

# Sezonalita kvality ovzdušia na Slovensku

Tereza Šedivá

Fakulta Matematiky, Fyziky a Informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava,  
Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15, Bratislava.  
tereza.sediva@gmail.com

Dušan Štefánik

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15, Bratislava.  
dusan.stefanik@shmu.sk

## Anotácia

Koncentrácie znečisťujúcich látok v ovzduší sa menia počas roka v závislosti od emisií a rozptylových podmienok. V tomto príspevku analyzujeme mieru ročnej variability  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2,5}$  z nameraných koncentrácií na staniách aj z modelových výsledkov. Tiež sa zaoberáme rozložením emisií z vykurovania počas roka v regionálnych chemicko-transportných modeloch.

**Kľúčové slová:** Modelovanie kvality ovzdušia, ročný chod emisií.

## Annotation

Concentrations of pollutants in the air change throughout the year depending on the emissions and dispersion conditions. In this paper, the extent of diurnal variation of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2,5}$  is analysed using concentrations measured at stations as well as modelled results. Yearly distribution of residential heating emissions in the regional chemical-transport models is also discussed.

**Keywords:** Air quality modelling, diurnal variation of emissions.

## 1. Úvod

---

Koncentrácie znečisťujúcich látok v ovzduší sa menia počas roka. Pre väčšinu problematických znečisťujúcich látok na Slovensku sú priemerné koncentrácie vyššie v zime ako v lete, kvôli emisiám z vykurovania a zhoršeniu rozptylových podmienok. Definujeme zimný a letný koeficient  $f_z$  a  $f_l$  ako:

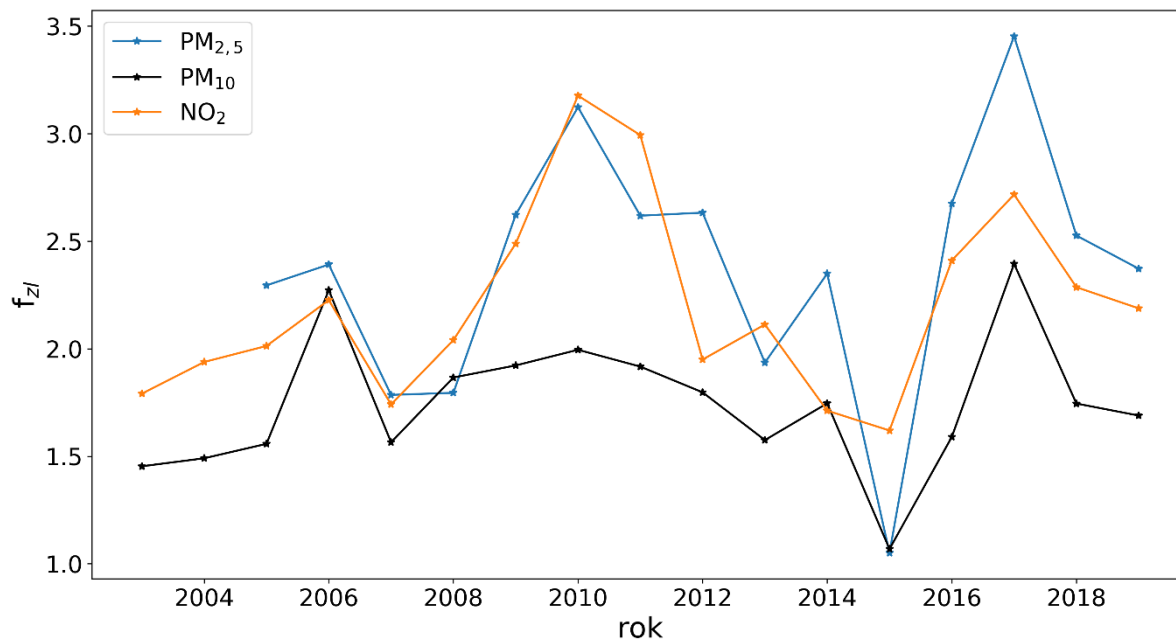
Priemerné zimné koncentrácie =  $f_z \times$  Priemerne ročné koncentrácie

Priemerné letné koncentrácie =  $f_l \times$  Priemerne ročné koncentrácie

kde v zime priemerujeme koncentrácie za mesiace január, február a december a v lete za mesiace jún, júl a august v danom roku. Ďalej zavedme faktor

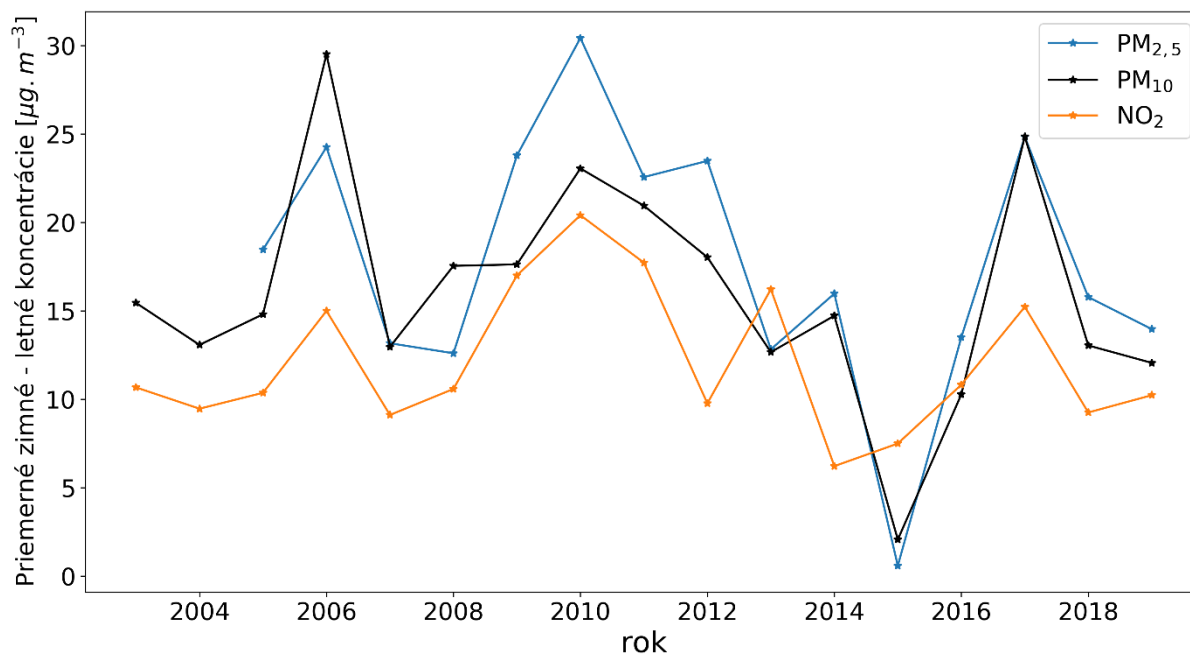
$$f_{zl} = f_z / f_l,$$

ktorý nám udáva, o koľko sú vyššie koncentrácie v zime ako v lete.



