

URBÁNNO-RURÁLNA DIFERENCIÁCIA KONCENTRÁCIÍ PM₁₀ NA SLOVENSKU: PRIESTOROVO-ČASOVÁ A SEZÓNNA DYNAMIKA ZALOŽENÁ NA IDW INTERPOLÁCII

Jakub Cimbala¹, Bohuslava Hrončeková Gregorová², Pavel Hronček²

1 Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre, Fakulta prírodných vied a informatiky, Katedra ekológie a environmentalistiky, e-mail: jakub.cimbala@ukf.sk

2 Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Fakulta prírodných vied, Katedra geografie a geológie, e-mail: bohuslava.gregorova@umb.sk, pavel.hroncek@umb.sk

Abstract: This study analyses urban-rural differences in PM₁₀ concentrations in Slovakia by spatio-temporal analysis using the inverse distance weighting (IDW) method. Data from 20 SHMI monitoring stations (2016–2022) confirm significant differences: annual mean concentrations in urban stations (24.78 µg/m³) significantly exceeded those in rural areas (16.78 µg/m³), with maximum winter values reaching up to 35.32 µg/m³ in urban traffic locations. Key findings indicate (1) significant seasonal variability with 69% higher concentrations in urban areas during winter, (2) a two-day maximum in peak traffic hours (28.53 µg/m³ versus 17.28 µg/m³ in rural areas), and (3) spatial hotspots in industrial areas. Methodologically, the study highlights the limits of IDW in areas with sparse station networks (e.g., rural regions) and suggests a combination with other geostatistical methods. The results have implications for regional environmental policies, in particular the optimization of the monitoring network and targeted emission reduction measures in urbanized areas.

Keywords: PM₁₀, urban-rural differences, IDW interpolation, spatial analysis, Slovakia

1 ÚVOD

Aplikácia modelovania inverzného váženého vzdialenosti (IDW) v rámci geografických informačných systémov (GIS) sa ukázala ako kľúčová technika hodnotenia úrovni znečistenia ovzdušia v rôznych prostrediach. IDW funguje na princípe, že bližšie monitorovacie stanice majú väčší vplyv na odhadované hodnoty na nemonitorovaných miestach, čím uľahčujú interpoláciu údajov o kvalite ovzdušia v priestorovo zložitejších mestských aglomeráciách (Mesnard, 2013; Kumar et al., 2024). Odhalenie zdrojov znečistenia ovzdušia a pochopenie metodológie zberu údajov je

klúčové pre efektívne využitie IDW v environmentálnych štúdiách. Rôzne znečisťujúce látky pochádzajú z priemyselných emisií, výfukových plynov z vozidiel a iných antropogénnych činností, čo si vyžaduje komplexné stratégie zberu údajov na presné zachytenie ich priestorového rozloženia. Znečistenie ovzdušia patrí medzi najvýznamnejšie a najdôležitejšie environmentálne problémy súčasnosti (WHO, 2021; EEA, 2023). Prachové častice predstavujú jednu z hlavných zložiek tohto znečistenia. Znečisťujúca látka je akákoľvek látka, ktorá mení normálne zloženie ovzdušia (Chlebovska-Stys et al., 2017). Prachové častice (Particulate Matter – PM) sú druhom látky znečisťujúcej ovzdušie pozostávajúce z pevných alebo kvapalných častíc suspendovaných v atmosfére (Tornevi, 2022; Zeb et al., 2024). Prachové častice pochádzajú hlavne z antropogénnych zdrojov ako je spaľovanie palív, z ropných rafinérií, automobilovej dopravy, energetiky, priemyslu, spaľovania uhlia a biomasy, vykurovania domácností a poľnohospodárstva. Tieto častice pochádzajú aj z prírodných zdrojov, príkladom je veterný prach, morská soľ, sopečné emisie, erózia pôdy či lesné požiare (Zeb et al., 2024). Najviac pozornosti sa venuje frakciám PM₁₀ (častice s aerodynamickým priemerom do 10 µm) (Zeb et al., 2024; Kirešová a Guzan, 2022), keďže ich veľkosť im umožňuje prenikať do respiračného systému človeka a spôsobovať vážne zdravotné komplikácie (môžu sa dostať až do krvného obehu), ktoré sú spojené s kardiovaskulárnymi ochoreniami.

Cieľom našej štúdie je analyzovať priestorové a časové rozloženie koncentrácií prachových častíc PM₁₀ v rámci územia Slovenskej republiky, pričom dôraz bude kladený na ich variabilitu v rôznych časových mierkach (hodiny, mesiace, ročné obdobia). Na základe dostupných dát z meracích staníc sa tieto hodnoty znázornia prostredníctvom geografických informačných systémov (GIS). Interpolácia hodnôt bude realizovaná metódou inverzného váženého priemeru (IDW – Inverse Distance Weighting) s primárnym cieľom kvantifikovať variabilitu koncentrácií PM₁₀ v závislosti od typu prostredia, sezónnych zmien a denných cyklov. Hlavným prínosom práce je vizuálna interpretácia údajov, ktorá môže byť využitá pre efektívnejšie plánovanie opatrení na znižovanie znečistenia vo všeobecnosti a zvýšenie povedomia o dopadoch PM₁₀ na zdravie a životné prostredie, ako aj prijímanie opatrení na zlepšenie kvality ovzdušia.

2 VPLYV ZNEČISTENIA NA ZDRAVIE

Škodlivý vplyv prachových častíc PM₁₀ na zdravie je doložený početnými štúdiami. Dlhodobá expozícia je spojená s vyšším výskytom kardiovaskulárnych a respiračných ochorení, predčasnou úmrtnosťou a zníženou kvalitou života. Podľa Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO, 2020) znečistenie ovzdušia spôsobuje ročne 8,9 milióna predčasných úmrtí, pričom PM₁₀ je jedným z kľúčových faktorov. Výskum Lu et al. (2015) potvrdil, že zvýšenie koncentrácie PM₁₀ o 10 µg/m³ vedie k nárastu rizika úmrtnosti o 23 – 67 %. Tieto negatívne účinky sú výraznejšie u detí, seniorov a osôb s chronickými ochoreniami (Khafaie et al., 2016). Respiračný systém je obzvlášť náchylný na PM₁₀, keďže častice prenikajú do dýchacích ciest a spô-

sobujú zápal, exacerbáciu astmy a chronickú obštrukčnú chorobu pľúc (COPD) (Horne et al., 2018; Yang et al., 2017). Kardiovaskulárne účinky zahŕňajú zvýšené riziko infarktu myokardu, arytmií a cievnych ochorení, a to aj pri krátkodobej expozícii (Chin, 2014; Kuźma et al., 2020). Výskumy taktiež upozorňujú aj na negatívne ekonomické dopady: náklady na liečbu chorôb spojených so znečistením ovzdušia predstavujú v EÚ cca 4 % HDP ročne (EEA, 2020). Okrem toho PM₁₀ zhoršuje kvalitu pôdy a vody, čím nepriamo ohrozuje potravinové zdroje a biodiverzitu (Zeb et al., 2024). Prevencia vyžaduje komplexný prístup vrátane redukcie emisií z dopravy, priemyslu a domáчих kúrenísk, ako aj zvýšenie povedomia o zdravotných rizikách (Andradottir a Thorsteinsson, 2019; Anderson et al., 2012).

3 SÚČASNÝ STAV SKÚMANEJ PROBLEMATIKY

Vizuálna interpretácia znečistenia ovzdušia pomocou geografických informačných systémov (GIS) sa stala kľúčovým nástrojom na analýzu a prezentáciu environmentálnych dát. GIS a metóda interpolácie inverzným vážením vzdialeností (IDW) sa v posledných desaťročiach stali kľúčovými nástrojmi pre analýzu kvality ovzdušia. IDW je založená na princípe, že hodnoty v nemonitorovaných bodoch sú ovplyvnené najbližšími meracími stanicami, pričom váha vplyvu klesá s rastúcou vzdialenosťou (Li a Heap, 2014; Jumaah et al., 2019; Zareba et al., 2025). Táto metóda je obľúbená pre svoju jednoduchosť, rýchlosť a schopnosť generovať priestorovo explicitné mapy znečistenia (Jerrett et al., 2013; Shukla et al., 2020; Chong a Choi, 2022). V posledných rokoch bolo publikovaných niekoľko štúdií, ktoré aplikovali IDW na mapovanie rôznych znečisťujúcich látok v ovzduší (Losser et al., 2014; Zheng a Shen, 2015; Nguyen et al., 2020; Masroor et al., 2020; Kamboj et al., 2022; Chong a Choi, 2022; Keshtkar et al., 2022; Lotrecchiano et al., 2023; Ibáñez et al., 2024; Abdulkareem et al., 2025).

