej strategii wsparcia. W tym przypadku warto szczególnie zwrócić uwagę na dane o dochodach, które pokazują, że dotychczasowe programy mogą wymagać pewnej modyfikacji, poprzez zniuansowanie metod wsparcia.

Z przeprowadzonej analizy wynikają trzy główne wnioski. Pierwszy z nich wskazuje na nierozzerwalny związek czynników środowiskowych z przepływem zanieczyszczonego powietrza nad Kraków. Wyróżnienie dwóch wzorców urządzeń pozwala oszacować precyzyjnie czas wystąpienia podwyższonego stężenia pyłów zawieszonych.

Drugi obszar analizy ukazuje relacje pomiędzy liczbą i rodzajem źródeł ogrzewania a jakością powietrza. Większa liczba kotłów na paliwo stałe przekłada się bezpośrednio na większą emisyjność. Po uwzględnieniu czynników opisanych w pierwszej części analizy sporządzono podział na klastry, który obrazuje trendy i złożoność problemu.

Trzecie pole analizy wskazuje na związek pomiędzy zamożnością gmin a odsetkiem źródeł ciepła na paliwo stałe. Ten typ relacji pozwala na sformułowanie rekomendacji dotyczących modelu wspierania mieszkańców w zakresie wymiany źródeł ciepła, a także termomodernizacji. Model ten powinien uwzględniać długofalowe wsparcie, pomoc natomiast należy oprzeć o precyzyjne informacje nie tylko w zakresie czynników środowiskowych, ale także społecznych, w tym związanych z sytuacją finansową mieszkańców. Trudno bowiem przekonać mieszkańców do zmiany źródła ogrzewania na mniej emisyjne wobec perspektywy większych rachunków za ogrzewanie, przerastających możliwości części gospodarstw domowych.

Aby wdrożyć politykę publiczną opartą na dowodach, należy przekonać do niej decydentów. Jeśli chodzi o aktorów polityki krajowej, regionalnej i lokalnej, to podstawowy problem dotyczy źródeł dowodów naukowych. To nie tylko kwestia decyzji, w jakim stopniu dowody te powinny wpływać na politykę publiczną, ale przede wszystkim zakresu wiedzy, który ma być podstawą decyzji. To jest rola badaczy. W celu zwiększenia szansy na wykorzystanie dowodów naukowych w polityce

poprawy jakości powietrza w Krakowie rekomenduje się dostosowanie przekazu do formy, która jest zrozumiała i może służyć jako argument w podejmowaniu decyzji, ale także w procesie przekonywania opinii publicznej. Dostarczone w publikacji dowody mogą być przydatne w tym procesie.

Oświadczenie o wkładzie poszczególnych autorów

Wszyscy wymienieni autorzy wnieśli znaczący, bezpośredni i intelektualny wkład w artykuł i zatwierdzili go do publikacji.

Oświadczenie o konflikcie interesów

Autorzy deklarują, że badanie zostało przeprowadzone przy braku jakichkolwiek powiązań komercyjnych lub finansowych, które można by zinterpretować jako potencjalny konflikt interesów.

Oświadczenie o etyce badawczej

Autorzy poświadczają, że opublikowane w tekście badania zostały przeprowadzone zgodnie z etyką badawczą afiliowanej uczelni.

Bibliografia

- Air Quality in Europe. (2023). *Europe's Air Quality Status 2025*, European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024> (dostęp: 22.02.2026).
- Airly.org, <https://airly.org> (dostęp: 22.02.2026).
- Apley, D.W., Zhu, J. (2020). Visualizing the Effects of Predictor Variables in Black Box Supervised Learning Models, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 82(4): 1059–1086, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.08468>.
- Bank Światowy (2019). *Air Quality in Poland: What Are the Issues and What Can Be Done?*, <https://documents1.worldbank.org/curated/ar/426051575639438457/pdf/Air-Quality-in-Poland-What-are-the-Issues-and-What-can-be-Done.pdf> (dostęp: 22.02.2026).
- Baron, J. (2018). A Brief History of Evidence-Based Policy, *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 678(1): 40–50, <https://doi.org/10.1177/0002716218770642>.
- Bellamy, J.L., Bledsoe, S.E., Traube, D.E. (2006). The Current State of Evidence-Based Practice in Social Work: A Review of the Literature and Qualitative Analysis of Expert Interviews, *Journal of Evidence-Based Social Work*, 3: 23–48.
- Bokwa, A. (2019). Rozwój badań nad klimatem lokalnym Krakowa, *Acta Geographica Lodzienia*, 108: 7–20, <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/1>.

