

Cezhraničný prenos znečisťujúcich látok na území Slovenska

Dušan Štefánik

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15, Bratislava

dusan.stefanik@shmu.sk

Anotácia

Cezhraničný prenos znečisťujúcich látok na území Slovenskej republiky bol vypočítaný dvomi metódami pomocou chemicko-transportného modelu CMAQ pre NO₂, PM₁₀ a PM_{2.5} v roku 2015. Odstránením biasu modelu bol odhadnutý reálny cezhraničný prenos znečisťujúcich látok, ako aj príspevok cezhraničného prenosu k celkovým koncentráciám. Taktiež bola odhadnutá chyba výpočtu, ktorá pozostáva z chyby modelu a nelinearity chemického mechanizmu v chemicko-transportnom modeli.

Kľúčové slová: cezhraničný prenos, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, chemicko-transportný model

Anotation

Transboundary pollution in Slovakia using CMAQ chemical transport model was calculated for NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} in 2015. The actual average of concentration of transboundary pollution and its contribution to the total pollution were estimated by removing bias from the model. The error of the results which comes from the non-linearity in chemical mechanisms and from the model performance is estimated and discussed.

Keywords: transboundary pollution, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, chemical-transport model

1 Úvod

Pod pojmom *cezhraničný prenos znečisťujúcich látok* rozumieme hodnoty koncentrácií znečisťujúcich látok v ovzduší na území daného štátu, ktorých pôvod je v emisiách pochádzajúcich zo zdrojov nachádzajúcich sa mimo územia tohto štátu.

Ohodnotenie cezhraničného prenosu znečisťujúcich látok patrí k hlavným témam modelovania a monitorovania kvality ovzdušia. Táto problematika je reflektovaná medzinárodnou komunitou niekoľko desaťročí. V roku 1979 bol v Ženeve podpísaný CLRTAP - Dohovor Európskej hospodárskej komisie Organizácie spojených národov o diaľkovom cezhraničnom znečisťovaní ovzdušia [1]. Znalosť cezhraničného prenosu je taktiež deklarovaná, ako jedna z priorít v smernici 2008/50/EK, v rámci ktorej je požiadavka kvantifikácie lokálneho, regionálneho a cezhraničného príspevku ku koncentráciám znečisťujúcich látok, ktoré prekračujú limitnú hodnotu.

1.1 Konfigurácia modelu CMAQ a meteorologického modelu WRF

Na výpočet cezhraničného prenosu znečisťujúcich látok bol použitý model CMAQ (Community Multiscale Air Quality modeling system) vyvíjaný v EPA National Exposure Research Laboratory in Research Triangle Park,

NC [2, 3]. Bola použitá verzia CMAQv4.7.1 s chemickým modulom pre plynné látky cb05cl a aerosólovým modulom AERO4. Simulácia bola vykonaná na doméne s 103×184 mriežkovými bodmi s rozlíšením $4,7 \times 4,7$ km (Obr. 2). Táto doména bola vnorená do väčšej s 169×134 mriežkovými bodmi a priestorovým rozlíšením $14,1 \times 14,1$ km, z ktorej boli vypočítané okrajové podmienky.

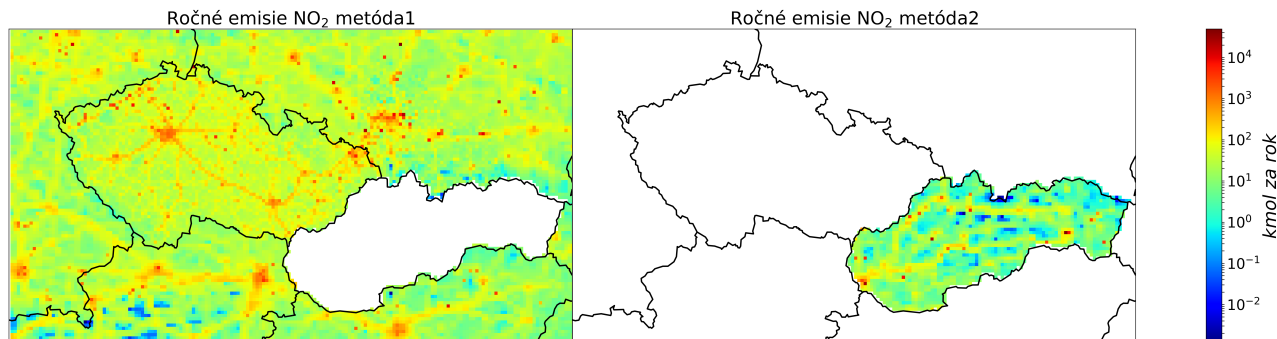
Hodinové meteorologické polia boli získané pomocou modelu WRFv3.9.1 [4] s počiatočnými a okrajovými podmienkami z ECMWF reanalyzovaných dát. Podrobnejšie je konfigurácia modelu WRF, ako aj základné vlastnosti modelu CMAQ opísané v [5].

Emisie s hodinovým časovým priebehom, boli pripravené modelom FUME pracovníkmi ČHMÚ [6].

1.2 Metódy výpočtu cezhraničného prenosu

Cezhraničný prenos znečisťujúcich látok bol v tejto práci vypočítaný pomocou dvoch rôznych metód, ktoré sú označené ako metóda1 a metóda2.

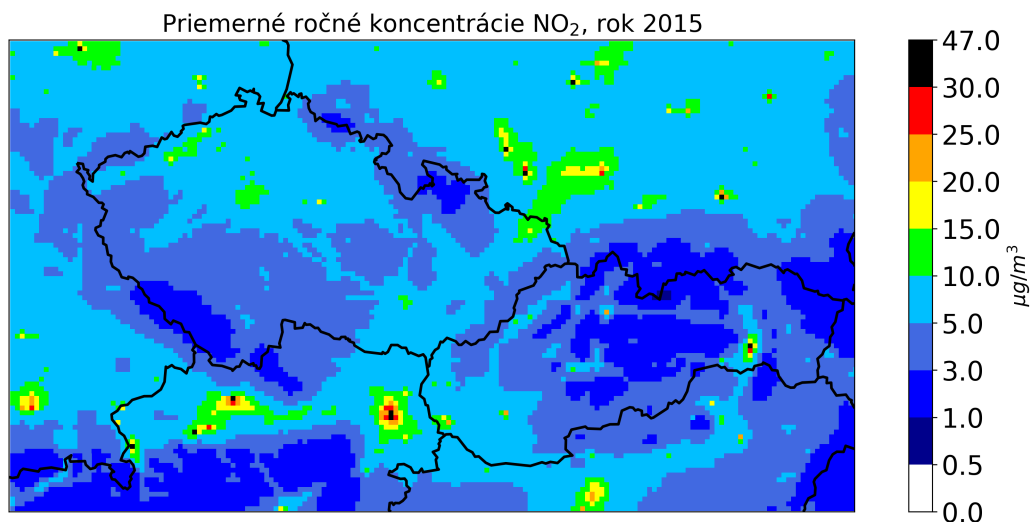
- Metóda1 je založená na výpočte cezhraničného prenosu pomocou modelu, do ktorého sa nezarátajú emisie z územia Slovenskej republiky, pričom emisie z ostatného územia na doméne ostávajú nezmenené. Táto situácia je ilustrovaná na Obr. 2 (mapa vľavo).
- Metóda2 je naopak založená na výpočte, do ktorého sa zarátavajú len slovenské emisie, zatiaľ čo emisie zo zvyšku domény sú nulové, vid' Obr. 2 (mapa vpravo). Pre okrajové podmienky koncentrácií znečisťujúcich látok sú použité hodnoty pre čistý vzduch. Koncentrácie znečisťujúcich látok pochádzajúcich z cezhraničných zdrojov sú následne vypočítané odčítaním takto konfigurovaného modelu od plného behu modelu. Pod plným behom modelu sa rozumie simulácia, ktorá berie do úvahy všetky emisie v doméne.