V našej štúdii sme zvolili metódu IDW predovšetkým kvôli jej transparentnosti a nízkej výpočtovej náročnosti. Na rozdiel od Krigingu, ktorý vyžaduje štatistický model priestorovej závislosti, IDW umožňuje relatívne jednoduchú interpoláciu bez potreby komplexnej štatistickej analýzy (Lu a Wong, 2008). Kriging síce poskytuje presnejšie odhady v oblastiach so zložitou priestorovou variabilitou, ale je citlivý na chýbajúce údaje a vyžaduje odborný výber vhodného modelu, napríklad semivariogramu. V našom prípade by použitie Krigingu zvýšilo komplexnosť analýzy bez výrazného prínosu, pretože monitorovacia sieť SHMÚ má relatívne homogénne rozloženie staníc. Hlavné obmedzenie IDW, ktorým je ignorovanie fyzikálnych procesov ovplyvňujúcich rozptyl znečistenia (ako napríklad vplyv vetra alebo topografie), sme kompenzovali podrobnou analýzou sezónnych trendov a denných variácií koncentrácií.

Metóda IDW predstavuje optimálny nástroj pre prvotnú vizualizáciu priestorového rozloženia znečistenia ovzdušia. Jej hlavné výhody spočívajú v jednoduche implementácie a schopnosti poskytnúť rýchle výsledky. Pre hĺbkovú analýzu a presnejšie modelovanie však odporúčame kombináciu IDW s pokročilejšími geoštatistic-

kými metódami, ako je napríklad Universal Kriging, ktorý dokáže lepšie zohľadniť priestorovú štruktúru dát a vonkajšie vplyvy. Tento prístup by umožnil dosiahnuť vyššiu presnosť interpolácie, najmä v oblastiach so zložitými rozptylovými podmienkami alebo s nerovnomerným rozložením monitorovacích staníc.

IDW sa široko používa na modelovanie rozloženia prachových častíc (PM_{10} , $PM_{2.5}$), oxidov dusíka (NO_x) a ďalších znečisťujúcich látok. Napríklad štúdia Jerretta et al. (2013) aplikovala IDW na hodnotenie zdravotných rizík spojených s PM_{10} v kalifornských mestách, zatiaľ čo Jumaah et al. (2019) ju použili na predikciu indexu kvality ovzdušia (AQI) v Kuala Lumpur. Metóda je obzvlášť vhodná pre oblasti s nerovnomerným rozložením meracích staníc, kde umožňuje interpolovať údaje s minimálnymi požiadavkami na výpočtový výkon.

Hlavnou výhodou IDW je jej intuitívnosť a schopnosť zachytiť lokálne variácie znečistenia. Na rozdiel od metód ako Kriging nevyžaduje štatistický model priestorovej závislosti, čo znižuje nároky na vstupné údaje (Lu a Wong, 2008). Napriek tomu má IDW tieto obmedzenia:

1. **Citlivosť na hustotu staníc** – V oblastiach s riedkou sieťou môže interpolácia skresliť skutočné rozloženie znečistenia (Ohlert et al., 2022).
2. **Výber exponentu vzdialenosti** – Nesprávne nastavenie tohto parametra vedie k nadhodnoteniu alebo podhodnoteniu koncentrácií (Mesnard, 2013).
3. **Ignorovanie fyzikálnych procesov** – IDW nezohľadňuje meteorologické faktory (napr. vietor, teplota), ktoré ovplyvňujú rozptyl častíc (Lotrecchiano et al., 2023; Ochando a Ferri, 2016).

4 DÁTA A METÓDY

Údaje o hodinových koncentráciách PM_{10} boli získané z 20 monitorovacích staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) za obdobie 2016 – 2022, pokrývajúcich mestské, predmestské a vidiecke prostredia. Dáta prešli predspracovaním – odstránenie chýbajúcich hodnôt, agregácia do hodinových, mesačných a sezónnych priemerov (zima, jar, leto, jeseň) a klasifikácia podľa typu stanice (dopravná – T, pozad'ová – B), resp. podľa typu oblasti stanice (mestská – T, vidiecka – R).

Hodinové a sezónne trendy boli analyzované prostredníctvom výpočtu vážených priemerov pre jednotlivé intervaly. Denné cykly boli rozdelené do 24 hodinových blokov, pričom špičkové obdobia boli identifikované pomocou štatistických peak-detection algoritmov (Biancardi et al., 2024). Sezónne rozdiely boli kvantifikované pomocou ANOVA testov s post-hoc analýzou ($p < 0,05$), čo je bežný prístup pre environmentálne štúdie (Mansouri et al., 2011; Sharma, 2022).

Na mapovanie rozloženia PM_{10} bola použitá metóda inverzného váženia vzdialenosti (IDW) v prostredí ArcGIS 10.8. Na generovanie interpolačných máp sme použili v softvéri ArcMap10.8 (ArcGIS – ESRI) nástroje Spatial Analyst – Interpolation – IDW (Klaučo et al., 2014).

Pomocou interpolácie IDW sme vytvorili digitálne mapy zobrazujúce stav priemerných (hodinových, mesačných a ročných období) koncentrácií PM_{10} na území Slovenska, aby sme ilustrovali hodinové vzory koncentrácií. Tieto mapy nám poskytujú podrobnú vizualizáciu oblastí s vysokými koncentraciami a časovými posunmi úrovni PM_{10} . Pre interpoláciu IDW v študovanej oblasti sme použili priemerný výpočet z 20 vybraných monitorovacích staníc. Na výpočet priemerných hodnôt pre jednotlivé hodiny, mesiace a vybrané sezóny od roku 2016 do roku 2022 pre jednu stanicu (AQS (1)) sme použili rovnicu:

$$priemer_{(h,m,s)}^{AQS(1)} = \frac{\sum 1}{n},$$

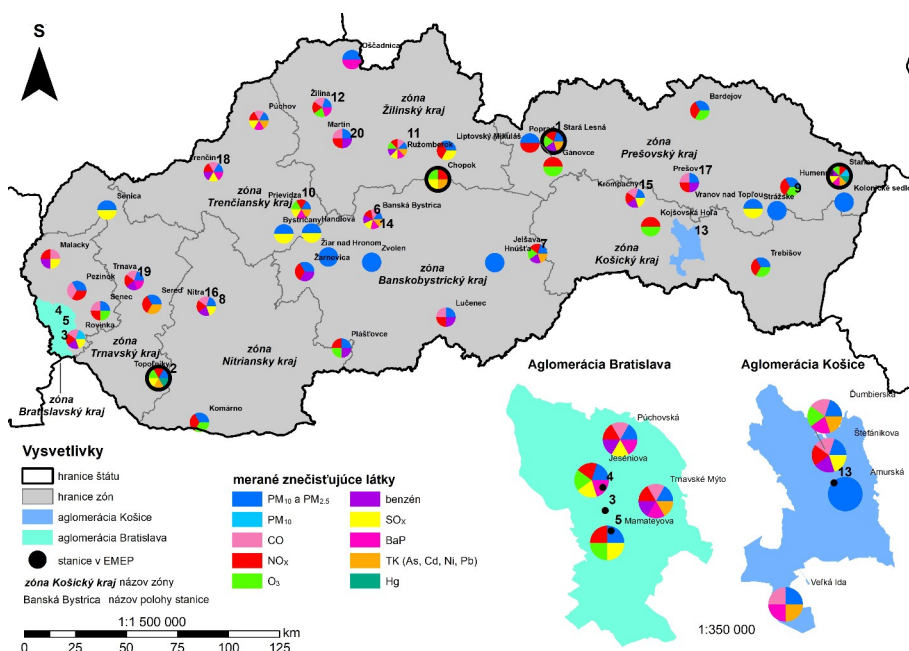
kde $\sum 1$ predstavuje súčet vybraných rovnakých hodinových, mesačných alebo sezónnych koncentrácií znečisťujúcej látky PM_{10} v priebehu dňa, mesiacov a sezón (súčet mesiacov podľa sezóny) v rokoch 2016 až 2022 a n predstavuje počet vybranej hodiny, mesiaca alebo sezóny (počet mesiacov podľa sezóny) v rokoch 2016 až 2022.