- Bryson, J.M. (2004). *Strategic Planning for Public and Nonprofit Organizations: A Guide to Strengthening and Sustaining Organizational Achievement*. San Francisco: Jossey-Bass.
- Buskist, W., Groccia, J.E. (2011). Evidence-Based Teaching: Now and in the Future, *New Directions for Teaching and Learning*, 128: 105–111.
- Cabinet Office (1999). *White Paper Modernising Government*.
- Cairney, P. (2016). *The Politics of Evidence-Based Policymaking*. London: Palgrave Macmillan, <https://doi.org/10.1057/978-1-137-51781-4>.
- Cairney, P. (2022). The Myth of ‘Evidence-Based Policymaking’ in a Decentred State, *Public Policy and Administration*, 37(1): 46–66, <https://doi.org/10.1177/0952076720905016>.
- Cambridge Dictionary (2025). *Politics, Political, Politician or Policy*, <https://dictionary.cambridge.org/grammar/british-grammar/politics-political-politician-or-policy> (dostęp: 22.02.2026).
- Chau, T.-T., Wang, K.-Y. (2020). An Association Between Air Pollution and Daily Most Frequently Visits of Eighteen Outpatient Diseases in an Industrial City, *Scientific Reports*, 10: 4100, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58721-0>.
- Cochrane, A.L. (1972). *Effectiveness and Efficiency: Random Reflections on Health Services*. London: Nuffield Provincial Hospitals Trust.
- Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Forouzanfar, M.H. (2017). Estimates and 25-Year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015, *The Lancet*, 389(10082): 1907–1918, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6).
- Danek, T., Węglińska, E., Zaręba, M. (2022). The Influence of Meteorological Factors and Terrain on Air Pollution Concentration and Migration: A Geostatistical Case Study from Krakow, Poland, *Scientific Reports*, 12: 11050, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15160-3>.
- Davies, H.T.O., Nutley, S.M., Smith, P.C. (Eds.). (2009). *What Works? Evidence-Based Policy and Practice in Public Services*. Bristol: The Policy Press.
- Feinstein, A.R. (1967). *Clinical Judgment*. Baltimore: Williams and Wilkins.
- Flyvbjerg, B. (2001). *Making Social Science Matter: Why Social Inquiry Fails and How it Can Succeed Again*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Friedman, J.H., Popescu, B.E. (2008). Predictive Learning Via Rule Ensembles, *The Annals of Applied Statistics*, 2(3): 916–954, <https://doi.org/10.1214/07-AOAS148>.
- Geodecki, T., Gorzelak, G., Górniak, J., Hausner, J., Mazur, S., Szlachta, J., Zalewski, J. (2012). *Kurs na innowacje. Jak wyprowadzić Polskę z rozwojowego dryfu?* Warszawa: Fundacja Gospodarki i Administracji Publicznej.
- GIOŚ. (2023). *Jakość powietrza w Polsce w roku 2022 w świetle wyników pomiarów prowadzonych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska*. Warszawa: Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.
- Górniak, J., Keler, K. (2008). Ewaluacja i wskaźniki w cyklu planowania i realizacji polityk publicznych, *Journal of Public Governance*, 3(1): 109–124.
- Górniak, J., Mazur, S. (red.). (2011). *W kierunku polityki rynku pracy opartej na dowodach*. Warszawa: Pracodawcy RP.