Obr. 1: Celkové ročné emisie NO_2 v roku 2015 pre dve metódy

Rozdiel vo výsledkoch medzi dvomi vyššie uvedenými metódami je spôsobený nelinearitou chemických mechanizmov v chemicko-transportných modeloch. Táto nelinearita spôsobuje chybu vo vypočítanom cezhraničnom prenose a je prítomná pri akejkoľvek metóde jeho výpočtu. V prezentovanej práci je táto chyba vo výpočte odhadnutá ako polovica z absolútneho rozdielu vypočítaných koncentrácií medzi metódou1 a metódou2, keďže tieto metódy predstavujú dva extrémne prípady výpočtu cezhraničného prenosu.

2 Výsledky cezhraničného prenosu pre NO_2

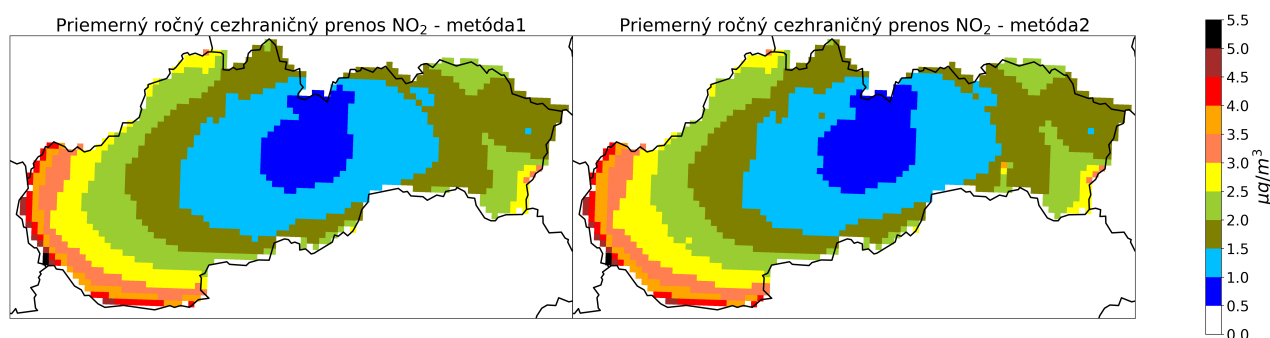
Obr. 2: Priemerné ročné povrchové koncentrácie NO₂ v roku 2015

2.1 Plný beh modelu pre NO₂

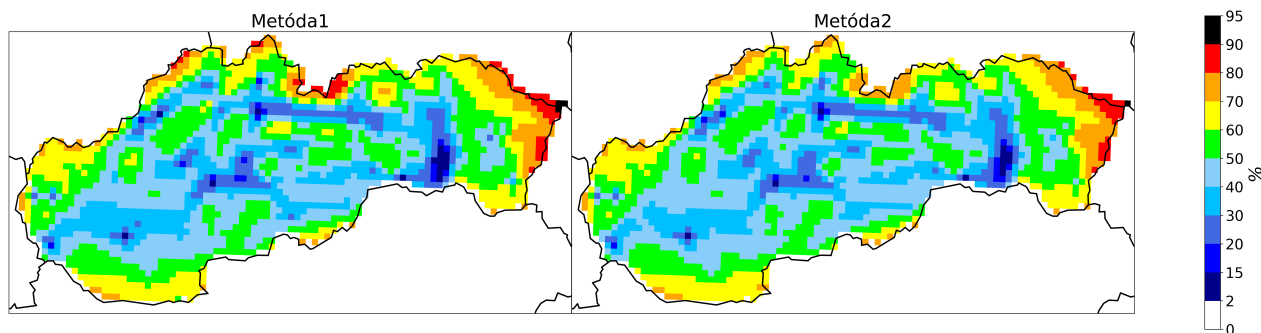
Priemerné ročné povrchové koncentrácie NO₂ v roku 2015 pre plný beh modelu sú prezentované na Obr. 2. Z porovnania modelu a priemerných ročných koncentrácií nameraných na 101 vidieckych a predmestských pozadových staniách [7] vychádza korelačný koeficient $r = 0.66$, priemerný bias $-4.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a RMSE $6.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Z porovnania nameraných hodinových koncentrácií s modelom v rámci metodiky FAIRMODE [8] vychádza, že výsledky modelovania NO₂ spĺňajú minimálne kritéria na použitie modelu pre podporu politík.

2.2 Cezhraničný prenos NO₂

Vypočítaný cezhraničný prenos NO₂ na Slovensku a jeho príspevok k celkovým koncentráciám je na Obr. 3 a na Obr. 4. Vykreslené priemerné ročné koncentrácie sú získané z hodinových údajov vypočítaných modelom CMAQ.

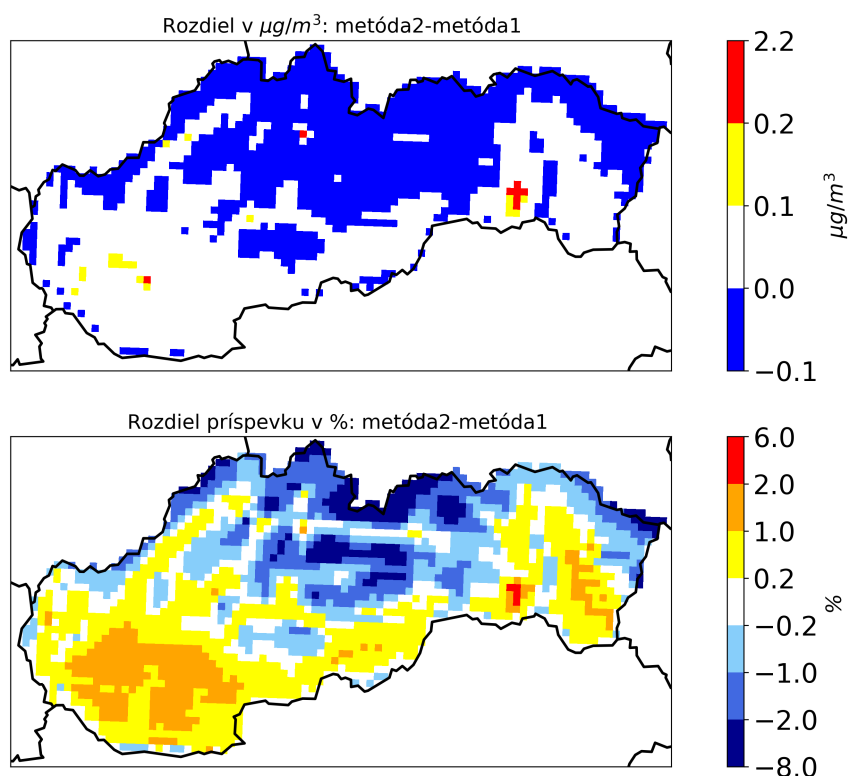
Obr. 3: Priemerný ročný cezhraničný prenos NO₂ v roku 2015 pre dve metódy