5 ŠTUDOVANÉ ÚZEMIE

Študovanou oblasťou je celé územie Slovenskej republiky, ktoré sa vyznačuje rôznorodými geografickými, klimatickými a socioekonomickými podmienkami. Slovensko predstavuje ideálnu oblasť pre štúdium priestorového a časového rozloženia koncentrácií prachových častíc PM_{10} vzhľadom na jeho rozmanitú krajinnú štruktúru zahŕňajúcu horské pásma, kotliny, doliny, mestské aglomerácie a vidiecke oblasti. Analýza bola vykonaná na základe údajov z 20 vybraných monitorovacích staníc, ktoré reprezentujú rôznorodé podmienky územia. Výber týchto staníc bol motivovaný nasledujúcimi 3 dôvodmi: 1. priestorová reprezentatívnosť – stanice pokrývajú celé územie Slovenska a zahŕňajú mestské, predmestské aj vidiecke oblasti. Tento výber umožňuje zachytiť priestorovú variabilitu koncentrácií PM_{10} v prostrediach s rôznou mierou urbanizácie a antropogénnej aktivity, 2. zohľadnenie zdrojov znečistenia – stanice boli zvolené tak, aby odrážali rozličné typy zdrojov znečistenia vrátane dopravy, priemyselnej činnosti, vykurovania a prírodných zdrojov a napokon 3. kvalita a konzistentnosť údajov – vybrané stanice poskytujú dlhodobé, pravidelne monitorované a spoľahlivé údaje, ktoré sú kľúčové pre presnú priestorovú interpoláciu metódou IDW.

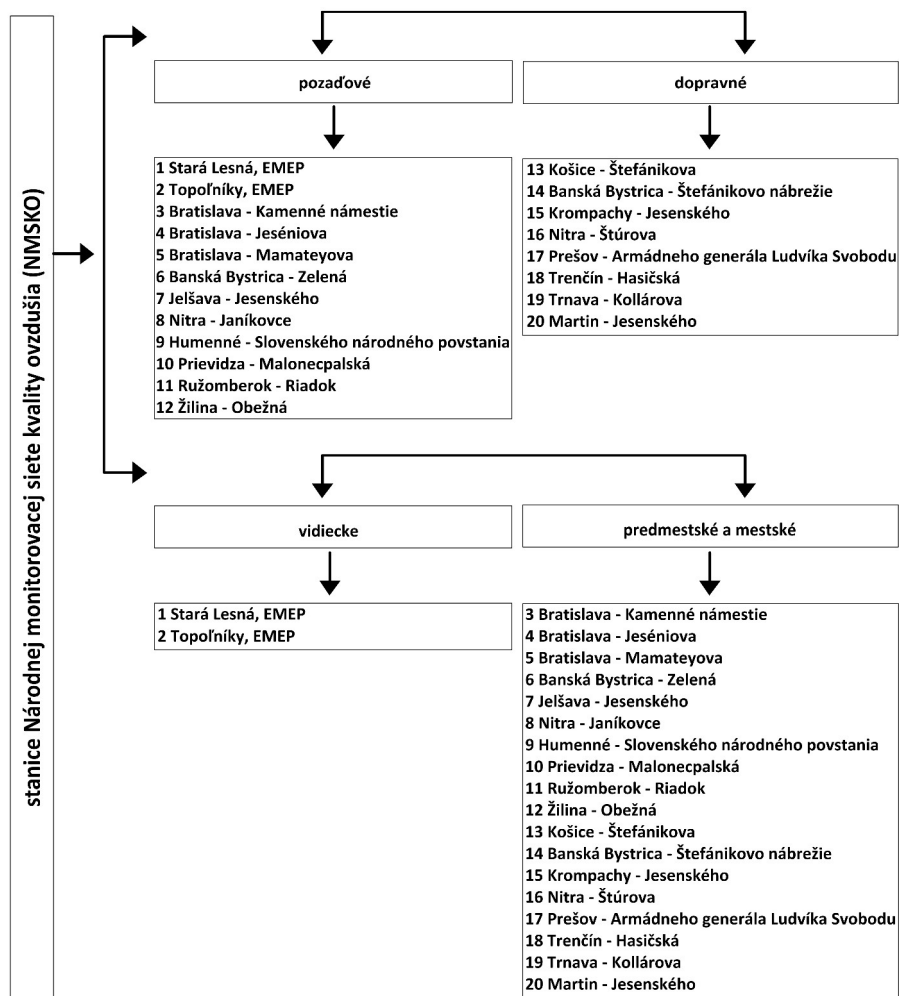
Medzi zvolené patria stanice v mestských, predmestských a vidieckych oblastiach podľa typu stanice (U – mestská, S – predmestská, R – vidiecka) a typu oblasti (B – poľnohospodárská, T – dopravná, I – priemyselná). Stanice sme rozdelili do troch skupín: vidiecke-poľnohospodárske, mestské-dopravné a mestské-poľnohospodárske. Z celkového počtu 20 vybraných staníc sú 2 vidiecke-poľnohospodárske a 18 mestských, z čoho je 7 mestských-dopravných a 11 mestských-poľnohospodárskych. Medzi zvolené patria napríklad mestské stanice v lokalitách s vysokou hustotou osídlenia a intenzívnou dopravou (napr. Bratislava, Košice), vidiecke stanice v horských oblastiach ako je Stará Lesná, ktoré reprezentujú oblasti s nízkym znečistením a stanice v priemysel-

ných centrách (príkladom je Jelšava), ktoré umožňujú posúdiť vplyv priemyselnej činnosti na kvalitu ovzdušia (Mapa 1, Obrázok 1).



Mapa 1 Poloha vybraných staníc z Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia na území Slovenska k roku 2024. Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ, 2024

Metóda IDW vyžaduje rovnomerné rozloženie vstupných údajov, aby zabezpečila presnú interpoláciu koncentrácií v rôznych častiach študovaného územia. Týchto 20 staníc poskytuje vyvážené pokrytie, stanice sú strategicky rozmiestnené tak, aby minimalizovali oblasti s nedostatkom údajov a maximalizovali presnosť interpolácie, ďalej rôznorodosť podmienok, čím zachytávajú variabilitu koncentrácií v závislosti od lokálnych zdrojov znečistenia, nadmorskej výšky a klimatických podmienok a možnosť porovnania, keďže umožňujú porovnanie medzi mestskými, predmestskými a vidieckymi prostrediami, čo zlepšuje interpretáciu priestorového rozloženia PM₁₀. Zvolené monitorovacie stanice tak tvoria spoľahlivý základ pre vizualizáciu koncentrácií PM₁₀ na celom území Slovenska. Tento výber umožňuje vytvoriť mapy, ktoré presne reflektujú rozloženie znečistenia a zároveň poskytuje nástroj pre identifikáciu najviac ohrozených oblastí.



Obrázok 1 Vybrané stanice z Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia na území Slovenska k roku 2024. Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ, 2024

6 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Štúdia analyzovala údaje z 20 monitorovacích staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) za obdobie 2016 – 2022 s dôrazom na tri hlavné aspekty: **sezónne variácie**, **denné cykly** a **priestorové rozdiely** medzi mestskými a vidieckymi oblasťami. Metodika zahŕňala štatistickú analýzu (ANOVA, vážené priemery) a priestorovú interpoláciu metódou IDW.

6.1 SEZÓNNE VARIÁCIE PM₁₀

Analýza časového rozloženia koncentrácií prachových častíc PM₁₀ na území Slovenska odhalila významné sezónne a denné variácie. V rámci sezónnych trendov boli najvyššie koncentrácie PM₁₀ zaznamenané počas zimných mesiacov, najmä v januári a februári. Tento nárast možno pripísať zvýšenému využívaniu tuhých palív na vykurovanie a zhoršeným rozptylovým podmienkam, ako sú nízke teploty a časté inverzie. Naopak, najnižšie koncentrácie boli pozorované v letných mesiacoch (jún, júl, august), keď priaznivé meteorologické podmienky, teda vyššie teploty a vyššia intenzita vetra podporovali rozptyl častíc.