Obr.1: Pomer priemerných zimných a letných koncentrácií NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> pre všetky meracie stanice NMSKO.

Tento faktor je vykreslený na Obr.1 ako priemer získaný zo všetkých staníc Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia (NMSKO) pre znečisťujúce látky NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> v danom roku. Z Obr. 1 možno určiť, v ktorých rokoch boli zvlášť tuhé zimy s nepriaznivými rozptylovými podmienkami.



Obr.2: Rozdiel priemerných zimných a letných koncentrácií NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> pre všetky meracie stanice NMSKO.

Na Obr. 2 je zobrazený rozdiel medzi priemernými zimnými a letnými koncentraciami. Z obrázkov je vidno, že koncentrácie PM<sub>2,5</sub> narastajú v zime oproti letu viac ako koncentrácie PM<sub>10</sub>, ale rozdiely koncentrácií medzi zimou a letom sú podobné pre obe skupiny pevných častíc. Z toho možno usúdiť, že za zvýšenými koncentraciami PM<sub>10</sub> v zime je zodpovedná najmä jemná frakcia. Z daných obrázkov

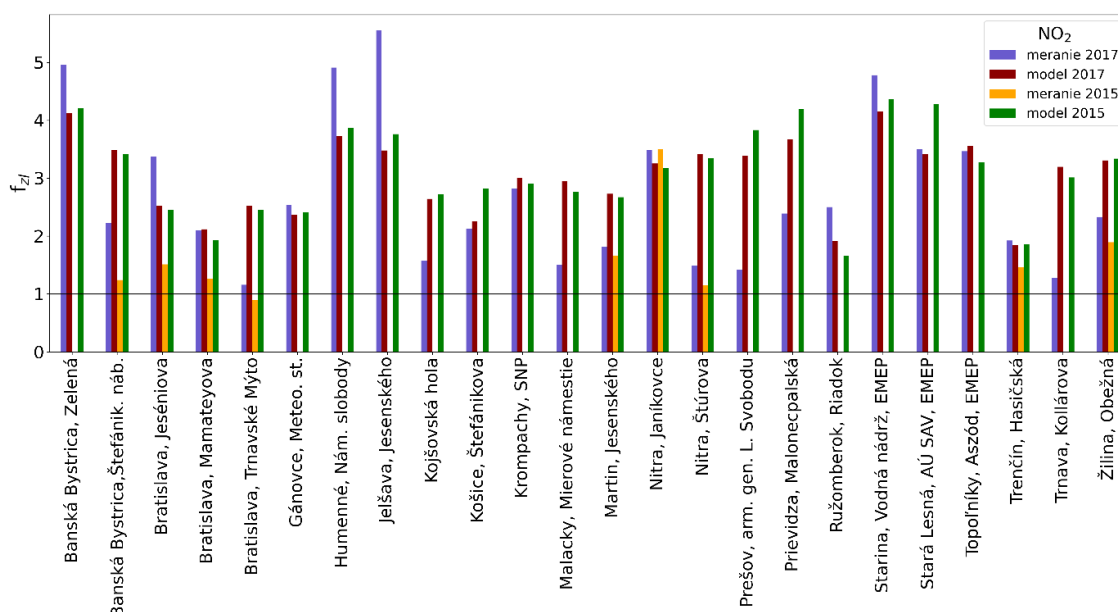
tiež možno vyčítať, že pomer  $PM_{10}$  k  $PM_{2,5}$  v lete je vyšší oproti zime, čo je spôsobené zvýšenou prašnosťou hrubej frakcie v lete (najmä prašnosť z poľnohospodárstva). Treba poznamenať, že časové rady, najmä pre rok 2015, sú často neúplné.

## 2. Porovnanie nameraných koncentrácií s modelovými dátami

V nasledujúcich sekciách uvádzame hodnoty  $f_{z,l}$  a rozdiel priemerných zimných a letných koncentrácií  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  pre všetky stanice NMSKO s výťažnosťou aspoň 75% počas daných období, v rokoch 2015 a 2017. Tieto dva roky sme vybrali kvôli tomu, že k nim máme dostupné aj hodnoty [5,6] z chemicko-transportného modelu CMAQ [7]. Modelová doména mala v daných simuláciách rozlíšenie 4,7 x 4,7 km. Namerané dáta porovnáваме s modelovými dátami z bunky modelovej domény, do ktorej daná stanica spadá. V roku 2015 boli časové rady meraní na väčšine staníc nedostatočné pre naše porovnanie, a teda v grafoch dáta z týchto staníc neuvádzame.