Na Obr 5 môžeme vidieť, že okrem miest, ktoré sa vyznačujú vysokými celkovými koncentraciami NO₂, je rozdiel medzi oboma metódami v rozmedzí $(-0.2, 0.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Metóda1 predpovedá mierne vyššie cezhraničné koncentrácie na miestach, ktoré sa vyznačovali nižšími celkovými koncentraciami NO₂ (napr. hornaté územia,



Obr. 4: Príspevok cezhraničného prenosu k celkovej koncentrácii NO_2 v roku 2015 pre dve metódy

lesy, lúky), kým pre miesta s celkovými vyššími koncentráciami predpovedá metóda1 nižšie cezhraničné znečistenie ako metóda2. Pre miesta s veľmi vysokým celkovým znečistením dáva metóda2 vysoké predpovede cezhraničného prenosu. Toto je spôsobené aj nelinearitou chemických mechanizmov v modeli, ale aj chybou vzniknutou kvôli odčítavaniu dvoch rôznych behov modelu v metóde2. Preto treba byť opatrný pri interpretácii výsledkov v týchto miestach pri použití metódy2.



Obr. 5: Rozdiel medzi dvomi metódami vo vypočítaných koncentráciách cezhraničného prenosu pre NO_2 (horná mapa) a rozdiel v jeho podieli k celkovému znečisteniu v roku 2015 (spodná mapa)

2.3 Odhad skutočného cezhraničného prenosu NO_2 a chyby odhadu

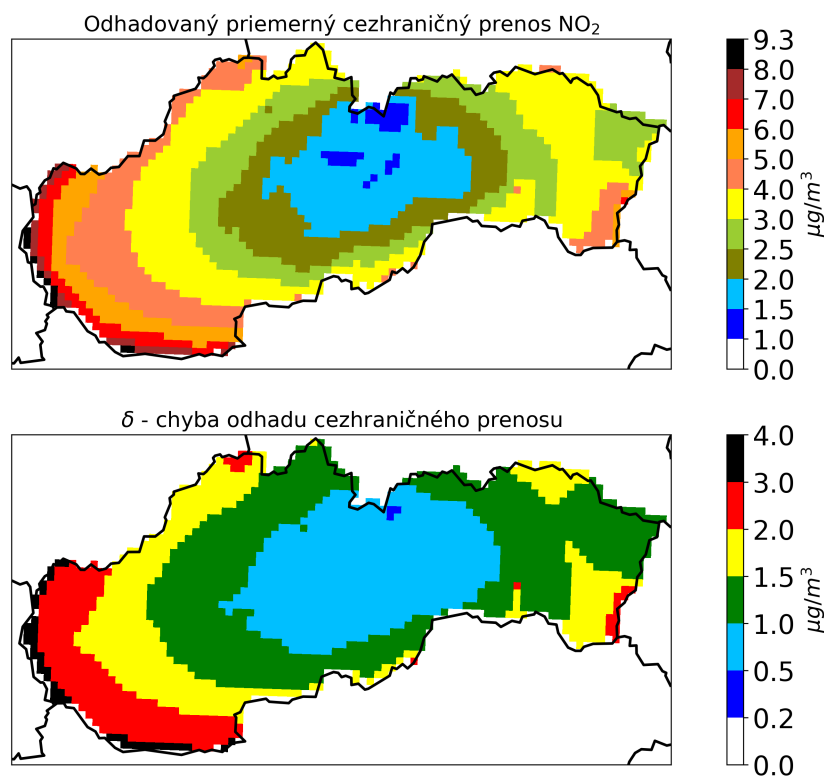
Pri odhadovaní cezhraničného prenosu znečisťovaných látok sú prítomné dva druhy neurčitostí. Jedna je kvôli nelineárnosti chemických rovníc, druhá vyplýva z nedokonalosti modelu a jeho vstupov.

V predloženej práci je navrhnuté brať ako konzervatívnu chybu za nelinearitu chemického mechanizmu polovicu absolútneho rozdielu medzi vypočítanými cezhraničnými koncentraciami pomocou metódy1 a metódy2. Táto chyba je pre každú bunku mriežky prezentovaná polovičnou hodnotou z vrchnej mapy na Obr. 5. Priemerná hodnota z výsledkov pre metódu1 a metódu2 sa potom berie ako predpoveď modelu pre cezhraničný prenos.

Chybu, ktorá pochádza z nedokonalosti modelu a najmä z nedokonalých meteorologických a emisných vstupov, je pre cezhraničné koncentrácie pomerne ťažké odhadnúť, keďže tie sa súčasnými technológiami nedajú zmerať.

Nech C_R predstavuje skutočné koncentrácie konkrétnej znečisťujúcej látky v danej bunke a T_R je v nej skutočná koncentrácia pochádzajúca z cezhraničného prenosu, potom platí

$$C_R = C_M + \Delta_C, \quad \text{a} \quad T_R = T_M + \Delta_T, \quad (1)$$



Obr. 6: Odhadovaný priemerný cezhraničný prenos $\text{NO}_2 - T_R$ (horná mapa) a chyba odhadu δ (dolná mapa) z rovnice (3)

pričom C_M and T_M sú hodnoty pre tieto veličiny vypočítané z modelu. Potom Δ_C a Δ_T predstavujú chybu modelu a vypočítaného cezhraničného prenosu v danej bunke. Dané chyby možno prepísať nasledovným spôsobom

$$\Delta_C = c C_M, \quad \text{a} \quad \Delta_T = t T_M. \quad (2)$$

Ak označíme novozavedený koeficient c pre bunky vo vzdialených miestach od zdroja ako c_{rem} , je rozumné predpokladať, že koeficient t z rovnice (2) je rovnakého rádu ako koeficient c_{rem} , teda $t \sim c_{rem}$. Z tohto dôvodu sa pre účely tejto práce predpokladá $t \equiv c_{rem}$.

