

Monitorovanie znečisťovania ovzdušia cestnou dopravou

Ďurčanská, D., Jandačka, D.: Monitoring the Air Pollution Produced by Road Traffic. *Životné prostredie*, 2017, 51, 3, p. 138 – 148.

Monitoring air quality establishes the current status of local environments and provides a history of environmental evolution over time. The primary objective of monitoring is not only to gain knowledge of the environment but also to be able to predict subsequent developments and consequently design measures to ensure environmental sustainability. A clear statement of monitoring objectives is a vital precondition for correct decision-making in monitoring pollutants. These decisions involve how and where monitoring should be performed and the level of accuracy and precision which must be achieved. Air quality is influenced by many factors which determine its development and changes, and one of the greatest problems in urban life is air pollution. Air quality is subject to both the primary pollution sources and secondary influences which have differing impacts on current air pollutant concentrations. This paper examines problems in monitoring air pollution from road traffic, the influence of secondary factors (meteorological conditions) on detected concentrations of selected pollutants, chemical composition of particulate matter and identification source of particulate matter.

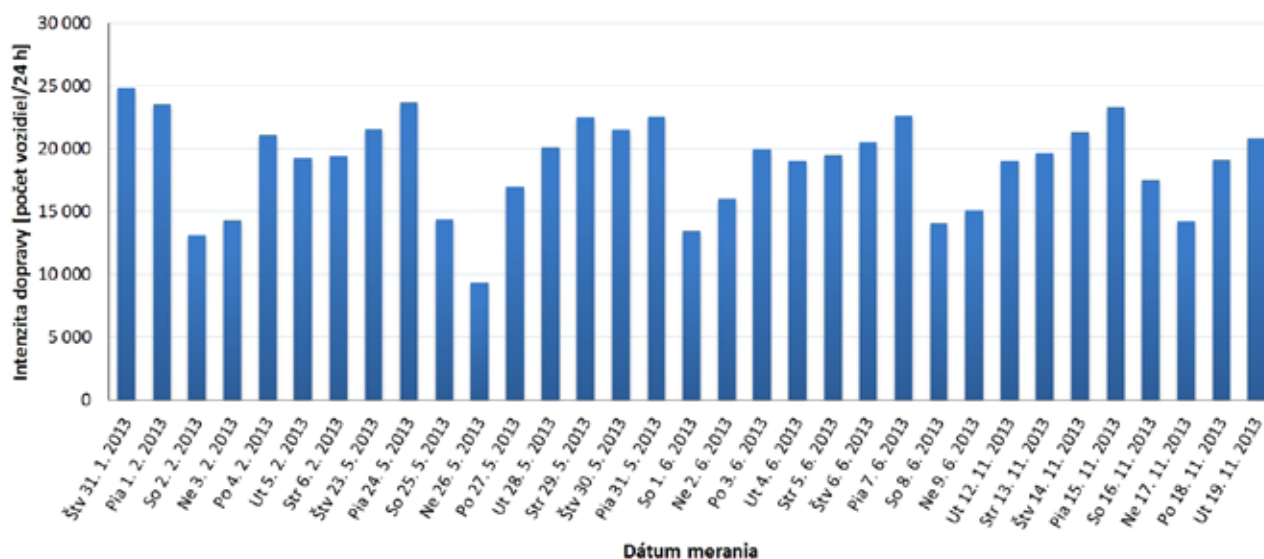
Key words: air pollution, particulate matter, nitrogen oxides, meteorological conditions, vehicular traffic, statistical analysis

Produkcia tuhých častíc a škodlivých plynov z cestnej dopravy je problémom v blízkosti pozemných komunikácií. Vzhľadom na dominantné používanie spaľovacích motorov výfukové plyny obsahujú veľké množstvo plynných znečisťujúcich látok, ako aj tuhých častíc (PM – *particulate matter*). Obsahujú najmä veľké množstvo najjemnejších frakcií PM (PM_{2,5} a PM₁), ktoré môžu dlho zotrvať vo vzduchu, ľahko vstúpia do dýchacích ciest a poškodiť ľudské zdravie. Ďalšia časť zahŕňa tuhé častice, vzniknuté obrusom rôznych častí povrchu ciest a vozidiel, a resuspendovaný cestný prach, ktoré spolu tvoria hmotu väčších aerodynamických priemerov. Znečisťujúce látky vyprodukované cestnou dopravou majú primárny vplyv na životné prostredie v okolí ciest. Znečistenie ovzdušia však môže podliehať prenosu na veľké vzdialenosti, a preto môže mať vplyv na vzdialenejšie aglomerácie, prípadne môže dôjsť k cezhraničnému prenosu. Častice, ktoré sa nachádzajú v atmosfére, sú vystavené rôznym vplyvom, tie môžu ich koncentráciu znižovať alebo zvyšovať. Sú to najmä meteorologické podmienky, ktoré významne ovplyvňujú koncentráciu jednotlivých látok v atmosfére. Jedna zo štúdií bola zameraná na monitorovanie tuhých častíc v blízkosti diaľnice mimo zastavaného územia a vyhodnotenie pomerov s frakciami PM₁₀ (s aerodynamickým priemerom <10 μm), PM_{2,5} (s aerodynamickým priemerom <2,5 μm) a PM₁ (s aerodynamickým priemerom <1 μm) vzhľadom na meteorologické podmienky a intenzitu dopravy (Ďurčanská, Jandačka,

2016). Rýchlosť vetra a teplota sú najdôležitejšími meteorologickými faktormi s preukázaným dopadom na PM v okolitom ovzduší.