### A. $NO_2$

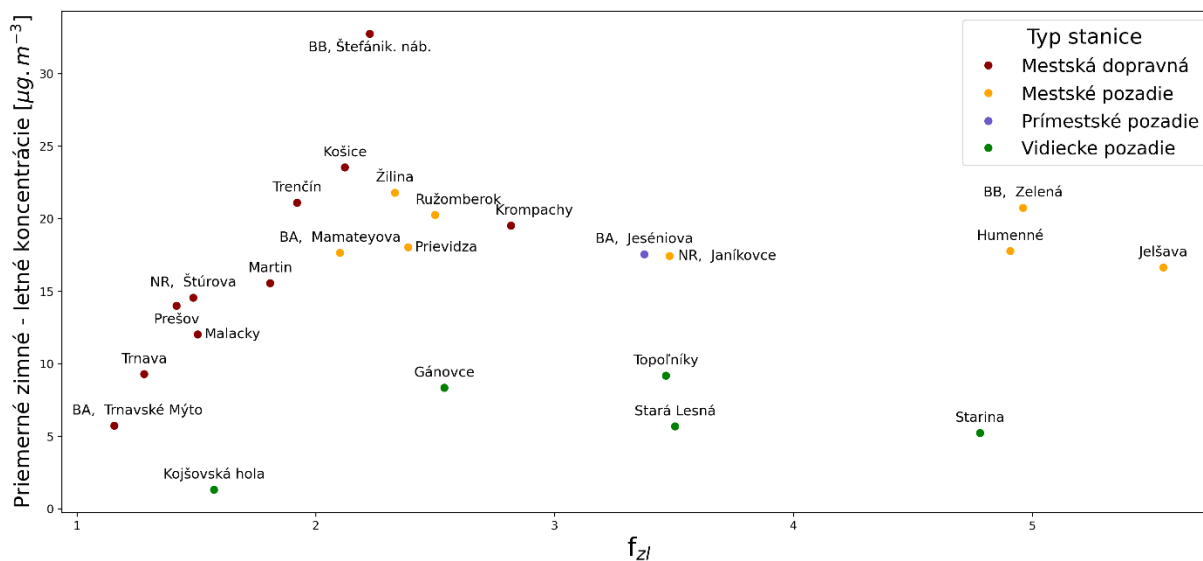
Na Obr. 3 si pre viaceré stanice môžeme všimnúť, že modelové  $f_{z,l}$  je cca. dvojnásobné oproti reálnym meraniam. Ide však o dopravné stanice, ktoré sú pre porovnanie meraní s modelom zväčša nevhodné, keďže v blízkosti ciest sú stanice vystavované vyšším koncentráciám, ako sú priemerné koncentrácie v modelovej bunke, s ktorými staničné meranie porovnáваме. Takéto odchýlky sú teda očakávané. Vhodnejšie pre porovnanie s modelom sú pozadové stanice, pre ktoré pozorujeme pomerne vysokú podobnosť výsledkov modelu s meraniami. Tieto výsledky naznačujú, že model úspešne zachytáva variabilitu emisií a rozptylových podmienok počas roka.



Obr.3: Pomer priemerných zimných a letných koncentrácií  $NO_2$  na meracích staniciach NMSKO v porovnaní s modelovými dátami.

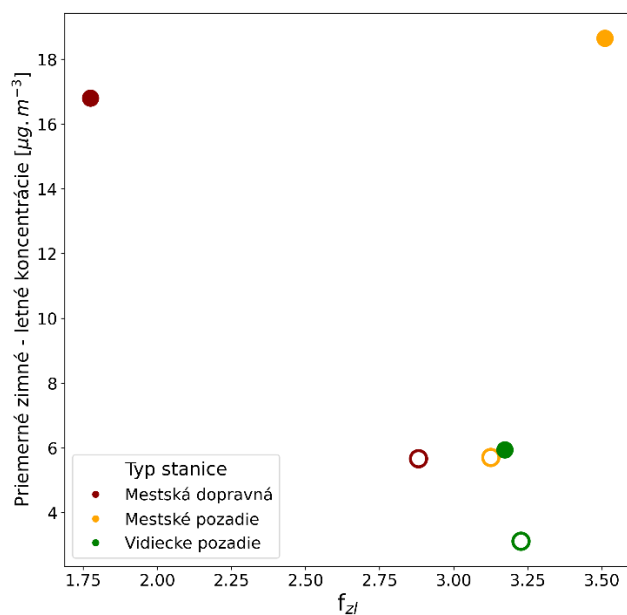
Na Obr.4 vidíme, že rozdiely priemerných zimných a letných koncentrácií z meraní výrazne prevyšujú modelové dáta, a to najmä pre rok 2017. Tento rozdiel v hodnotách môže byť spôsobený najmä kombináciou dvoch faktorov. Prvým z nich je možné podhodnotenie emisií  $NO_2$ . Úspešnosť modelových výsledkov  $f_{z,l}$  indikuje, že toto podhodnotenie emisií je rovnaké počas celého roka. Druhým faktorom môže byť, že model rozptyľuje emisie do vyšších vrstiev atmosféry ako v skutočnosti, čo sa prejaví na nižších prízemných koncentráciách. Pre rok 2015 sú rozdiely medzi

nameranými a modelovými koncentraciami menšie, no pre malý počet staníc s platnými meraniami nemožno uzatvárať z týchto dát závery.



Obr.5: Hodnoty  $f_{zl}$  a rozdielu zimných a letných koncentrácií za rok 2017 pre stanice NMSKO.

Na Obr. 5 sú zobrazené hodnoty  $f_{zl}$  a rozdiel priemerných zimných a ročných koncentrácií z meraní staníc NMSKO za rok 2017. Pre rôzne typy staníc tu možno badať rozdielne trendy. Dopravné stanice dosahujú v priemere najmenšie hodnoty  $f_{zl}$  – je to z dôvodu, že sú celoročne vystavované vysokým koncentraciám  $\text{NO}_2$  z dopravy, a preto zimné navýšenie emisií  $\text{NO}_2$  z vykurovania tvorí na týchto staniciach menší podiel z celoročných emisií. Naopak, stanice vidieckeho pozadia dosahujú vyššie hodnoty  $f_{zl}$ , popri nižších hodnotách rozdielu priemerných zimných a letných koncentrácií. To je spôsobené nízkymi koncentraciami  $\text{NO}_2$  počas celého roka, kde aj menšie navýšenie počas vykurovacej sezóny spôsobí niekoľkonásobné navýšenie koncentrácií oproti letu. Pre stanice mestského a prímestského pozadia pre rôzne hodnoty  $f_{zl}$  nebadáť veľké rozdiely medzi priemernými zimnými a letnými koncentraciami.