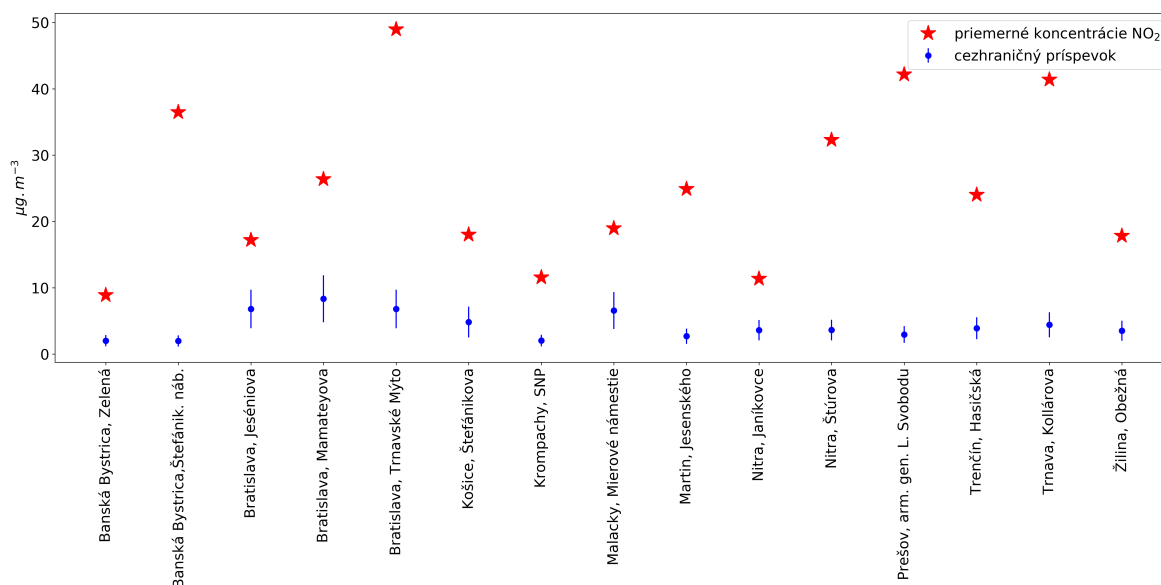
Z porovnania plného behu modelu a 101 vidieckych a predmestských pozaďových staníc v rámci našej domény, obdržíme hodnotu $c_{rem} = 0.76 \pm 0.75$. Berúc do úvahy predošlé predpoklady, rovnicu (1) a tiež chybu z nelinearity chemického mechanizmu odhadujeme cezhraničné znečistenie NO₂ na území Slovenska ako

$$T_R = 1.76 T_{\bar{M}} \pm \delta, \quad \delta = \sqrt{(0.75T_{\bar{M}})^2 + T_{\hat{M}}^2}, \quad (3)$$

kde sme zaviedli označenie

$$\begin{aligned} T_{\bar{M}} &= (T_M(\text{method1}) + T_M(\text{method2})) / 2, \\ T_{\hat{M}} &= |T_M(\text{method1}) - T_M(\text{method2})| / 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Odhadované cezhraničné znečistenie NO₂ a chyba odhadu z rovnice (3) sú vykreslené na Obr. 6. Odhadované cezhraničné znečistenie na miestach meracích staníc je vykreslené na Obr. 7.



Obr. 7: Odhadovaný priemerný cezhraničný prenos na meracích staniciach a priemerná meraná koncentrácia NO₂ v roku 2015

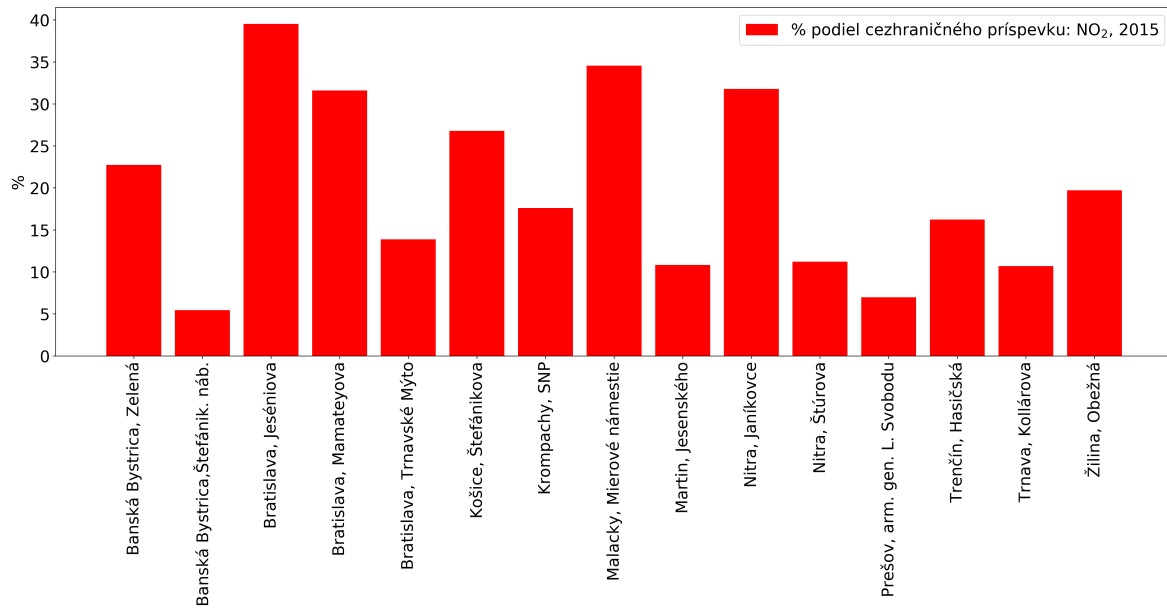
Dôležité je tiež poznať príspevok cezhraničného prenosu k celkovému znečisteniu. Použitím rovníc (1) a (2) môžeme pre každú bunku mriežky napísať

$$\frac{T_R}{C_R} = \frac{T_M + t T_M}{C_M + c C_M}. \quad (5)$$

V prípade miest, na ktorých sa nachádzajú meracie stanice, a teda poznáme v nich skutočnú hodnotu C_R , môžeme príspevok cezhraničného prenosu jednoducho vypočítať pomocou rovníc (3) a (5). Výsledok vyjadrený v percentách je na Obr. 8.

Avšak v prípade miest, kde chýbajú údaje o celkových koncentráciách C_R , musíme tieto hodnoty odhadnúť. Nanešťastie koeficient c sa mení omnoho viac ako koeficient t , o ktorom sme predpokladali, že je rovný c_{rem} . Koeficient c závisí od typu miesta, do ktorého daná bunka spadá. Je iný pre mestské územia a iný pre areály umiestnené ďaleko od zdrojov. Pre zjednodušenie navrhujeme, že koeficient c v danej bunke mriežky je

$$c = (\text{URB}) c_{urb} + (1 - (\text{URB})) c_{rem}, \quad (6)$$



Obr. 8: Percentuálny podiel cezhraničného prenosu k celkovým koncentráciám NO₂ na meracích stanicích

kde (URB) je pomer mestskej zástavby v danej bunke získaný z CORINE databázy a c_{urb} je koeficient c obdržaný z porovnania plného behu modelu s mestskými požadovými stanicami na Slovensku. Zo štyroch prevádzkovaných staníc s dostatočným zberom dát v roku 2015 sme obdržali $c_{urb} = 1.08 \pm 0.36$.

