

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
Instytut Inżynierii Środowiska

mgr inż. Ewa Władysława Anioł

**WPLYW ZANIECZYSZCZEŃ  
POWIETRZA  
I WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH  
NA WIDZIALNOŚĆ POZIOMĄ W POLSCE**

Impact of air pollution and meteorological conditions  
on visibility in Poland

Praca doktorska  
Doctoral thesis

Praca wykonana pod kierunkiem:  
dr hab. inż. Grzegorza Majewskiego, prof. SGGW  
Instytut Inżynierii Środowiska  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Promotor pomocniczy:  
dr Dorota Kula  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Warszawa, rok 2023

## Streszczenie

### **Wpływ zanieczyszczeń powietrza i warunków meteorologicznych na widzialność poziomą w Polsce**

W pracy zbadano związek zanieczyszczeń powietrza ( $PM_{10}$ ,  $NO_2$  oraz  $SO_2$ ) oraz parametrów meteorologicznych (temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza, prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne oraz opad atmosferyczny) na widzialność poziomą w siedmiu lokalizacjach w południowej i wschodniej części Polski: Białymstoku, Kielcach, Warszawie, Katowicach, Lublinie, Krakowie oraz Zakopanym w latach 2010 – 2019. Zakres pracy obejmował analizę literatury przedmiotu, szczegółowe rozpoznanie warunków lokalnych i topograficznych w obrębie stacji wraz z dodatkowymi czynnikami oraz wykonanie analiz statystycznych. Za pomocą analizy korelacji sprawdzono, czy istnieje zależność pomiędzy widzialnością a stężeniem zanieczyszczeń powietrza i parametrami meteorologicznymi. Wyznaczono statystycznie istotną korelację między widzialnością a  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  i  $SO_2$ , wskazując na zanieczyszczenia powietrza jako najważniejsze czynniki mające wpływ na widzialność we wszystkich badanych lokalizacjach. Dodatkowo, wyniki analizy korelacji potwierdziły wpływ sezonowości na zasięg widzialności. Zależności pomiędzy zanieczyszczeniami powietrza, parametrami meteorologicznymi a widzialnością są zdecydowanie silniejsze w sezonie zimowym – grzewczym. Najmocniej skorelowane z widzialnością parametry meteorologiczne to wilgotność względna powietrza i temperatura powietrza. Analiza statystyczna wykazała zależność pomiędzy ciśnieniem atmosferycznym a widzialnością, jednak związek jest na tyle słaby, że trudno jednoznacznie określić wpływ ciśnienia atmosferycznego na widzialność. Analiza korelacji dowiodła, że oprócz zanieczyszczeń powietrza, parametry meteorologiczne są czynnikami, które determinują widzialność. Opracowane modele regresji wyjaśniały nawet 73% zmienności widzialności; najlepszy model uzyskano dla Katowic, a najslabszy dla Zakopanego – 41%. Największy wpływ na widzialność ma stężenie  $PM_{10}$ , temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza, prędkość wiatru i ciśnienie atmosferyczne. Analiza skupień, potwierdziła różnice w kształtowaniu widzialności, w obrębie badanych stacji. Problem niskiej widzialności jest bardziej złożony i oprócz stężeń zanieczyszczeń kluczową rolę pełnią parametry meteorologiczne, które w ciągu roku ulegają zmianie. Analiza skupień metodą k – średnich, przeprowadzona na potrzebę niniejszej rozprawy doktorskiej, w sposób

wnikliwy przedstawiła współzależności pomiędzy widzialnością, a zanieczyszczeniami powietrza i parametrami meteorologicznymi w wybranych miastach, oraz pozwoliła zidentyfikować specyficzne warunki kształtujące widzialność. Na podstawie wyników analizy modelowania algorytmu lasu losowego stwierdzono, że największy wpływ (najwyższą wagą) na widzialność w Polsce, bez względu na jej zakres, wykazuje wilgotność względną powietrza. W analizie lasów losowych najważniejszymi zmiennymi wpływającymi na widzialność są: wilgotność względną powietrza, temperatura powietrza oraz stężenia zanieczyszczeń powietrza. Na wstępie dostrzec można dwie tendencje. |Przy widzialności do 10 kilometrów, tuż za wilgotnością względną powietrza, w rankingu wagności zmiennych występuje głównie PM<sub>10</sub>, kolejno NO<sub>2</sub> lub SO<sub>2</sub>, a wraz ze wzrostem zasięgu widzialności powyżej 10 kilometrów parametry meteorologiczne zyskują na znaczeniu. Analiza składu chemicznego pyłu PM<sub>1</sub>, pozwoliła stwierdzić, że stężenia masowe pierwiastków śladowych są zdecydowanie wyższe w Zabrzu aniżeli w Warszawie. Główną przyczyną takiej sytuacji w Zabrzu jest wiodące wykorzystanie paliw kopalnych w domowych kotłach. Dodatkowo w Zabrzu, wyraźniej widać wpływ sezonowości na stężenia masowe pierwiastków i widzialność. W Warszawie stężenia masowe pierwiastków były zdecydowanie niższe (nie występowały znaczne różnice ze względu na podział danych na sezony) w porównaniu do Zabrze. Graficzna analiza sieci współzależności wykazała, że z widzialnością w Warszawie najmocniej skorelowane są parametry meteorologiczne takie jak: temperatura powietrza, wilgotność względną powietrza, prędkość wiatru oraz sezon. W Zabrzu siły związku pomiędzy zmiennymi są zdecydowanie większe niż w Warszawie. Na podstawie analizy sieci przygotowanej dla Zabrze stwierdzono, że na widzialność większy wpływ mają toksyczne pierwiastki śladowe takie jak Pb, Cd i Zn i Cu w przeciwieństwie do Warszawy, gdzie warunki meteorologiczne w głównej mierze kształtują widzialność a stężenia toksycznych pierwiastków kumulujących się w organizmie są zdecydowanie niższe.