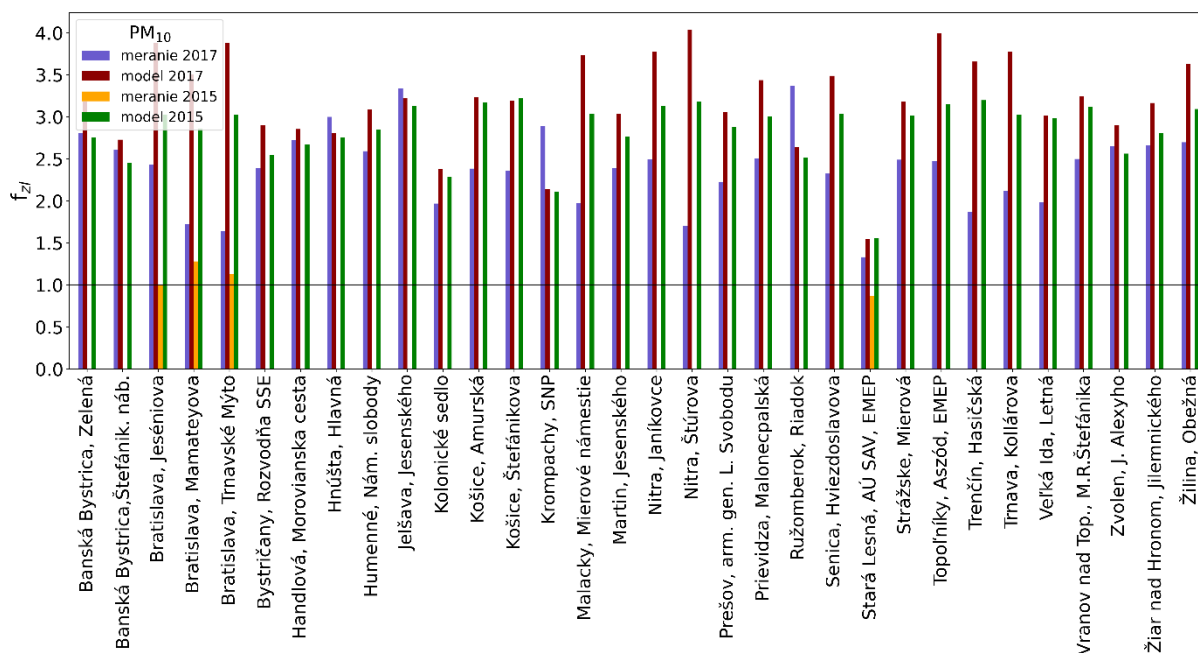


Obr.6: Priemerné hodnoty  $f_{zl}$  a rozdielu zimných a letných koncentrácií  $\text{NO}_2$  za rok 2017 pre rôzne typy staníc. Plný krúžok – merania, prázdny krúžok – model.

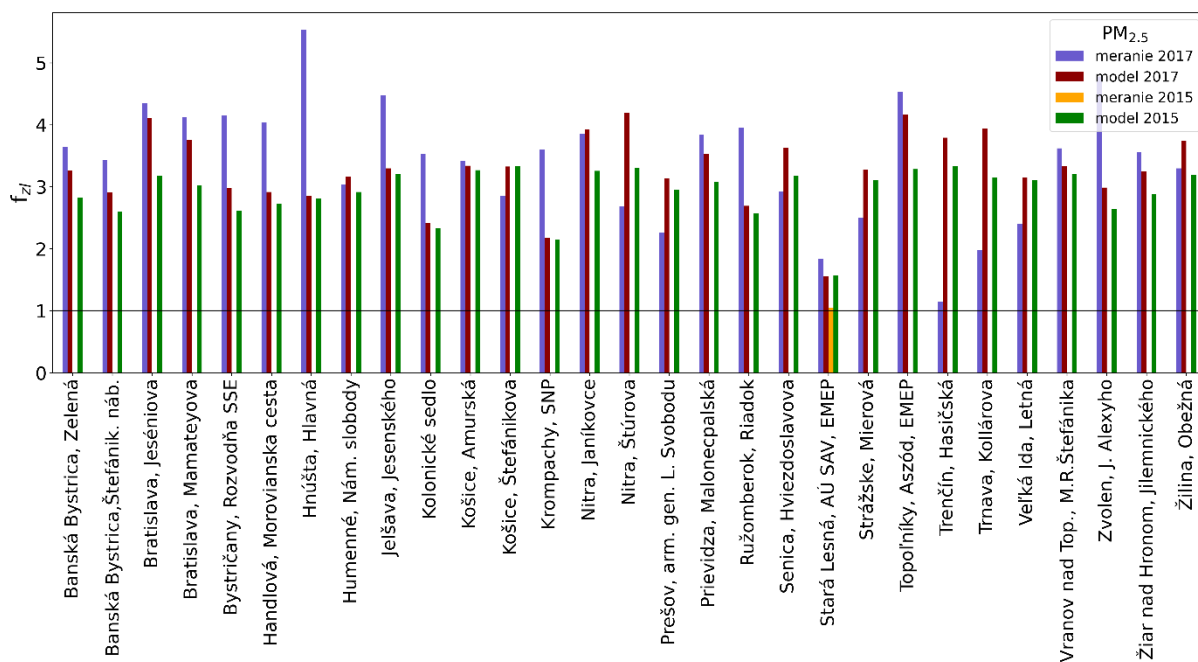
Rozdiely medzi výsledkami pre jednotlivé typy staníc sú jasne badateľné z Obr. 6, kde sú pre porovnanie vykreslené aj modelové hodnoty. Stanicu prímestského pozadia – BA, Jeséniova, sme pre účely grafu zaradili medzi stanice mestského pozadia. Z Obr. 6 vidíme, že hodnoty  $f_{z1}$  z modelu a z merania sú pre mestské pozadové a vidiecke pozadové stanice v pomerne dobrej zhode. Pre dopravné stanice je tento rozdiel väčší, keďže regionálny model dobre nezachytáva koncentrácie v blízkosti ciest. Výsledky modelu sú najbližšie k meraniam pre stanice vidieckeho pozadia, ktoré sú vzdialené od emisných zdrojov, a teda sú pre porovnanie s modelom najreprezentatívnejšie. Avšak aj pre tieto stanice model podhodnocuje rozdiel priemerných teplôt o približne  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , čo môže v odľahlých oblastiach tvoriť značnú časť tamojších koncentrácií.