Aby sme sa vyhli nerealisticky vysokým koncentráciám C_R , je koeficient c redukovaný pre bunky, v ktorých jeho použitie vedie na hodnoty C_R vyššie ako je priemerná ročná hodnota pre všetky mestské požadové stanice na Slovensku $16.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Redukcia je potom robená nasledovným spôsobom: Ak daná bunka spĺňa podmienku $26.36 * (\text{URBAN}) > 16.1$, priradí sa jej celková koncentrácia rovná $26.36 * (\text{URBAN}) \mu\text{g}/\text{m}^3$, inak sa jej priradí koncentrácia $16.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Redukované c je potom odvodené z takto získanej koncentrácie pre danú bunku. Hodnota $26.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ je najvyššia priemerná ročná hodnota koncentrácie meraná na mestskej požadovej stanici v roku 2015. Iba územia v okolí Bratislavy a Košíc a pár menších území boli ovplyvnené touto redukciovou.

Rovnicu (5) možno prepísať ako

$$\frac{T_R}{C_R} = f(t, c) \frac{T_{\bar{M}}}{C_M} \pm \delta_{M\%} \quad \text{with} \quad f(t, c) = \frac{1+t}{1+c}, \quad (7)$$

kde $\delta_{M\%} = \frac{T_{\bar{M}}}{C_M}$ je chyba pochádzajúca z použitia priemeru pre dve metódy výpočtu cezhraničného znečistenia $T_{\bar{M}}$ v rovnici (7).

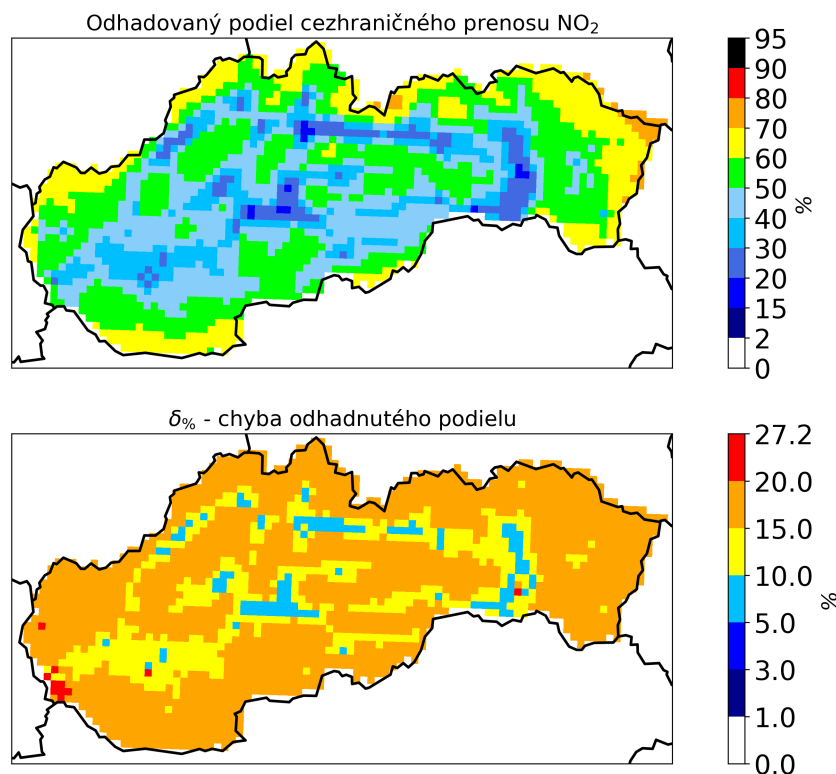
Funkcia $f(t, c)$ pre každú bunku mriežky bola vypočítaná pomocou Monte-Carlo metódy použitím koeficientu t s hodnotami 0.76 ± 0.75 a koeficientu c z rovnice (6) a jeho redukcie, ako bolo opísané vyššie, pričom jeho chyba bola daná ako

$$\delta_c = \sqrt{((\text{URB})\delta_{urb})^2 + ((1 - (\text{URB}))\delta_{rem})^2} \quad (8)$$

kde $\delta_{urb} = 0.36$ a $\delta_{rem} = 0.75$. Keďže $T_R < C_R$, nasledovná podmienka musela byť splnená

$$c > (1+t) \frac{T_{\bar{M}}}{C_M} - 1. \quad (9)$$

Na Obr. 9 je vykreslený výsledný odhadovaný priemerný ročný príspevok cezhraničného prenosu k celkovému znečisteniu NO₂ a jeho chyba. Táto chyba je vypočítaná ako



Obr. 9: Odhadovaný priemerný ročný príspevok cezhraničného prenosu k celkovému znečisteniu NO_2 a chyba odhadu

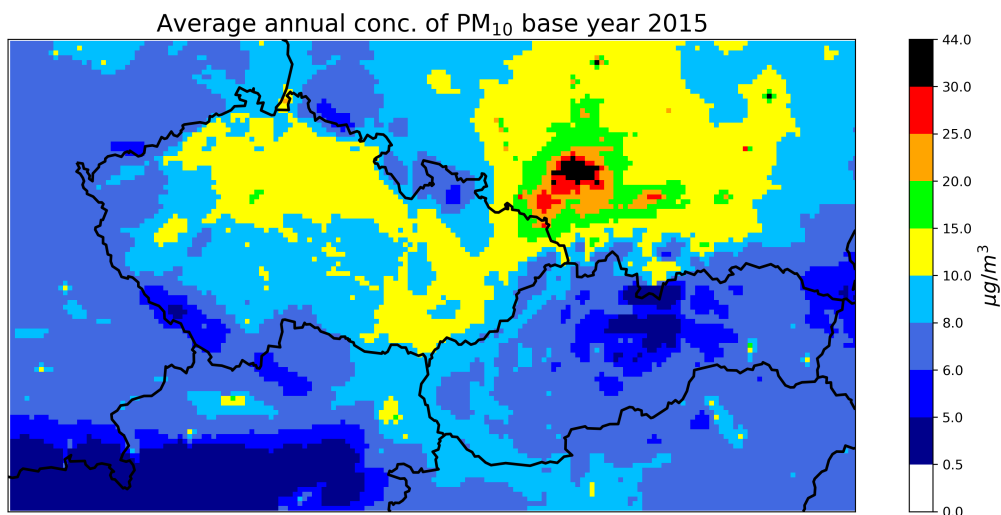
$$\delta_{\%} = \sqrt{\delta_{M.C.}^2 + \delta_{M\%}^2}, \quad (10)$$

kde $\delta_{M.C.}$ je chyba vypočítaná z Monte-Carlo metódy pochádzajúca z nedokonalosti modelu. Pre bunky, v ktorých sa uplatnila redukcia koeficientu c je do chyby $\delta_{\%}$ zahrnutá ďalšia neurčitost počítaná ako $\left| \frac{T_M}{C_{M_1}} - \frac{T_M}{C_{M_2}} \right| / 2$, kde C_{M_1} je koncentrácia vypočítaná s koeficientom c z rovnice (6) a C_{M_2} je koncentrácia obdržaná s redukovaným koeficientom c .