Pomiary widzialności wykonywane są rutynowo w wielu miastach na świecie, co powoduje, że otrzymanie dużej, kompletnej bazy danych dla tychże miast jest łatwo osiągalne. Otrzymane w pracy doktorskiej wyniki badań uzupełniają istniejące na świecie prace badawcze i stanowią wartość dodaną w światowy dorobek w zakresie badań nad widzialnością.

## **Abstract**

### **Impact of air pollution and meteorological conditions on visibility in Poland**

This paper examines the effects of air pollutants (PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>) and meteorological parameters (air temperature, relative humidity, wind speed, atmospheric pressure and precipitation) on horizontal visibility in seven locations in the southern and eastern parts of Poland: Białystok, Kielce, Warsaw, Katowice, Lublin, Cracow and Zakopane in 2010 – 2019. The scope of the work included an analysis of the literature on the subject, a detailed identification of local and topographic conditions within the stations along with additional factors as well as performing statistical analyses. Using correlation analysis, it was checked, whether there is a relationship between visibility and the concentration of air pollutants and meteorological parameters. A statistically significant correlation was determined between visibility and PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>, pointing to air pollutants as the most important factors affecting visibility at all locations studied. In addition, the results of the correlation analysis confirmed the influence of seasonality on visibility range. Relationships between air pollutants, meteorological parameters and visibility are significantly stronger during the winter – heating season. The meteorological parameters most strongly correlated with visibility are relative humidity and air temperature. Statistical analysis showed a correlation between atmospheric pressure and visibility, but the relationship is so weak that it is difficult to clearly determine the effect of atmospheric pressure on visibility. Correlation analysis proved that, in addition to air pollution, meteorological parameters are factors that determine visibility. The regression models developed explained up to 73% of the variation in visibility; the best model was obtained for Katowice, and the weakest for Zakopane – 41%. The biggest influence on visibility is PM<sub>10</sub> concentration, air temperature, relative humidity, wind speed and atmospheric pressure. Cluster analysis, confirmed the differences in the formation of visibility, within the studied stations. The problem of low visibility is more complex, and in addition to pollutant concentrations, meteorological parameters play a key role, which change over the course of the year. A cluster analysis using the k-means method, conducted for the purpose of this dissertation, thoroughly presented the interdependencies between visibility and air pollution and meteorological parameters in selected cities, and allowed to identify specific conditions shaping visibility. Based on the results of the random forest algorithm modeling analysis, it was found that the greatest influence (highest validity) on visibility in Poland, regardless of its extent, is shown by relative humidity. In the analysis

of random forests, the most important variables affecting visibility are relative humidity, air temperature and air pollutant concentrations. At the outset, two trends can be discerned. At visibility up to 10 kilometers, just behind relative humidity, the ranking of importance of variables is mainly PM<sub>10</sub>, followed by NO<sub>2</sub> or SO<sub>2</sub>, and as the visibility range increases beyond 10 kilometers, meteorological parameters gain in importance. Analysis of the chemical composition of PM<sub>1</sub>, allowed us to conclude that the mass concentrations of trace elements are significantly higher in Zabrze than in Warsaw. The main reason for this situation in Zabrze is the leading use of fossil fuels in domestic boilers. In addition, in Zabrze, the effect of seasonality on element mass concentrations and visibility is more pronounced. In Warsaw, the mass concentrations of elements were significantly lower (there were no significant differences due to the division of the data into seasons) compared to Zabrze. Graphical analysis of the correlation network showed that meteorological parameters such as air temperature, relative humidity, wind speed and season were most strongly correlated with visibility in Warsaw. In Zabrze, the strengths of the relationship between the variables are significantly higher than in Warsaw. Based on the analysis of the network prepared for Zabrze, it was found that visibility is more influenced by toxic trace elements such as Pb, Cd and Zn and Cu in contrast to Warsaw, where meteorological conditions mainly shape visibility and concentrations of toxic elements accumulating in the body are significantly lower.

Visibility measurements are performed routinely in many cities around the world, which makes obtaining a large, complete database for these cities easily achievable. The research results obtained in the dissertation complement existing research work in the world and add value to the global body of work in visibility research..