## B. $\text{PM}_{10}$ a $\text{PM}_{2,5}$

Z Obr. 7 vidíme, že modelové hodnoty  $f_{z1}$  pre  $\text{PM}_{10}$  sú pre väčšinu staníc vyššie ako pre namerané dáta. Z Obr. 8 vidíme, že pre  $\text{PM}_{2,5}$  je to zväčša naopak. Pravdepodobná príčina leží v podcenení letných emisií  $\text{PM}_{10}$  (prašnosť polí, poľnohospodárstvo, saharský piesok a pod.) a v podcenení zimných emisií  $\text{PM}_{2,5}$  (vykurovanie). Avšak pre veľa staníc výsledky modelového  $f_{z1}$  aj pre  $\text{PM}$  pomerne dobre korešpondujú s meraniami, čo indikuje pomerne dobré rozloženie emisií a variabilitu rozptylových podmienok v modeli počas roka.

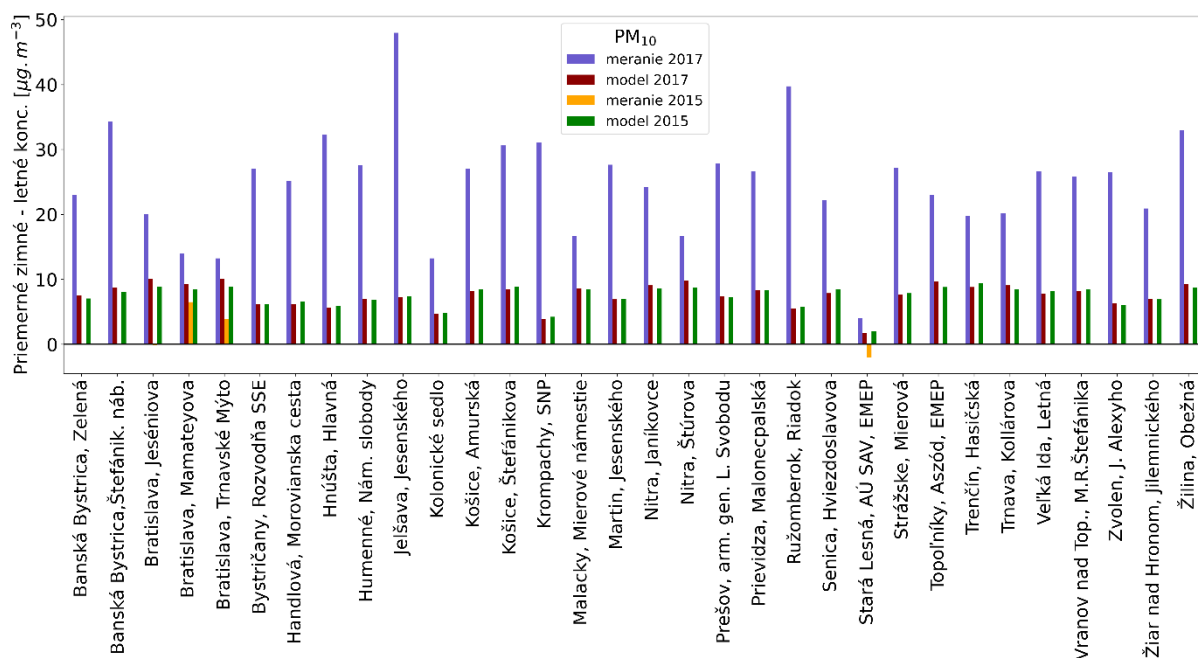


Obr.7: Pomer priemerných zimných a letných koncentrácií  $\text{PM}_{10}$  na meracích staniciach NMSKO v porovnaní s modelovými dátami.

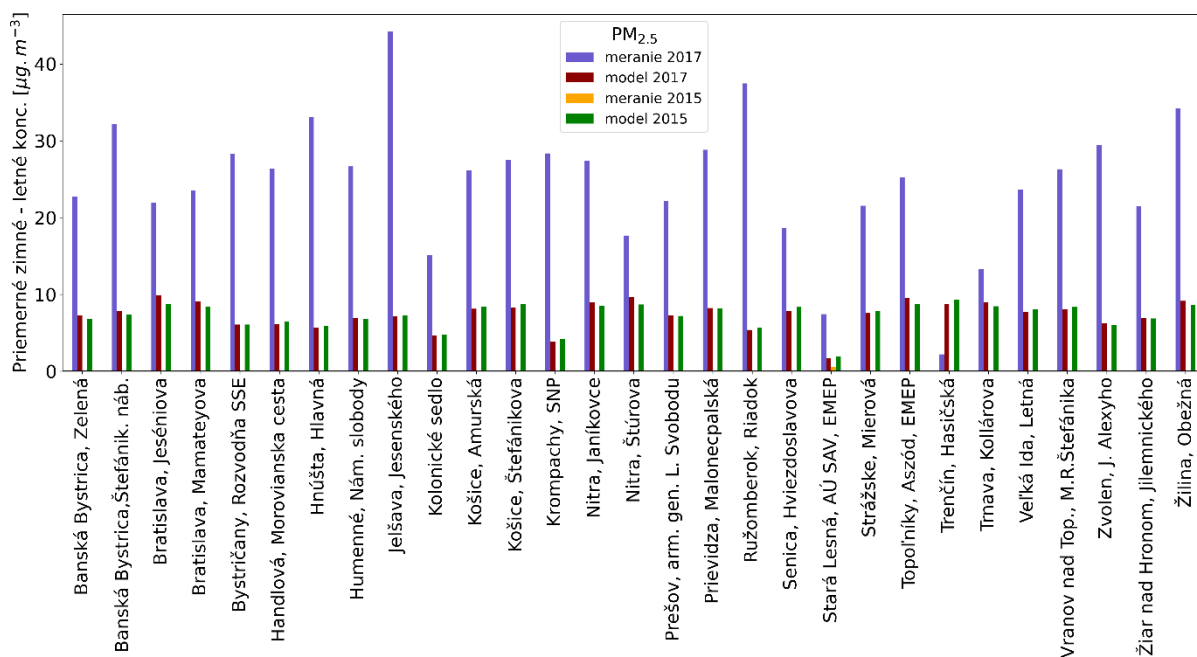


Obr.8: Pomer priemerných zimných a letných koncentrácií  $PM_{2,5}$  na meracích stanicích NMSKO v porovnaní s modelovými dátami.