3 Výsledky cezhraničného prenosu pre PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$

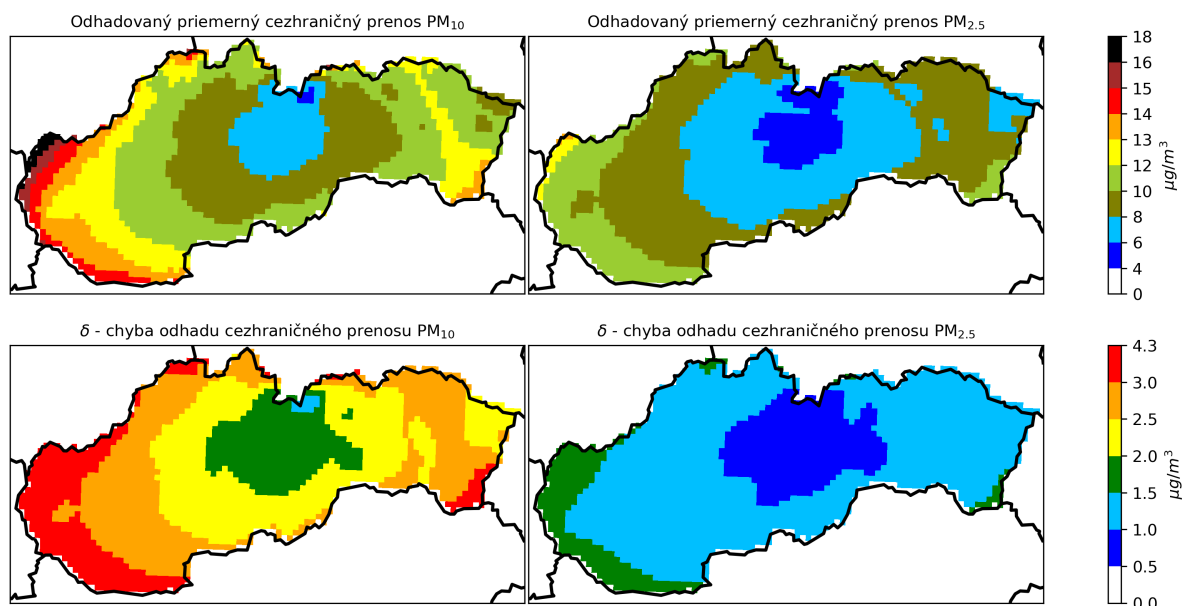
3.1 Plný beh modelu pre PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$.

Priemerné ročné povrchové koncentrácie PM_{10} vypočítané modelom CMAQ v roku 2015 sú zobrazené na Obr. 10. Z obrázku je vidieť, že model, okrem juhu Poľska, nezachytáva oblasti s významnými koncentraciami PM_{10} . Je to spôsobené najmä rozdielnou metodikou získavania emisných vstupov pre rôzne regióny. Najmä pre oblasť Slovenska sú emisie PM_{10} zrejme podhodnotené. Z porovnania modelu a priemerných ročných koncentrácií nameraných na 79 vidieckych a predmestských pozad'ových stanicích vychádza korelačný koeficient $r = 0.67$, priemerný bias $-10.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a RMSE $11.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kvalitatívne veľmi podobné rozmiestnenie priemerných ročných koncentrácií, ako v prípade PM_{10} dostávame, len s menšími hodnotami aj pre $\text{PM}_{2.5}$. To je pochopiteľné, keďže koncentrácie $\text{PM}_{2.5}$ tvoria podmnožinu koncentrácií PM_{10} . Z porovnania modelu a priemerných ročných

Obr. 10: Priemerné ročné povrchové koncentrácie PM_{10} v roku 2015

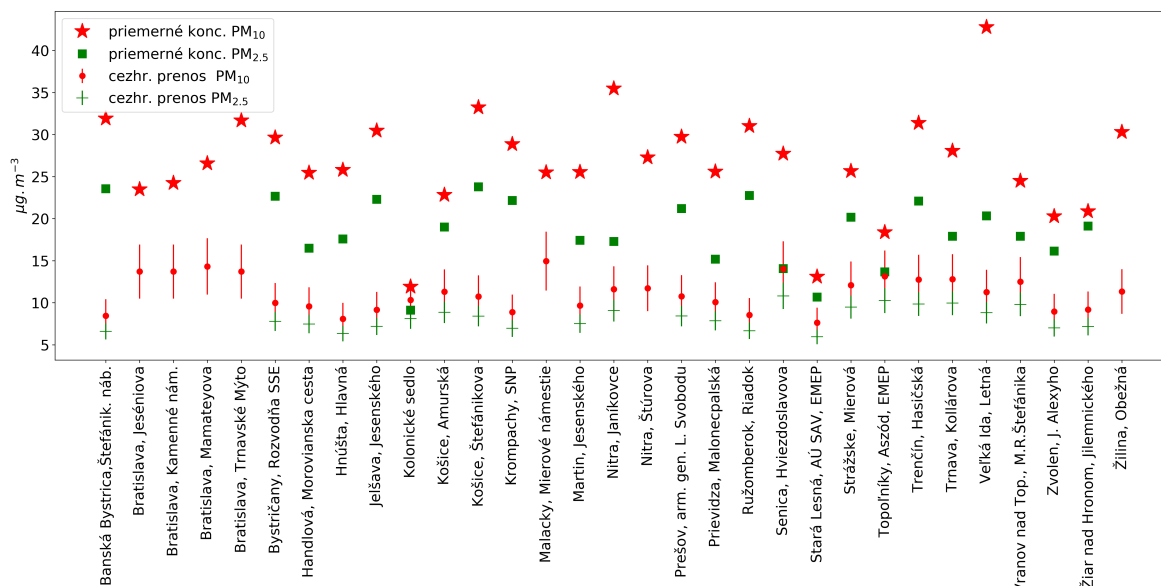
koncentrácií nameraných na 30 vidieckych a predmestských pozad'ových staniciach vychádza pre $PM_{2.5}$ korelačný koeficient $r = 0.91$, priemerný bias $-6.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a RMSE $6.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Výsledky pre koncentrácie PM_{10} a $PM_{2.5}$ nespĺňajú minimálne požiadavky pre použitie modelu pre podporu politík v rámci požiadaviek FAIRMODE. Avšak Mean Quality Index (MQI) pre $PM_{2.5}$ vychádza MQI=1.09, čo je pomerne blízko hodnoty MQI=1 požadovanej pre splnenie tejto minimálnej požiadavky.

3.2 Odhad skutočného cezhraničného prenosu PM_{10} a $PM_{2.5}$ a chyby odhadu

Obr. 11: Odhadovaný priemerný cezhraničný prenos T_R pre PM_{10} (horná mapa vľavo) a pre $PM_{2.5}$ (horná mapa vpravo). Chyba odhadu δ je na príslušných spodných mapách

Pri odhade skutočného cezhraničného prenosu PM_{10} a $PM_{2.5}$ postupujeme analogicky ako v prípade NO_2 .