Analýza poukázala aj na výrazné sezónne rozdiely v koncentráciách PM₁₀ na Slovensku. Najvyššie hodnoty boli zaznamenané počas zimných mesiacov (január – február), kedy priemerné koncentrácie v mestských dopravných staniciach dosahovali 35,32 µg/m³, čo je o 69 % viac ako vo vidieckych oblastiach. Tento trend je v súlade so štúdiami, kde zimné emisie z vykurovania tuhými palivami a časté teplotné inverzie významne zvyšujú úrovne PM₁₀. Naopak, letné mesiace (jún – august) vykazujú najnižšie hodnoty (v priemere 14,27 µg/m³ vo vidieckych oblastiach), čo je spôsobené intenzívnejším rozptylom. Túto skutočnosť potvrdzujú aj štúdie zo Španielska (Rodríguez et al., 2004; Anderson et al., 2012; Millán-Martín et al., 2021).

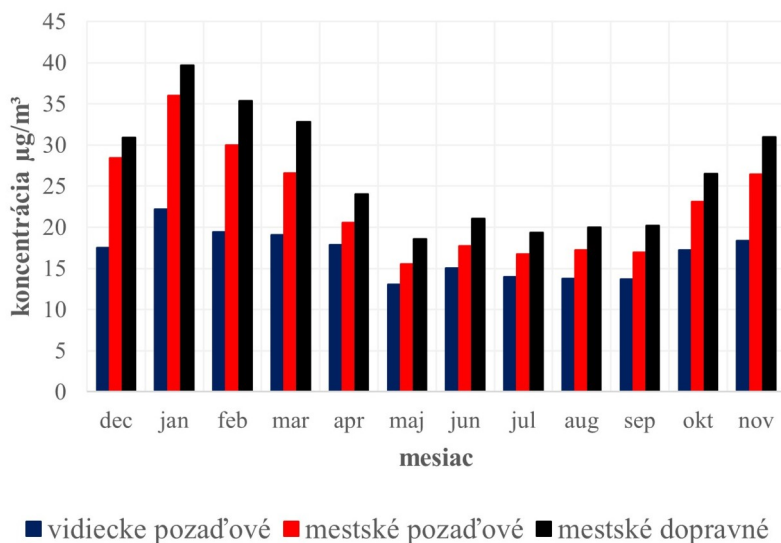
Najvyššie koncentrácie PM₁₀ boli zaznamenané v zimných mesiacoch (január – február) s priemermi:

- 1) **35,32 µg/m³** v mestských dopravných staniciach,
- 2) **31,48 µg/m³** v mestských pozadových staniciach,
- 3) **19,72 µg/m³** vo vidieckych oblastiach.

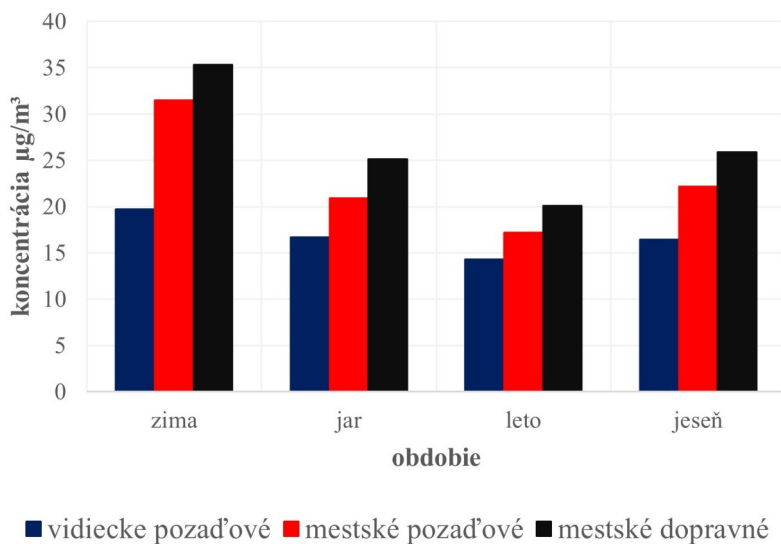
Naopak v **letných mesiacoch** (jún – august) klesli priemerné hodnoty na:

- 1) **20,12 µg/m³** v mestských dopravných staniciach,
- 2) **14,27 µg/m³** vo vidieckych staniciach.

Výsledky sú dôsledkom vyššej turbulencie v atmosfére a intenzívnejšieho vetra (Anderson et al., 2012). Mestské monitorovacie stanice vykázali vyššie priemerné koncentrácie PM₁₀ v zime o 69 %, na jar o 37 %, v lete o 30 % a na jeseň o 46 % viac ako na vidieckych monitorovacích staniciach (Obrázok 2 a 3). Sezónny trend je charakterizovaný dvomi epizódami (ročnými maximami) január – marec a október – december, čo zodpovedá vykurovacej sezóne. Naše výsledky korešpondujú so sezónnymi výkyvmi v Poľsku (Reizer a Juda-Rezler, 2016) či zo štúdie z Rumunska (Bodor et al., 2020). Štúdia z Poľska demonštruje namerané priemerné koncentrácie PM₁₀ v Krakove na mestskej dopravnej stanici v zimnom období 76 µg/m³ a letnom období 35 µg/m³ a na mestskej pozadovej stanici v zimnom období 51 µg/m³ a letnom období 25,6 µg/m³ (Samek et al., 2021). V Poľsku teda mestské monitorovacie stanice vykázali vyššie priemerné koncentrácie PM₁₀ v zime až o 50 % a mestské pozadové stanice až o 46 % viac. Rovnako na Slovensku v Žiline na „vidieckej pozadovej“ stanici boli zaznamenané v zimnom období 36,1 µg/m³ a v letnom období 16,9 µg/m³, čo je o 46 % viac než v lete (Jandačka, 2015).



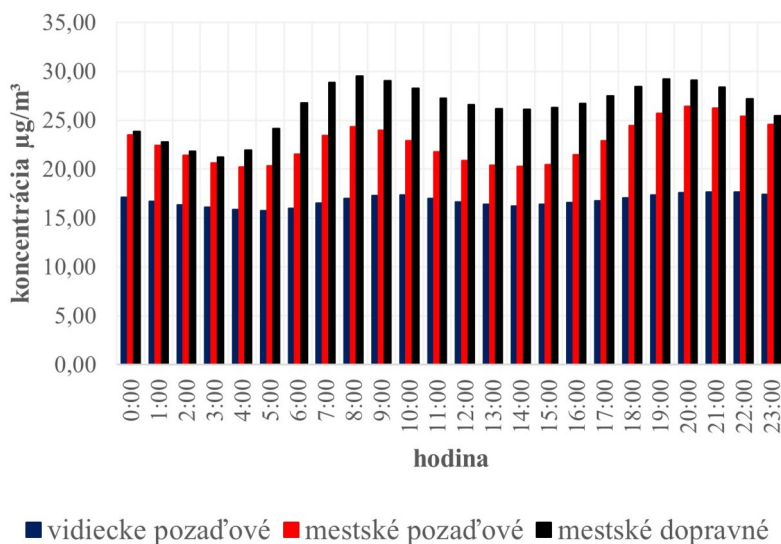
Obrázok 2 Mesačné koncentrácie PM_{10} v období 2016 až 2022 pre stanice podľa typu oblasti a typu stanice z Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia na území Slovenska k roku 2024. Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ, 2024



Obrázok 3 Štvrťročné koncentrácie PM_{10} v období 2016 až 2022 pre stanice podľa typu oblasti a typu stanice z Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia na území Slovenska k roku 2024. Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ, 2024

6.2 DENNÉ CYKLY A VPLYV DOPRAVY

Denné variácie PM_{10} vykazujú dvojité maximum s vrcholmi počas ranných (6: 00 – 10: 00) a večerných (17: 00 – 21: 00) dopravných špičiek. V mestských dopravných staniciach dosahovali ranné koncentrácie až $28,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, čo je o 35 % viac ako v období najnižšej dennej aktivity (12: 00 – 15: 00). Výrazný pokles koncentrácií počas víkendov (15 – 20 %) ďalej potvrdzuje dominantný vplyv dopravy, čo naznačuje potrebu zavedenia nízkoemisných zón v mestských centrách (Obrázok 4). Avšak náš výskum odhaľuje vyššiu amplitúdu medzi špičkovými a mimošpičkovými hodnotami (35 %) v porovnaní so západoeurópskymi mestami (20 – 25 %), čo možno pripísať nižšej efektívnosti regulácie emisií pochádzajúcich z vozidiel (Chong a Choi, 2022). Víkendový pokles (15 – 20 %) je zhodný so štúdiami z Talianska (Lonati et al., 2006), čo ďalej podporuje hypotézu o dominantnom vplyve dopravy.