Pre rozdiely priemerných zimných a letných koncentrácií pevných častíc (Obr. 9 a 10) pozorujeme rovnaký trend ako pri  $NO_2$ , teda výrazne väčšie hodnoty pre merania ako pre modelové hodnoty. Tieto rozdiely sú spôsobené tými istými príčinami, ako pre  $NO_2$ . Rozdiely zimných a letných koncentrácií sú približne rovnaké pre obe frakcie na väčšine staníc, čo znamená, že nárast zimných koncentrácií  $PM_{10}$  je spôsobený najmä nárastom jemnej frakcie  $PM_{2,5}$ .

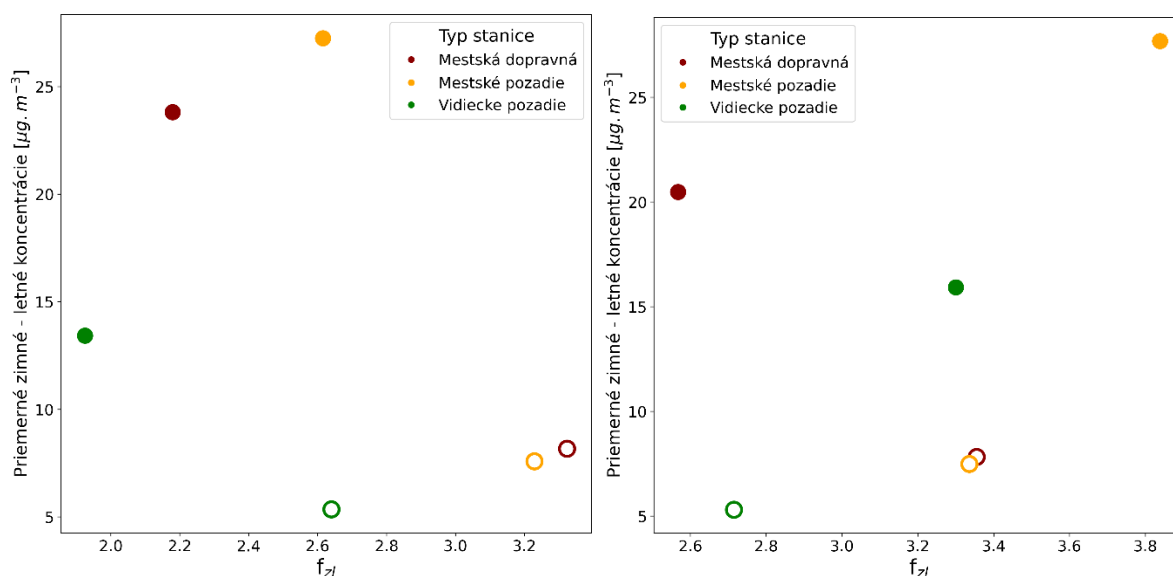


Obr.9: Rozdiel priemerných zimných a letných koncentrácií  $PM_{10}$  na meracích stanicích NMSKO v porovnaní s modelovými dátami.



Obr.10: Rozdiel priemerných zimných a letných koncentrácií PM<sub>2,5</sub> na meracích staniaciach NMSKO v porovnaní s modelovými dátami.

Na Obr. 11. sú zobrazené hodnoty  $f_{zi}$  a rozdiely priemerných zimných a letných koncentrácií PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> pre rôzne typy staníc, v porovnaní s modelovými hodnotami. Na rozdiel od PM<sub>2,5</sub> (Obr. 11 vpravo) a NO<sub>2</sub> (Obr. 6), stanice vidieckeho pozadia dosahujú pre namerané koncentrácie PM<sub>10</sub> (Obr. 11 vľavo) v priemere najnižšie hodnoty  $f_{zi}$  spomedzi typov staníc. Je to spôsobené pravdepodobne vyšším podielom emisií PM<sub>10</sub> z prašnosti počas leta. Stanice mestského pozadia dosahujú pre PM<sub>2,5</sub> značne vyššie hodnoty  $f_{zi}$  ako pre PM<sub>10</sub>. To je pravdepodobne spôsobené tým, že PM<sub>2,5</sub> vzniká najmä pri vykurovaní, ktoré tvorí značný podiel emisií v obytných zónach mestského pozadia.



Obr.11: Priemerné hodnoty  $f_{zi}$  a rozdielu zimných a letných koncentrácií PM<sub>10</sub> (vľavo) a PM<sub>2,5</sub> (vpravo) za rok 2017 pre rôzne typy staníc. Plný krúžok – merania, prázdny krúžok – model.

Pre modelové hodnoty pozorujeme pre obe PM podobný trend, kedy model predpokladá najmenšie  $f_{zi}$  aj rozdiel zimných a letných koncentrácií pre stanice vidieckeho pozadia a pre dopravné

a mestské pozad'ové stanice predpokladá vyššie hodnoty. Zároveň sú tieto hodnoty veľmi podobné pre obe PM. Môžeme zhodnotiť, že v prípade PM model vyhodnocuje variabilitu počas roka horšie ako pre NO<sub>2</sub> a aj pre stanice vidieckeho pozadia sú výsledky silne podhodnotené.

### 3. Modelovanie sezonality kvality ovzdušia

Modely kvality ovzdušia vyžadujú ako jeden z hlavných vstupov emisné polia. Národné emisné inventáre však často poskytujú emisné dáta len v agregovanej forme za celý rok pre dané odvetvie a palivo. Pre použitie v numerických modeloch je nutné emisie rozčleniť do modelovej domény a vhodne určiť časový priebeh emisií počas roka. Tento časový priebeh by mal vhodne zachytávať sezónnu variabilitu.