Pre PM_{10} dostaneme z porovnania koncentrácií plného behu modelu a 79 vidieckych a predmestských požadových staníc $c_{rem} = 1.19 \pm 0.51$, zatiaľčo pre $PM_{2.5}$ dostávame $c_{rem} = 0.74 \pm 0.25$ z porovnania 30 vidieckych a predmestských požadových staníc. Použitím týchto koeficientov a príslušnou modifikáciou rovnice (3) dostávame odhadovaný skutočný cezhraničný prenos pre PM_{10} a $PM_{2.5}$ a ich chybu odhadu. Výsledky sú prezentované na Obr. 11.



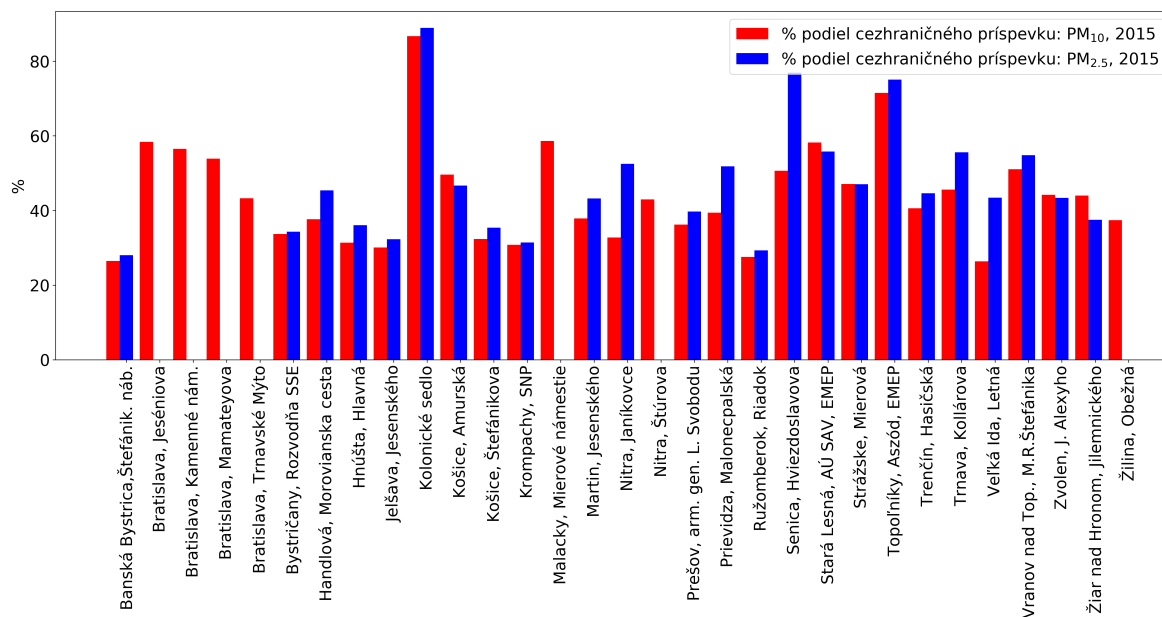
Obr. 12: Odhadovaný priemerný cezhraničný prenos na meracích stanicích a priemerná meraná koncentrácia pre PM_{10} a $PM_{2.5}$ v roku 2015

Odhadované cezhraničné znečistenie PM_{10} a $PM_{2.5}$ a jeho percentuálny podiel na miestach meracích staníc je na Obr. 12 a 13.

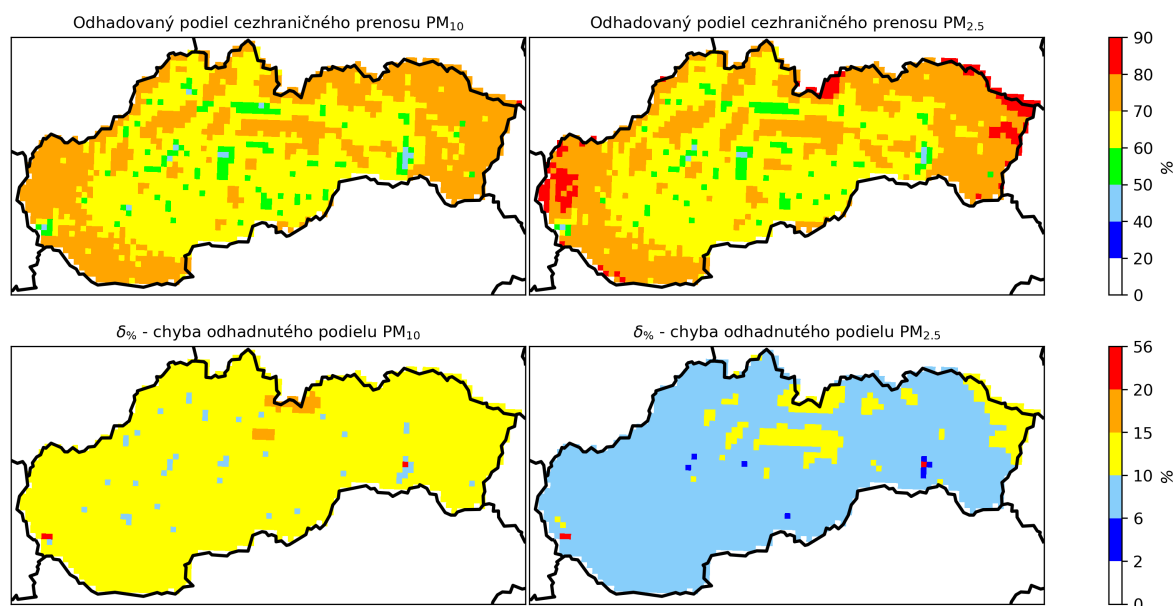
Pre odhad priemerných ročných príspevkov cezhraničného prenosu k celkovému znečisteniu PM_{10} a $PM_{2.5}$ mimo miest meracích staníc potrebujeme poznať skutočnú hodnotu C_R v danej bunke. Rovnako ako v prípade NO_2 ju odhadneme pomocou koeficientu c z rovnice (6). Z porovnania plného behu modelu s 12 mestskými požadovými stanicami dostávame pre PM_{10} $c_{urb} = 2.46 \pm 0.70$ a pre $PM_{2.5}$ $c_{urb} = 1.57 \pm 0.48$. Tak ako v prípade NO_2 potrebujeme vykonať redukciu c , ktorá vedie na nerealisticky vysoké koncentrácie C_R . K tomu potrebujeme vedieť hodnotu najvyššej priemernej ročnej koncentrácie na mestskej požadovej stanici v roku 2015 na Slovensku, ktorá je pre PM_{10} $33.22 \mu g/m^3$ a pre $PM_{2.5}$ $23.77 \mu g/m^3$. Priemerná hodnota pre všetky mestské požadové stanice v roku 2015 na Slovensku je pre PM_{10} $26.92 \mu g/m^3$ a pre $PM_{2.5}$ $18.99 \mu g/m^3$. Postupom ako v podkapitole 2.3 dostaneme odhadovaný priemerný ročný príspevok cezhraničného prenosu k celkovému znečisteniu PM_{10} a $PM_{2.5}$ a chybu odhadu. Výsledky sú zobrazené na Obr. 14.