Obrázok 4 Hodinové koncentrácie PM_{10} v období 2016 až 2022 pre stanice podľa typu oblasti a typu stanice z Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia na území Slovenska k roku 2024. Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ, 2024

6.3 MESTSKÉ VS. VIDIECKE PROSTREDIE

Medzi mestskými a vidieckymi stanicami boli zistené významné rozdiely. Priemerné ročné koncentrácie PM_{10} v mestských oblastiach ($24,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$) prevažovali vidiecke hodnoty ($16,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o 48 %, čo odráža vyššiu hustotu antropogénnych zdrojov (Tabuľka 1). Kritické hodnoty boli zaznamenané napríklad v Košiach-Štefánikova ($29,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a Jelšave ($33,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$), čo je porovnateľné s úrovňou

ňami v priemyselných regiónoch Poľska a Maďarska (Khafaie et al., 2016). Naopak, najnižšie koncentrácie sa vyskytovali vo vidieckej stanici Stará Lesná ($12,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$), čo predstavuje menej ako polovicu priemeru EÚ pre vidiecke oblasti (EEA, 2020).

Tabuľka 1 Rozdiel v koncentráciách PM₁₀ (2016 – 2022) v rámci mestského a vidieckeho prostredia

Typ oblasti	Priemerná ročná koncentrácia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Mestská (dopravná)	24,78
Vidiecka	16,78

Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ, 2024

Naše zistenia a výsledky sú podobné ako v porovnávacej štúdii, kde koncentrácie PM₁₀ dosiahli $36,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na priemyselnej stanici, $25,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na mestskej dopravnej stanici a $20,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na vidieckej požadovej stanici (Islam et al., 2024). Rovnaký trend pozoruje štúdia zo Španielska (Millán-Martínez et al., 2021). V Španielsku boli zaznamenané priemerné koncentrácie PM₁₀, ktoré dosiahli $49,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na mestskej dopravnej stanici a $22,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na vidieckej požadovej stanici (Rodríguez et al., 2004).

Viditeľné rozdiely medzi mestskými a vidieckymi stanicami poukazujú na potrebu cielenej regulácie znečistenia ovzdušia, najmä v mestských oblastiach, kde sú obyvatelia vystavení vyšším zdravotným rizikám spôsobeným znečistením PM₁₀.

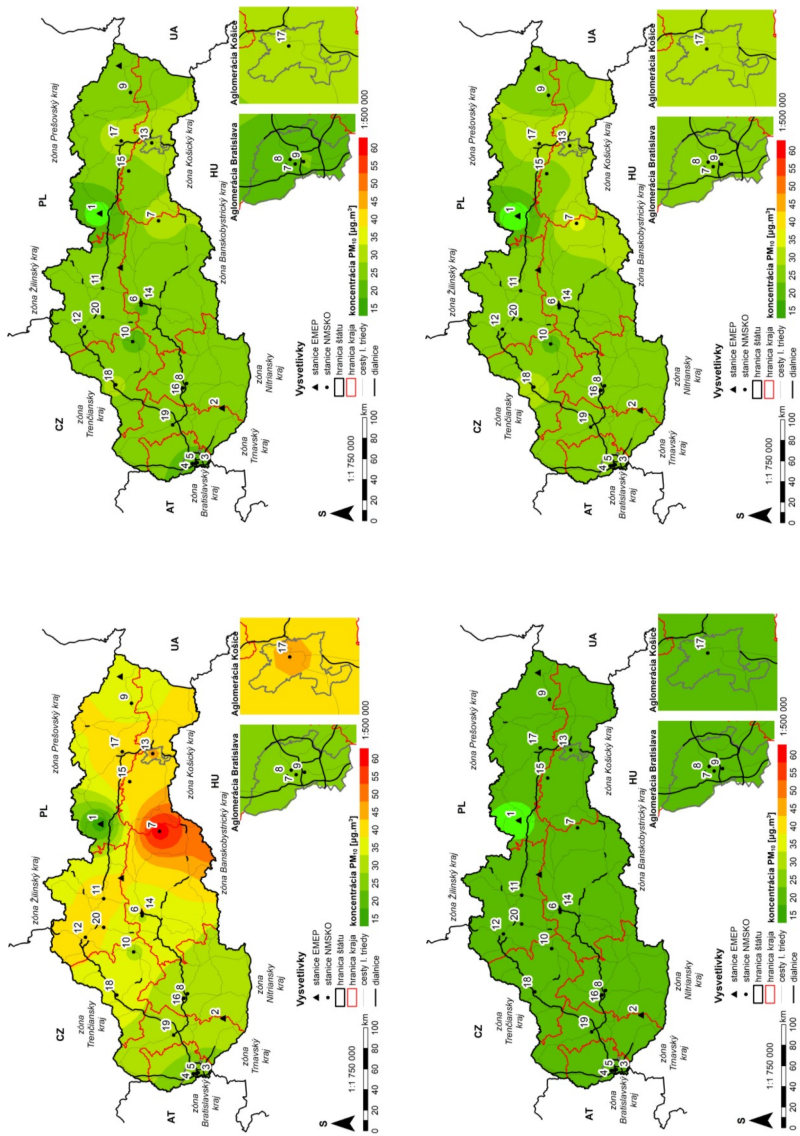
Priemerné ročné koncentrácie PM₁₀ na území Slovenska vykazujú výrazné rozdiely medzi mestskými a vidieckymi monitorovacími stanicami, ktoré súvisia s rôznorodými zdrojmi znečistenia a geografickými podmienkami. Mestské stanice vykazujú vyššie hodnoty PM₁₀, pričom priemerná ročná koncentrácia na týchto stanicach dosiahla $24,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vidiecke stanice zaznamenali nižšie hodnoty PM₁₀, pričom priemerná ročná koncentrácia na týchto stanicach dosiahla $16,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Naše výsledky potvrdzujú výrazné rozdiely v koncentráciách PM₁₀ medzi mestskými a vidieckymi oblasťami, čo je v súlade so štúdiami z iných regiónov strednej a východnej Európy. Zimné maximum ($35,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ v mestských dopravných stanicach) je porovnateľné s údajmi z Poľska, kde Kuźma et al. (2020) zaznamenali hodnoty až $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ v priemyselných oblastiach počas inverzných epizód. Avšak naše nižšie hodnoty poukazujú na špecifické zdroje znečistenia na Slovensku, ako je vyššia závislosť od vykurovania tuhými palivami v menších obciach (Andradottir a Thorsteinsson, 2019). Výrazne vyššie koncentrácie PM₁₀, namerané v mestských oblastiach, sú spôsobené dopravou, čo korešponduje so štúdiou z Nemecka (Kerschbaumer a Lutz, 2008).