Vo vyššie spomenutých regionálnych simuláciách modelom CMAQ pre roky 2015 a 2017 sme pre výpočet emisií z lokálnych kúrenísk použili metodiku [3] a pre ich časové profily metodiku, zahrnutú v emisnom preprocesori FUME [1] (ďalej ako FUME). Emisné časové profily FUME sú počítané na základe rozdielu priemernej vnútornej teploty (21°C) s priemernou dennou vonkajšou teplotou, ale len pre vykurovacie dni – dni kedy priemerná denná teplota klesne pod 13°C. Pre dni s vyššou priemernou teplotou sa neuvažujú žiadne emisie z vykurovania. Takto model zachytí variabilitu emisií počas roka. Okrem ročného chodu FUME zahŕňa aj jednotný denný chod emisií. V našich uvažovaných simuláciách bol pre celú modelovú doménu vypočítaný len jeden priemerný emisný profil. V súčasnosti už FUME počíta emisné profily v jednotlivých bunkách domény.

Copernicus [2] poskytuje metodiku pre výpočet ročného priebehu emisií na základe konceptu **heating degree days (HDD)**, ktoré sú pre každú bunku domény  $[x, y]$  a deň  $d$  definované nasledovne:

$$HDD(x, y, d) = \max(T_b - T_{2m}(x, y, d), 1)$$

$T_b$  je referenčná teplota, ktorá predstavuje najnižšiu vonkajšiu teplotu, pri ktorej budovy nie je nutné vykurovať pre zachovanie komfortnej vnútornej teploty (pre Európu je odporúčaná hodnota 15,5°C).  $T_{2m}(x, y, d)$  je denný priemer vonkajšej teploty v štandardnej 2 metrovej výške pre bunku  $[x, y]$  a deň  $d$ . Pomocou  $HDD(x, y, d)$  je možné ďalej dopočítať denný emisný faktor  $F(x, y, d)$ :

$$F(x, y, d) = \frac{HDD(x, y, d) + f * \overline{HDD(x, y)}}{(1 + f) * \overline{HDD(x, y)}}$$

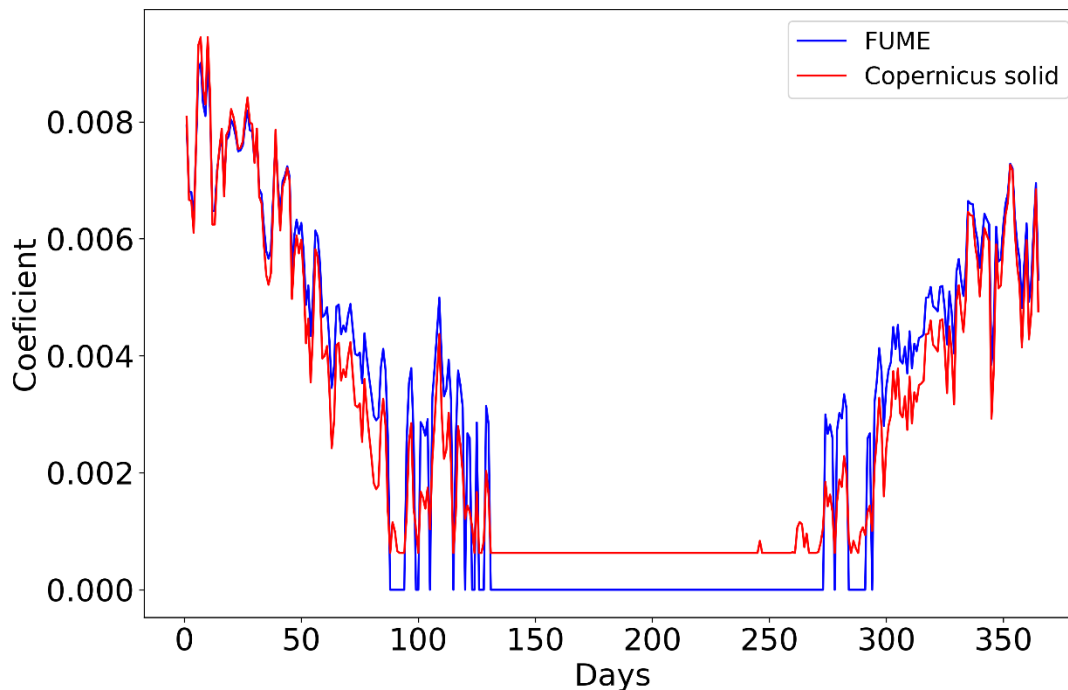
kde  $\overline{HDD(x, y)}$  je priemerná hodnota  $HDD(x, y, d)$  pre danú bunku za celý rok a  $f$  je koeficient zohľadňujúci emisie z ohrevu vody a varenia, ktoré sa považujú za konštantné po celý rok. Hodnota parametra  $f$  sa líši pre rôzne typy paliva – v prípade emisií z pevných palív  $f = 0.093$ . Emisný faktor  $F(x, y, d)$  je následne vhodne nanormovaný. Copernicus v sebe tiež zahŕňa aj denné profily emisií, ktoré sa líšia pre rôzne znečisťujúce látky a boli určené na základe meraní. Tieto profily sa tiež líšia pre vyspelé a rozvojové krajiny. Emisné profily Copernicus sú dostupné v databáze ECCAD [3], odkiaľ si ich užívateľ môže stiahnuť.

Na Obr. 12 sú zobrazené emisné profily FUME a Copernicus pre lokálne kúreniská, oba vypočítané pre bunku modelovej domény, do ktorej spadá stanica Gánovce. Profil Copernicusu je pre tuhé palivá. Profily sú skoro identické pre najchladnejšie dni roka, no s narastajúcou priemernou dennou teplotou sa od seba vzdalujú. Stále však pomerne dobre navzájom korelujú počas väčšiny roka. Najväčší rozdiel medzi profilmi je evidentný počas letných mesiacov. Profil FUME tu má konštantnú hodnotu nula, keďže neuvažuje žiadne vykurovanie, zatiaľ čo profil Copernicusu uvažuje emisie z ohrevu vody a varenia.