4 Poďakovanie

Ďakujem kolegom z Odboru monitorovania kvality ovzdušia: Jane Matejovičovej, Jane Krajčovičovej, Vladimírovi Nemčekovi a Tereze Šedivej za vynikajúcu pracovnú atmosféru, za poskytnutie niektorých špecifických údajov pre potreby predloženej práce, ako i za podporu pri písaní tejto práce.



Obr. 13: Percentuálny podiel cezhraničného prenosu k celkovým koncentráciám pre PM₁₀ a PM_{2,5} na meracích staniách



Obr. 14: Odhadovaný priemerný ročný príspevok cezhraničného prenosu k celkovému znečisteniu PM₁₀ a PM_{2,5} a chyba odhadu

5 Záver

Cezhraničný prenos na území Slovenska bol vypočítaný pre NO₂, PM₁₀ a PM_{2,5} chemicko-transportným modelom CMAQ v roku 2015. V práci boli použité dve metódy na výpočet cezhraničného prenosu. Rozdiel vo výsledkoch medzi týmito metódami je spôsobený nelinearitou chemických mechanizmov v chemicko-transportných modeloch. V predloženej publikácii je navrhnuté považovať za predpoveď modelu pre cezhraničný

prenos aritmetický priemer týchto metód a ako chybu, kvôli nelinearite chemických mechanizmov brať polovicu z absolútnej hodnoty rozdielu medzi metódami. Táto chyba je pre NO_2 rovná $0.003 \pm 0.032 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pričom maximálne hodnoty dosahuje $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pre PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$ je chyba $0.2 \pm 0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ s maximom okolo $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Metóda2 však predpovedá pre miesta s veľmi vysokým celkovým znečistením omnoho väčší cezhraničný prenos. Toto je spôsobené okrem spomínanej nelinearity najmä samotnou podstatou metódy2, v ktorej je prítomné odčítavanie dvoch behov modelu. Preto treba vhodnosť použitia metódy2 pre oblasti veľmi vysokým celkovým znečistením zvážiť. Výsledky práce ukazujú, že chyba spôsobená chemickou nelinearitou, je pre danú simuláciu menšia ako chyba vyplývajúca z nedokonalosti modelu a jeho meteorologických a emisných vstupov. V práci je táto druhá chyba odhadnutá pomocou postupu v podkapitole 2.3.

Hlavnými výstupmi práce sú odhadovaný priemerný ročný cezhraničný prenos NO_2 , PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$ a ako i chyba odhadu na Obr. 6 a 11, ďalej odhadovaný priemerný ročný cezhraničný prenos na meracích stanicích na Obr. 7 a 12, ako i percentuálny podiel tohto prenosu na Obr. 8 a 13. V neposlednom rade je prezentovaná aj mapa podielu cezhraničného prenosu na celkových koncentráciách na Obr. 9 a 14, ktoré treba brať so zreteľnom na skutočnosť, že v miestach silného lokálneho znečistenia sú tieto percentuálne podiely omnoho menšie, ako je vykreslené na mapách. Toto obmedzenie platnosti výsledkov vyplýva z rozlíšenia modelu 4.7×4.7 km. Uvedené výstupy práce môžu slúžiť pri posudzovaní pôvodu znečistenia ovzdušia na Slovensku.

V predloženej práci sú analyzované priemerné ročné koncentrácie, ktoré boli získané spriemerovaním hodinových výstupov z modelu CMAQ. Tieto hodinové koncentrácie sú archivované a môžu slúžiť pre ďalšiu analýzu cezhraničného prenosu - analyzovanie dní so silným, resp. slabým cezhraničným prenosom, podiel cezhraničného znečistenia v smogových epizódach, atď.

Na potreby simulácií bolo využitých 64-96 procesorov na superpočítači prevádzkovanom na SHMÚ. Spolu boli vykonané 4 behy modelu s celkovým výpočtovým časom cca 48 dní.

Literatúra

- [1] EMEP – Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmisssion of Air Pollutants in Europe) (Geneve, 1984).
- [2] U.S. EPA. EPA's Report on the Environment (Roe) (2008 Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-07/045F (NTIS PB2008-112484), 2008
- [3] CMAQv5.2 Operational Guidance Document <https://www.cmascenter.org/cmaq/>, 2017
- [4] User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) modelling System Version 3.9, 2017. <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- [5] Štefánik, D., 2017: Air quality modeling using the CMAQ model, Zborník príspevkov 18. konferencia mladých meteorológov a klimatológov, SHMÚ Bratislava, 22.-24.11.2017 ISBN 978-80-88907-95-4
- [6] Benešová et al.,(2018): New open source emission processor for air quality models. In Sokhi, R., Tiwari, P. R., Gállego, M. J., Cravioito 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.
- [7] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/aqereporting-2tab-data-by->
- [8] P. Viaene et al.: Guidance Document on Model Quality Objectives and Benchmarking, 2016.

English Abstract : Transboundary pollution in Slovakia

The transboundary pollution in Slovakia was calculated for NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} using CMAQ chemical transport model and two methods. The simulations were done for Slovakia for the reference year 2015. The first method for calculating the transboundary pollution is based on the switching off all emissions from the Slovakia, while emissions outside the boundaries are the same as in the full run of model. The second method is based on running the model with only emissions from the studied country. The resulting concentrations are then subtracted from the full run model concentrations and the results of this subtraction represent the transboundary pollution. By the full run of model we mean the total annual average of concentrations for given pollutants computed from the hourly outputs of the CMAQ model including the best available emissions inventories for whole domain. The error raised from the non-linearity in chemistry modules was evaluated as the half of the transboundary pollution difference between the two methods. The average error for the NO₂ is $0.003 \pm 0.032 \mu\text{g}/\text{m}^3$, the maximum error is around $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$. For the hot-spots, method2 leads to the incorrect prediction caused by the subtraction between full run and run with emissions from the Slovakia only. For the PM's the average error is $0.2 \pm 0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and the maximum error is around $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

It was proposed that the actual transboundary pollution T_R could be estimated as $T_R = T_{\bar{M}} + c_{rem} \times T_{\bar{M}}$, where $T_{\bar{M}}$ is transboundary pollution calculated by model averaged over two methods and $c_{rem} = \frac{C_R - C_M}{C_M}$ is calculated by comparison of measured concentration C_R on the rural and suburban background stations with full run of model concentrations C_M . The method of calculation for the contribution of transboundary pollution to the total pollution was also proposed.

Comparing errors, it can be stated that the error originated from the performance of the presented models is much bigger than that which comes from the non-linearity of the chemical mechanism.

The main outputs from this paper are estimated mean annual transboundary pollution of NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} and error of this estimation plotted in FIG. 6 and 11, and estimated mean annual transboundary pollution at monitoring sites in FIG. 8 a 13. The outputs of this work could serve as source of information about transboundary pollution in air-quality assessments studies.