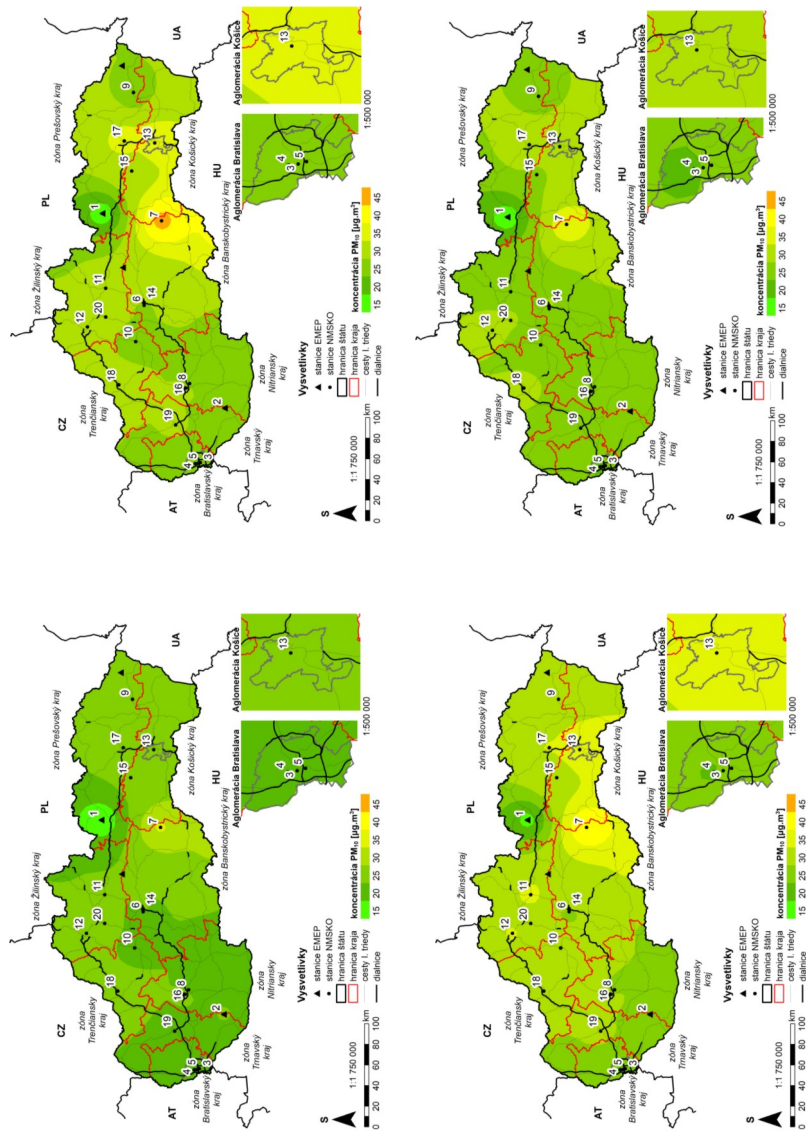
Špecifickou z hľadiska slovenských podmienok je kombinácia priemyselných zdrojov (napr. Jelšava) s dopravnou záťažou v kotlinách s väčšími mestskými sídlami, čo vedie k vyšším absolútnym hodnotám. Tieto rozdiely potvrdzujú, že efektívna politika zlepšovania kvality ovzdušia musí byť citlivá na miestne podmienky.

Zistený 69 % nárast PM_{10} v mestách počas zimy korešponduje s trendmi pozorovanými v susedných krajinách, no je vyšší ako v západnej Európe. Napríklad v Nemecku dosahujú zimné koncentrácie v urbanizovaných oblastiach približne 28 – 30 $\mu g/m^3$ (EEA, 2020), čo naznačuje, že na Slovensku môžu byť rozptylové podmienky menej priaznivé v dôsledku častejších teplotných inverzií.

Použitím metódy IDW na vizualizáciu dát je možné nielen identifikovať kritické miesta znečistenia, ale aj efektívne vysvetliť priestorové a časové trendy koncentrácií PM_{10} odbornej i laickej verejnosti. Tieto vizualizácie zároveň slúžia ako podklad pre plánovanie opatrení na zlepšenie kvality ovzdušia. Analýza priestorového a časového rozloženia koncentrácií PM_{10} na území Slovenska poskytla dôležité poznatky o sezónnych a denných trendoch znečistenia ovzdušia. Výsledky ukazujú, že koncentrácie PM_{10} zaznamenali výrazné sezónne rozdiely, pričom zimné mesiace predstavujú obdobie s najvyšším znečistením. Tento jav možno pripísať kombinácii faktorov ako sú zvýšené emisie z vykurovania tuhými palivami, časté teplotné inverzie a obmedzené rozptylové podmienky. Naopak, letné mesiace vykazujú najnižšie koncentrácie PM_{10} , čo naznačuje priaznivý vplyv vyšších teplôt, vyššej intenzity vetra a turbulencií v atmosfére. Denné variácie koncentrácií PM_{10} poukazujú na dvojité maximum, typické pre urbanizované oblasti. Ranné a večerné špičky súvisia s intenzívnou dopravou a vykurovaním domácností, pričom tieto maximá sú zreteľnejšie v mestských oblastiach. Vidiecke oblasti vykazujú nižšie koncentrácie, čo zdôrazňuje ich nižšiu expozíciu voči antropogénnym zdrojom znečistenia.

Použitie metódy IDW umožnilo vytvoriť podrobné mapy priestorového rozloženia PM_{10} , ktoré poskytli vizuálny prehľad o oblastiach s najvyššou mierou znečistenia. Mapy zároveň odhalili koncentráciu znečistenia v priemyselných a dopravných uzloch, pričom vidiecke oblasti, ako napríklad Stará Lesná, vykazujú najnižšie hodnoty PM_{10} . Priestorová interpolácia poskytla údaje vhodné na plánovanie environmentálnych opatrení a identifikáciu „hot spotov“ vyžadujúcich prioritné zásahy. Výsledky tiež ukazujú dlhodobý pokles koncentrácií PM_{10} v období rokov 2016 – 2022, čo odráža pozitívny vplyv opatrení na znižovanie znečistenia ovzdušia, ako je modernizácia vykurovacích systémov a sprísnenie emisných noriem v priemysle a doprave. Napriek tomuto pokroku zostávajú zimné mesiace a dopravné špičky kritickými obdobiami, ktoré si vyžadujú ďalšiu pozornosť. Metóda IDW sa ukázala ako efektívny nástroj na priestorové modelovanie znečistenia, avšak jej presnosť závisí od rozloženia monitorovacích staníc. Preto je dôležité zabezpečiť rovnomernejšie pokrytie meraní v budúcnosti, aby sa minimalizovali oblasti s nedostatkom údajov (Mapa 2 a 3).





Mapa 3 Časové a priestorové rozloženie najnižších nameraných koncentrácií PM₁₀ o 03: 00 h. (vľavo hore) a najvyšších nameraných koncentrácií PM₁₀ o 08: 00 h. (vľavo dole) a celodenný priemer (vpravo dole) v období 2016 – 2022. Spracovanie: autori, 2024. Zdroj: SHMÚ 2024

7 ZÁVER

Štúdiá odhalila významné sezónne a denné rozdiely v koncentráciách PM₁₀ na území Slovenska. Najvyššie hodnoty boli zaznamenané v zimných mesiacoch a počas dopravných špičiek, zatiaľ čo letné mesiace a nočné hodiny prinášajú zlepšenie kvality ovzdušia. Použitie metódy IDW umožnilo presnú vizualizáciu priestorového rozloženia znečistenia, čo prinieslo užitočné údaje pre plánovanie opatrení na zlepšenie kvality ovzdušia. Výsledky zdôrazňujú potrebu zamerania sa na reguláciu emisií počas zimy a dopravných špičiek, najmä v mestských a priemyselných oblastiach. Okrem toho je nevyhnutné pokračovať v modernizácii vykurovacích systémov a implementovať nízko emisné technológie v doprave a priemysle. Z dlhodobého hľadiska je potrebné investovať do hustejšej siete monitorovacích staníc na zabezpečenie ešte presnejších údajov pre priestorové analýzy. Vizualizácie vytvorené pomocou IDW zároveň zvyšujú povedomie o dopadoch znečistenia na zdravie a životné prostredie, čím prispievajú k efektívnejšej komunikácii a osвете.

Naša štúdiá analyzujúca priestorové a časové rozloženie koncentrácií PM₁₀ na území Slovenska odhalila kľúčové trendy a vzťahy, ktoré majú zásadný význam pre environmentálne plánovanie a ochranu zdravia. Hlavné zistenia možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- 1) **Sezónne variácie:** Najvyššie koncentrácie PM₁₀ boli zaznamenané počas zimných mesiacov (až 35,32 µg/m³ v mestských dopravných staniciach), čo je spôsobené emisiami z vykurovania tuhými palivami a častými teplotnými inverziami. Letné mesiace vykazujú najnižšie hodnoty (v priemere 14,27 µg/m³ vo vidieckych oblastiach) vďaka priaznivejším meteorologickým podmienkam.
- 2) **Denné cykly:** Denné maximum sa vyskytuje počas dopravných špičiek (6: 00 – 10: 00 a 17: 00 – 21: 00), pričom koncentrácie v mestských oblastiach prevyšujú denné minimum o 35 %. Víkendový pokles (15 – 20 %) potvrdzuje dominantný vplyv dopravy na emisie.
- 3) **Urbanizačný vplyv:** Mestské stanice vykazujú o 48 % vyššie ročné priemery PM₁₀ (24,78 µg/m³) ako vidiecke (16,78 µg/m³). Kritické hodnoty boli zaznamenané v priemyselných oblastiach (Jelšava – 33,43 µg/m³), zatiaľ čo vidiecke regióny (Stará Lesná – 12,96 µg/m³) predstavujú vzor čistejšieho ovzdušia.
- 4) **Účinnosť IDW metódy:** Priestorové interpolácie pomocou IDW presne identifikovali „hot-spoty“ v mestských a priemyselných zónach, čo poskytuje podklady pre ciele opatrenia.
- 5) **Dlhodobý pokles:** Od roku 2016 došlo k poklesu koncentrácií PM₁₀ o 12 %, čo odráža pozitívny vplyv modernizácie priemyslu a dopravy.