Pre ilustráciu ročnej variability sme tiež vypočítali faktor  $f_{z1}$  z priemernej hodnoty profilov FUME a Copernicus na modelovej doméne. Priemerné profily bolo nutné použiť kvôli tomu, že v modelových bunkách, kde priemerná hodnota emisného profilu FUME počas leta bola nulová, by nebolo možné  $f_{z1}$  vypočítať. Pre profily Copernicus sme dostali hodnoty  $f_{z1} = 9.9$  pre tuhé palivá,  $f_{z1} = 7.3$  pre olejové palivá a  $f_{z1} = 6.7$  pre plyn. Hodnota  $f_{z1}$  je najmenšia pre plyn z toho dôvodu, že plyn sa



v najväčšej miere používa na ohrev vody aj varenie, a teda jeho variabilita počas roka je najmenšia. Naopak pre tuhé palivá je variabilita najväčšia, keďže sa používajú najmä na vykurovanie počas zimy. Pre profil FUME je  $f_{z1} = 81.4$  – takáto vysoká hodnota je dosiahnutá práve kvôli neuvažovaniu emisií z ohrevu vody a varenia počas leta.



Obr.12: Porovnanie ročného emisného profilu pre lokálne kúreniská v modeli FUME a metodiky Copernicus pre tuhé palivá pre stanicu Gánovce.

## Záver

V tomto príspevku sme zhodnotili variabilitu koncentrácií znečisťujúcich látok počas roka pre roky 2003-2019. Porovnali sme koncentrácie  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{2,5}$  vypočítané modelom CMAQ pre roky 2015 a 2017 s nameranými koncentraciami v sieti staníc NMSKO. Z analýzy výsledkov sme usúdili, že model pomerne úspešne zachytáva ročný chod koncentrácií, najmä pre  $\text{NO}_2$ , no výrazne ich podhodnocuje. To môže byť spôsobené podhodnotením emisných vstupov do modelu alebo tým, že model konštantne rozptyľuje koncentrácie znečisťujúcich látok nerealisticky do vyšších vrstiev atmosféry.

V druhej časti príspevku sme sa zaoberali ročnými profilmi emisií z lokálnych kúrenísk využívanými v regionálnych chemicko-transportných modeloch. Porovnali sme emisný profil FUME použitý v našich spomínaných simuláciách modelu CMAQ s profilom navrhnutým pre tento účel od Copernicusu. Profily sú skoro identické pre najchladnejšie mesiace roka, no pre letné mesiace sa výrazne líšia v dôsledku rozdielnych metodík. V budúcnosti plánujeme v našich simuláciách využívať emisný profil Copernicusu, ktorý aj počas letných mesiacov zahŕňa emisie z ohrevu vody a varenia, na rozdiel od profilu FUME, ktorý v letných mesiacoch vykurovanie neuvažuje.

## Literatúra

---

- [1] Benešová, N., Belda, M., Eben, K., Geletič, J., Huszár, P., Juruš, P., Krč, P., Resler, J. and Vlček, O. (2018): New open source emission processor for air quality models. In Sokhi, R., Tiwari, P. R., Gállego, M. J., Craviotto Arnau, J. M., Castells Guiu, C. & Singh, V. (eds) *Proceedings of Abstracts 11th International Conference on Air Quality Science and Application*. DOI: 10.18745/PB.19829. (pp. 27). Published by University of Hertfordshire. Paper presented at Air Quality 2018 conference, Barcelona, 12-16 March.
- [2] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS): D81.6.2.1: Report on emission temporal profiles for the global and regional scales, 2019.
- [3] ECCAD database: <https://eccad3.sedoo.fr/#CAMS-REG-TEMPO>
- [4] Krajčovičová, J., Matejovičová, J., Nemček, V., High-resolution residential emission model for use in the air quality modelling, *Meteorologický časopis* 2020 číslo 1, 2020
- [5] Štefánik, D., Matejovičová, J., Krajčovičová, J., Nemček, V., Beňo, J.: Určenie koncentrácií PM10 na Slovensku v roku 2017 chemicko-transportným modelom CMAQ, 2019.
- [6] Štefánik, D., Matejovičová, J., Krajčovičová, J., Šedivá, T., Nemček, V., Beňo, J.: Comparison of two methods of calculating NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> transboundary pollution by CMAQ chemical transport model and the assessment of the non-linearity effect, *Atmospheric pollution research*, 2020.
- [7] United States Environmental Protection Agency. (2010). CMAQ (Version 4.7.1) [Software]. Available from <https://doi:10.5281/zenodo.1079879>

## Abstract

---

Concentrations of pollutants in the air change throughout the year depending on the emissions and dispersion conditions. During the winter, an increase in concentrations of majority of the troublesome pollutants is observed, mainly NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, which are the products of combustion from heating. In this paper, we analyse diurnal variation of concentrations of these pollutants for years 2003-2019, using simple statistical methods. For years 2015 and 2017, we compare the measured concentrations with the results of the CMAQ air-quality model with 4,7 x 4,7 km resolution. The results are analyzed for individual stations, as well as groups of stations, for NO<sub>2</sub> and PM. We concluded that the model predicts the variation of the concentrations during the year quite well, especially for NO<sub>2</sub>. However, the model results are heavily underestimated compared to the station's measurements, even for the rural background stations, which are the most representative for comparison with the model.

In the last part of the paper, we present two methods for calculation of yearly emission profiles for residential heating. The first profile, implemented in the Flexible Universal Processor for Modeling Emissions (FUME), was used in our 2015 and 2017 CMAQ simulations. The profile was computed based on the mean daily temperature of the whole domain, resulting in one emission profile for the whole domain. The FUME profile was compared to the profile computed with the methodology of Copernicus Atmosphere Monitoring Service. This profile is based upon the heating degree days concept and is computed for each grid cell individually. The Copernicus profile takes into account the emissions from water heating and cooking, which are considered to be constant during the year. This creates the largest differences between the two profiles, since the FUME profile considers the emissions only for the heating days, with the outside temperature below 13°C. Therefore, during the summer, the profiles differ by a constant offset, given by the Copernicus profile for water heating and cooking. For the winter months, the profiles are almost identical, with the differences growing towards the warmer months of the year. In the future, we are planning to use the Copernicus emission profile in our simulations.