- Górniak, J., Mazur, S. (2012). *Zarządzanie strategiczne rozwojem*. Warszawa: Ministerstwo Rozwoju Regionalnego.
- Hanigan, I.C., Rolfe, M.I., Knibbs, L.D., Salimi, F., Cowie, C.T., Heyworth, J., ..., Bauman, A. (2019). All-Cause Mortality and Long-Term Exposure to Low Level Air Pollution in the '45 and Up Study' Cohort, Sydney, Australia, 2006–2015, *Environment International*, 126: 762–770, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.038>.
- Hammersley, M. (2005). Is the Evidence-Based Practice Movement Doing More Good than Harm? Reflections on Iain Chalmers' Case for Research-Based Policy Making and Practice, *Evidence and Policy*, 1(1): 85–100.
- Hoffman, T., Bennett, S., Del Mar, C. (2013). *Evidence-Based Practice: Across the Health Professions* (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Hrehorowicz-Gaber, H. (2015). Role of Green Areas for Space Integration of Krakow's Metropolitan Area, *Bulletin of Geography. Socio-Economic Series*, 29: 69–76, <https://doi.org/10.1515/bog-2015-0016>.
- Jendritzky, G., Maarouf, A., Staiger, H. (2001). *Looking for a Universal Thermal Climate Index UTCI for Outdoor Applications*, International Society of Biometeorology, https://utci.org/resources/develop_utci.pdf (dostęp: 22.02.2026).
- Jędruskiewicz, J., Czernecki, B., Marosz, M. (2017). The Variability of PM10 and PM2.5 Concentrations in Selected Polish Agglomerations: The Role of Meteorological Conditions, 2006–2016, *International Journal of Environmental Health Research*, 27: 441–462.
- Kepes, S., Bennet, A., McDaniel, M. (2014). Evidence-Based Management and the Trustworthiness of Our Cumulative Scientific Knowledge, *Academy of Management Learning & Education*, 13: 446–466, <https://doi.org/10.5465/amle.2013.0193>.
- Kleczkowski, P. (2019). *Smog in Poland: Causes, Effects, Prevention*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Mathison, S. (red.). (2004). *Encyclopedia of Evaluation*. Thousand Oaks: Sage.
- Mears, D.P., Barnes, J.C. (2010). Toward a Systematic Foundation for Identifying Evidence-Based Criminal Justice Sanctions and Their Relative Effectiveness, *Journal of Criminal Justice*, 38(4): 702–710, <https://doi.org/10.1016/j.jcrimjus.2010.04.007>.
- Miasto Kraków (2010). *Program Ograniczania Niskiej Emisji w Krakowie*, https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=30445&lid=90154404&vReg=2 (dostęp: 22.02.2026).
- Miasto Kraków (2023). *Uchwała nr CIV/2833/23 Rady Miasta Kraków z dnia 25 stycznia 2023 r.*, https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=167&sub_dok_id=167&sub=uchwała&query=id%3D26938%26typ%3Du (dostęp: 22.02.2026).
- Milewska, A., Parlińska, A. (2021). Ekonomiczno-prawne uwarunkowania gospodarki nisko-emisyjnej w samorządach terytorialnych – wybrane aspekty, *Studia Iuridica*, 254: 239–256, <https://doi.org/10.31338/2544-3135.si.2022-89.12>.
- Ministerstwo Finansów (2024). *Informacje o dochodach podatkowych na 1 mieszkańca gminy (w PLN) za rok 2022*, <https://www.gov.pl/web/finanse/wskazniki-dochodow-podatkowych-gmin-powiatow-i-wojewodztw-na-2024-r> (dostęp: 22.02.2026).

- Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2024). *Program Czyste Powietrze*, <https://czystepowietrze.gov.pl/wez-dofinansowanie/dokumenty-programowe/dokumenty-obowiazujace> (dostęp: 22.02.2026).
- Moldoveanu, M.C., Baum, J.C. (2005). Contemporary Debates in Organizational Epistemology. W: *The Blackwell companion to organizations* (733–751), J.C. Baum (Ed.). London: Blackwell Publishing.
- Molnar, C., Bischl, B., Casalicchio, G. (2018). Interpretable Machine Learning (Version 3) [Software], *Journal of Open Source Software*, 3(26): 786, <https://doi.org/10.21105/joss.00786>.
- Morawska-Horawska, M., Lewik, P. (2003). Wpływ wysokości i ukształtowania terenu na zróżnicowanie warunków meteorologicznych w Krakowie. W: *Dynamika zmian środowiska geograficznego pod wpływem antropopresji* (85–94), J. Lach (red.). Kraków: Instytut Geografii Akademii Pedagogicznej w Krakowie.
- Muers, S. (2020). *Culture and Values at the Heart of Policy Making: An Insider's Guide*. Bristol: Bristol University Press, <https://doi.org/10.2307/j.ctv13gvj0f>.
- Ośródką, L., Godłowska, J., Hajto, M., Rozwoda, W., Wojtylak, M. (2010). *Determining the Anemological Conditions for the Area of Kraków*. KHK SA.
- Pfeffer, J., Sutton, R.I. (2006). Profiting from Evidence-Based Management, *Strategy & Leadership*, 34(2): 35–42, <https://doi.org/10.1108/10878570610652617>.
- Rajagopalan, S., Al-Kindi, S.G., Brook, R.D. (2018). Air Pollution and Cardiovascular Disease, *Journal of the American College of Cardiology*, 72(17): 2054–2070, <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.07.099>.
- Rousseau, D.M. (2006). Is There Such a Thing as “Evidence-Based Management”?, *Academy of Management Review*, 31(2): 256–269, <https://doi.org/10.2307/20159200>.
- Rousseau, D.M., McCarthy, S. (2007). Educating Managers from an Evidence-Based Perspective, *Academy of Management Learning and Education*, 6: 84–101, <https://doi.org/10.5465/amle.2007.24401705>.
- Sackett, D.L., Rosenberg, W.M.C., Gray, J.A.M., Haynes, R.B., Richardson, W.S. (1996). Evidence Based Medicine: What it is and What it isn't, *BMJ*, 312: 71–73, <https://doi.org/10.1136/bmj.312.7023.71>.
- Sejm RP (2020). *Ustawa z dnia 28 października 2020 r.*, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20200002127> (dostęp: 22.02.2026).
- Sejm RP (2023). *Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20230000742> (dostęp: 22.02.2026).
- Shapiro, D.L., Kirkman, B.L., Courtney, H.G. (2007). Perceived Causes and Solutions of the Translation Problem in Management Research, *Academy of Management Journal*, 50(2): 249–266, <https://doi.org/10.5465/AMJ.2007.24634433>.
- Sutcliffe, S., Court, J. (2005). *Evidence-Based Policymaking: What is it? How Does it Work? What Relevance for Developing Countries?* London: Overseas Development Institute.
- Stevens, A. (2020). Governments Cannot Just ‘Follow the Science’ on COVID-19, *Nature Human Behaviour*, 4(6): 560, <https://doi.org/10.1038/s41562-020-0894-x>.

- Strobl, C., Boulesteix, A., Kneib, T., Augustin, T., Zeileis, A. (2008). Conditional Variable Importance for Random Forests, *BMC Bioinformatics*, 9: 307, <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-307>.
- Sullivan, H. (2011). ‘Truth’ Junkies: Using Evaluation in UK Public Policy, *Policy & Politics*, 39(4): 499–512.
- Traczyk, P., Gruszecka-Kosowska, A. (2020). The Condition of Air Pollution in Kraków, Poland, in 2005–2020, with Health Risk Assessment, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17): 6063, <https://doi.org/10.3390/ijerph17176063>.
- Tsyro, S. (2005). To What Extent Can Aerosol Water Explain the Discrepancy Between Model Calculated and Gravimetric PM10 and PM2.5?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5: 515–532, <https://doi.org/10.5194/acp-5-515-2005>.
- UMWM (2016). *Uchwała Nr XVIII/243/16 Sejmiku WM z 15.01.2016 r.*, <https://bip.malopolska.pl/umwm/Article/get/id,1159347.html> (dostęp: 22.02.2026).
- UMWM (2017). *Uchwała Nr XXXII/452/17 Sejmiku WM z 22.01.2017 r.*, <https://bip.malopolska.pl/umwm,a,1283900,uchwala-nr-xxxii45217-sejmiku-województwa-malopolskiego-z-dnia-23-stycznia-2017-r-w-sprawie-wprowadze.html> (dostęp: 22.02.2026).
- Zippenfenig, P. (2023). Open-Meteo.com Weather API [Computer software], *Zenodo*, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7970649>.