Odporúčame reguláciu emisií zavedením nízkoemisných zón v mestských centrách a podporu ekologického vykurovania cez dotácie. Ďalším významným odporúčaním je rozšírenie monitorovacej siete v dopravných uzloch a priemyselných parkoch pre presnejšie mapovanie. Perspektívou budúceho výskumu môže byť

skúmanie vplyvu klimatických zmien na kvalitu ovzdušia a hodnotenie efektivity nových opatrení (napr. elektromobilita) na redukciu PM₁₀.

Záverom možno konštatovať, že hoci IDW zostáva užitočným nástrojom pre rýchlu a prehľadnú vizualizáciu údajov o kvalite ovzdušia, jej obmedzenia vyžadujú pozornosť. Kombinácia s pokročilejšími metódami ako sú Kriging alebo hybridné modely by mohla výrazne zlepšiť presnosť priestorových analýz a poskytnúť spoľahlivejšie podklady pre rozhodovanie v oblasti ochrany ovzdušia. Tieto metódy by mali byť predmetom ďalšieho výskumu, najmä v kontexte slovenských podmienok, kde niektoré regióny stále trpia nedostatočnou hustotou monitorovacích staníc.

PodĎakovanie

Autori by radi vyjadrili úprimné poďakovanie za inšpiráciu a podporu pracovníkom z SHMÚ, ktorí zároveň poskytli údaje spracované v rámci príspevku.

Literatúra

- ABDULKAREEM, S. K., ALHADITHI, M., AMER, W. 2025. Evaluating spatial interpolation techniques for accurate air quality prediction: An overview. *R3S Web of Conferences*, 633, 07008.
- ANDERSON, J. O., THUNDIYIL, J. G., STOLBACH, A. 2012. Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology*, 8, 166-175.
- ANDRADOTTIR, H. O., THORSTEINSSON, T. 2019. Repeated extreme particulate matter episodes due to fireworks in Iceland and stakeholders' response. *Journal of Cleaner Production*, 236, 1-11.
- BIANCARDI, M., ZHOU, Y., KANG, W., XIAO, T., GRUBESIC, T., NELSON, J., LIANG, L. 2024. Exploring spatiotemporal dynamics, seasonality, and time-of-day trends of PM_{2.5} pollution with a low-cost network: Insights from classic and spatially explicit Markov chains. *Applied Geography*, 172(1), 103414.
- BODOR, Z., BODOR, K., KERESZTESI, Á., SZÉP, R. 2020. Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM₁₀ in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 38181-38199.
- EEA. 2020. Air quality in Europe – 2020 report. *EEA Report No 9/2020*. European Environment Agency, Copenhagen, 1-160.
- HENGL, T. 2009. A practical guide to geostatistical mapping. *Office for Official Publications of the European Communities*, 1-270.
- HORNE, B. J., JOY, E. A., HOFMANN, M. G., GESTELAND, P. H., CANNON, J. B., LEFLER, J. S., BLAGEV, D. P., KORGESKI, E. K., TOROSYAN, P. H., HANSEN, G. I., KARTCHNER, D., POPE III, C. A. 2018. Short-Term elevation of fine particulate matter air pollution and acute lower respiratory infection. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 198, 759-766.
- CHIN, M. 2014. Basic mechanisms for adverse cardiovascular events associated with air pollution. *Heart*, 101, 253-256.
- CHLEBOVSKA-STYŠ, A., SÓWKA, I., KOBUS, D., PACHURKA, L. 2017. Analysis of concentrations trends and origins of PM₁₀ in selected European cities. In: *E3S Web of Con-*

- ferences 9th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK, 17, 1-8.
- CHONG, K., CHOI, K. 2022. Modified Inverse Distance Weighting Interpolation for Particulate Matter Estimation and Mapping. *Atmosphere*, 13, 1-15.
- IBÁÑEZ, N. G., ALIAGA, E. C., DE LA HAZA, M. G. P., ARCE, V. L., LORENZO-SAÉZ, E. 2024. Air quality geospatial analysis in vulnerable areas. Case study of Valencia (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(10), 1278.
- ISLAM, A., PATTNAIK, N., MOKTADER MOULA, MD., RÖTZER, T., PAULEIT, S., RAHMAN, A. M. 2024. Impact of urban green spaces on air quality: A study of PM₁₀ reduction across diverse climate. *Science of the Total Environment*, 955, 176770.
- JANDAČKA, D. 2015. Sources of PM₁₀ air pollution in rural area in the vicinity of a highway in Žilina selfgoverning region, Slovakia. *Civil and Environmental Engineering*, 11 (1), 59-68.
- JERRETT, M., BURNETT, R. T., BECKERMAN, B. S., TURNER, M. C., KREWSKI, D., THURSTON, G., MARTIN, R. V., VAN DONKELAAR, A., HUGHES, E., SHI, Y., GAPSTUR, S. M., THUN, M. J., POPE III, C. A. 2013. Spatial analysis of air pollution and mortality in California. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 188, 593-599.
- JUMAAH, H. J., AMEEN, M. H., KALANTAR, B., RIZEEI, H. M., JUMAAH, S. J. 2019. Air quality index prediction using IDW geostatistical technique and OLS-based GIS technique in Kuala Lumpur, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10, 2185-2199.
- KAMBOJ, K., SISODIYA, S., MATHUR, A. K., ZARE, A., VERMA, P. 2022. Assessment and spatial distribution mapping of criteria pollutants. *Water, Air & Soil Pollution*, 233(82), 1-15.
- KERSCHBAUMER, A., LUTZ, M. 2008. Origin and influence of PM₁₀ in urban and in rural environments. *Advances in Science and Research*, 2, 53-55.
- KESHTKAR, M., HEIDARI, H., MOAZZENI, N., AZADI, H. 2022. Analysis of changes in air pollution quality and impact of COVID-19 on environmental health in Iran: application of interpolation models and spatial autocorrelation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 1-22.
- KHAFAIE, M. A., YAJNIK, CH. S., SALVI, S. S., OJHA, A. 2016. Critical review of air pollution health effects with special concern on respiratory health. *Journal of Air Pollution and Health*, 1, 123-136.
- KIREŠOVÁ, S., GUZAN, M. 2022. Measurement of Particulate Matter: Principles and Options of Measurement at Present. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 22, 8-18.
- KLAUČO, M., WEIS, K., GREGOROVÁ, B., ANSTEAD, L. 2014. *Geografické informačné systémy* 3.
- KUMAR, S. R., RAO, CH. R., RAO, CH. P., RAMANI, V. S. 2024. Seasonal Trend Analysis of Major Air Pollutant (PM_{2.5} and PM₁₀) Concentration in Visakhapatnam During 2020 – 2022: A case Study. *Indian Journal of Science and Technology*, 17, 258-269.
- KUŽMA, Ł., DABROWSKI, E. J., KURASZ, A., BACHÓRZEWSKA-GAJEWSKA, H., DOBRZYCKI, S. 2020. The 10-Year Study of the Impact of Particulate Matters on Mortality in Two Transit Cities in North-Eastern Poland (PL-PARTICLES). *Journal of Clinical Medicine*, 9, 1-12.
- LI, J., HEAP, A. D. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189.
- LONATI, G., GIUGLIANO, M., CERNUSCHI, S. 2006. The role of traffic emissions from weekends' and weekdays' fine PM data in Milan. *Atmospheric Environment*, 40(31), 5998-6011.
- LOSSER, T., LI, L., YORKE, CH., PILTNER, R. 2014. Fast Inverse Distance Weighting-based spatiotemporal interpolation: a web-based application of interpolating daily fine particulate matter PM_{2.5} in the contiguous U. S. using parallel programming and k-d tree. *Environmental Research and Public Health*, 11(9), 9101-9141.

- LOTRECCHIANO, N., BARLETTA, D., POLETO, M., SOFIA, D. 2023. Comparison of spatial interpolation techniques for innovative air quality monitoring systems. *Results in Engineering*, 17, 100937.
- LU, F., XU, D., CHENG, Y., DONG, S., GUO, C., JIANG, X., ZHENG, X. 2015. Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population. *Environmental Research*, 136, 196-204.
- LU, G. Y., WONG, D. W. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, 34(9), 1044-1055.
- MANSOURI, B., MANSOURI, A. 2011. Study on ambient concentrations of air quality parameters (O₃, SO₂, CO and PM₁₀) in different months in Shiraz city, Iran. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(7), 1440-1447.
- MASROOR, K., FANAIEI, F., YOUSEFI, S., RAEESI, M., ABBASLOU, H., SHAH-SAVANI, A., HADEI, M. 2020. Spatial modelling of PM_{2.5} concentrations in Tehran using Kriging and inverse distance weighting (IDW) methods. *Journal of Air Pollution and Health*, 5(2), 89-96.
- MESNARD, L. 2013. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. *Computers & Geosciences*, 52, 459-469.
- MILLÁN-MARTÍNEZ, M., SÁNCHEZ-RODAS, D., SÁNCHEZ DE LA CAMPA, A. M., ALAUSTEY, A., QUEROL, X., DE LA ROSA, J. D. 2021. Source contribution and origin of PM₁₀ and arsenic in a complex industrial region (Huelva, SW Spain). *Environmental Pollution*, 274, 116268.
- NGUYEN, D. A., DUONG, S. H., TRAN, P. A., CAO, H. H., HO, B. Q. 2020. Combination of data-driven models and interpolation technique to develop of PM₁₀ map for Hanoi, Vietnam. *Scientific Reports*, 10, 19268.
- OHLERT, P. L., BACH, M., BREUER, L. 2022. Accuracy assessment of inverse distance weighting interpolation of groundwater nitrate concentrations in Bavaria (Germany). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 9445-9455.
- OCHANDO, L. C., FERRI, C. 2016. Wind-sensitive interpolation of urban air pollution forecasts. *Procedia Computer Science*, 80, 313-323.
- REIZER, M., JUDA-REIZLER, K. 2016. Explaining the high PM₁₀ concentrations observed in Polish urban areas. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 9, 517-531.
- RODRÍGUEZ, S., QUEROL, X., ALASTUEY, A., VIANA, M. M., ALARÓN, M., MANTILLA, E., RUIZ, C. R. 2004. Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 328 (1-3), 95-113.
- SAMEK L., STYSZKO, K., STEGOWSKI, Z., ZIMNOCH, M., SKIBA, A., TUREK-FIJAŁ, A., GORCZYCA, Z., FURMAN, P., KASPER-GIEBL, A., ROZANSKI, K. 2021. Comparison of PM₁₀ sources at traffic and urban background sites based on elemental, chemical and isotopic composition: Case study from Krakow, Southern Poland. *Atmosphere*, 12(10), 1364.
- SHARMA, G. K., TEWANI, A., GARGAVA, P. 2022. Comprehensive analysis of ambient air quality during second lockdown in national capital territory of Delhi. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 6, 100078.
- SHUKLA, K., KUMAR, P., MANN, S. G., KHARE, M. 2020. Mapping spatial distribution of particulate matter using Kriging and Inverse Distance Weighting at supersites of megacity Delhi. *Sustainable Cities and Society*, 54, 1-12.
- TORNEVI, A., OLSTRUP, H., FORSBERG, B. 2022. Short-term Associations between PM₁₀ and respiratory Health Effects in Visby, Sweden. *Toxics*, 10, 333.
- WHO. 2020. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀). *World Health Organization*, 1-300.
- WHO. 2023. *Global air quality guidelines – 2023 update*. Geneva, World Health Organization.

- YANG, D., YANG, X., DENG, F., GUO, X. 2017. Ambient Air Pollution and Biomarkers of Health Effect. In Dong, G. H. (ed.) *Ambient Air Pollution and Health Impact in China: Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer: Singapore, 59-102.
- ZAREBA, M., DANEK, T., CHUCHRO, M. (2025). Explainable Artificial Intelligence and Spatial Analysis for Sustainable Urban Planning Addressing Air Pollution. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 69, 1, 77-96.
- ZEB, B., DITTA, A., ALAM, K., SOROOSHIAN, A., DIN, B., IQBAL, R., RAHMAN, M., RAZA, A., ALWAHIBI, M., ELSIKH, M. S. 2024. Wintertime investigation of PM₁₀ concentrations, sources, and relationship with different meteorological parameters. *Scientific Reports*, 14, 154.
- ZHENG, P., SHEN, T. 2015. Comparison of different spatial interpolation methods for atmospheric pollutant PM_{2.5} by using GIS and Spearman correlation. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7 (12), 452-469.

Urban-rural Differentiation of Particulate Matter (PM₁₀) concentrations in Slovakia: Spatial-temporal and Seasonal Dynamics based on IDW interpolation

Summary

This study presents a comprehensive analysis of PM₁₀ concentration patterns across Slovakia, examining urban-rural differences through spatiotemporal analysis using Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation. The research utilizes data from 20 monitoring stations operated by the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI) from 2016 to 2022, providing significant insights into air quality variations and their driving factors. The findings reveal substantial disparities between urban and rural environments, with annual mean PM₁₀ concentrations in urban areas (24.78 µg/m³) exceeding rural levels (16.78 µg/m³) by 48%. Particularly high pollution was recorded at urban traffic stations like Košice-Štefánikova (29.63 µg/m³) and industrial areas such as Jelšava (33.43 µg/m³), while rural stations like Stará Lesná maintained the cleanest air (12.96 µg/m³). These urban-rural differences are most pronounced during winter months when urban traffic stations reach averages of 35.32 µg/m³ compared to 19.72 µg/m³ in rural areas – a 69% difference attributed to increased heating emissions and frequent temperature inversions. Seasonal analysis shows consistent patterns, with winter months (January-February) exhibiting the highest pollution levels due to combustion emissions and stable atmospheric conditions, while summer months (June-August) show the lowest concentrations (20.12 µg/m³ urban, 14.27 µg/m³ rural) thanks to better dispersion conditions. The study also identifies clear diurnal cycles, with pollution peaks during morning (6: 00-10: 00) and evening (17: 00-21: 00) traffic hours, where urban concentrations reach 28.53 µg/m³ – 35% higher than midday levels. The weekend effect shows a 15-20% reduction, strongly implicating traffic as a major pollution source.

Methodologically, the research demonstrates both the strengths and limitations of IDW interpolation for air quality mapping. While effective for visualizing general pollution patterns and identifying urban hotspots, the method shows reduced accuracy in rural areas with sparse station coverage and does not account for topographic or meteorological factors. The spatial analysis successfully maps pollution distribution across Slovakia, highlighting industrial zones and transportation corridors as high-concentration areas while revealing gaps in the current monitoring network, particularly in eastern rural regions.

These findings carry important policy implications, suggesting the need for seasonally targeted interventions, particularly winter measures addressing residential heating emissions. The clear traffic-related patterns support implementing low-emission zones and accelerating transport electrification. The study also highlights opportunities to optimize Slovakia's air quality monitoring network by adding stations in data-sparse regions and enhancing industrial zone coverage.

From a scientific perspective, this work provides the most comprehensive analysis to date of Slovakia's PM₁₀ distribution, establishing quantitative urban-rural relationships and creating a baseline for future assessments. The successful application of IDW in a medium-density monitoring network offers methodological insights for similar studies in transitional economies. While providing valuable insights, the study acknowledges limitations including sparse rural monitoring data and the method's inability to incorporate topographic or meteorological factors. Future research directions could explore hybrid-modeling approaches, integrate satellite data, and conduct health impact assessments using these pollution maps.

In conclusion, this study offers an evidence-based foundation for air quality management in Slovakia, clearly demonstrating the significant effects of urbanization, seasonality and anthropogenic activities on PM₁₀ pollution. The robust findings and visual outputs provide valuable tools for policymakers and urban planners to develop targeted interventions, particularly for urban areas during winter months and peak traffic periods. The work underscores the importance of continued monitoring network expansion and methodological improvements to better understand and address air pollution challenges in Slovakia and similar regions.