Frakcie PM môžu pochádzať z rôznych prírodných zdrojov alebo z antropogénnych zdrojov. Medzi prírodné zdroje sa radí morská soľ, prach zemskej kôry, peľ a sopečný popol. Medzi antropogénne zdroje patria predovšetkým spaľovanie fosílnych palív v elektrárnach na fosílna palivá, miestne lokálne vykurovanie domácností, emisie súvisiace so spaľovaním v dôsledku prevádzky vozidiel a resuspenzie prachu na cestách. Zaujímavé výsledky boli dosiahnuté v štúdiách Kukutschovej et al. (2011); Panta, Harrisona (2013); Sandersona et al. (2014); Thorpea, Harrisona (2008) a Ďurčanskej, Jandačku (2016), kde sa sledovalo chemické zloženie PM, najmä prítomnosť kovov vo frakciách PM. Niektoré chemické prvky (kovy) sú charakteristické pre jemnú frakciu PM_{2,5} a niektoré pre hrubú frakciu PM_{2,5-10}. Závisí to predovšetkým od meracieho obdobia a distribúcie potenciálnych zdrojov tuhých častíc v čase a priestore.

Tento príspevok je zhrnutím niekoľkoročného monitorovania a vyhodnocovania stavu ovzdušia pozdĺž cestných komunikácií. Na pracovisku autorov boli riešené práce, ktorých cieľom bolo spresnenie metód meraní alebo návrh nových metodík (Ďurčanská a kol., 2014; Jandačka, 2013). Chemické zloženie PM (organický a elementárny uhlík, minerálny prach, morské aerosóly, sekundárne častice, najmä sírany a dusičnany, ťažké kovy a ďalšie prvky) je ovplyv-



Obr. 1. Priemerné 24-hodinové intenzity dopravy na meracom stanovišti pri diaľnici D1 Predmier za vybrané obdobie v roku 2013

ňované ich pôvodom, pričom primárny zdroj tuhých častíc je určený a špecifikovaný profilom chemických prvkov a látok. Realizovaným objektívnym meraním, výskumom a využitím viacrozmerných štatistických metód, ktorými sa vyhodnocuje prítomnosť kovov v PM zachytávaných na filtroch v blízkosti ciest, možno identifikovať ich zdroje. Riešenie tohto problému vyžaduje využitie viacrozmerných štatistických metód, ako napríklad analýzu hlavných komponentov (PCA), faktorovú analýzu (FA), viacrozmernú regresnú analýzu (MRA) a vektorovú algebru (Jandačka et al., 2017; Guo et al., 2004; Song et al., 2006; Chen et al., 2010; Yang et al., 2011).

Znečistenie ovzdušia v blízkosti ciest

Niektoré z hlavných zdrojov znečistenia v okolí ciest zahŕňajú emisie výfukových plynov a resuspenziu cestného prachu. Sú to zdroje s nízkym vstupom emisií do ovzdušia do výšky 20 m, čo vedie k významnému vplyvu na koncentráciu znečisťujúcich látok v dýchacej zóne ľudí (Jandačka et al., 2017; Huzlík a kol., 2011; Pant, Harrison, 2013; Thorpe, Harrison, 2008).

Frakcie PM na ľudské zdravie účinkujú po inhalácii a prieniku do pľúc a krvného obehu, čo vedie k nepriaznivým účinkom na respiračný, kardiovaskulárny, imunitný a nervový systém. Ultrajemné častice (s aerodynamickým priemerom $<0,1 \mu\text{m}$) môžu dokonca dosiahnuť mozog cez nos (Breyse et al., 2013). Chemická a fyzikálna interakcia PM a pľúcneho tkaniva môže spôsobiť podráždenie alebo poškodenie. Čím sú častice menšie, tým hlbšie sa dostanú do pľúc. Vplyv PM a miera zdravotných problémov

jasne súvisia s podielom $\text{PM}_{2,5}$, ktorý tvorí 40 – 80 % hmotnostných koncentrácií PM_{10} v ovzduší v Európe (European Environmental Agency, 2013; Durčanská, Jandačka, 2016; Jandačka, 2013).

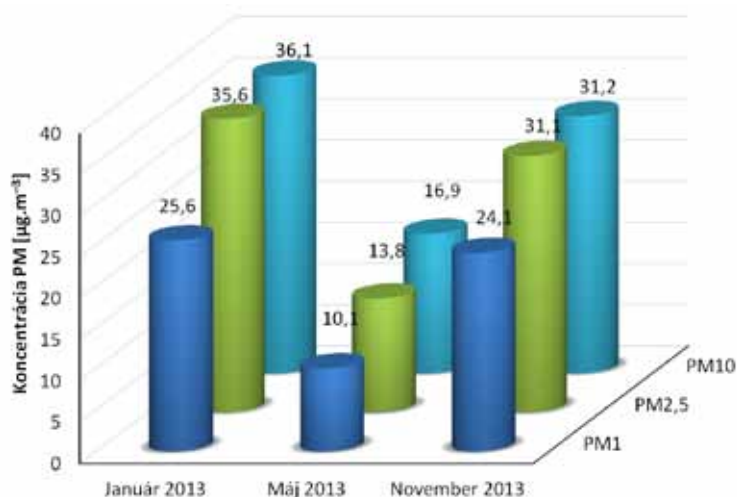
Väčšina mestských a vidieckych obyvateľov má skúsenosti s každodenným vystavením zvýšeným koncentráciám PM, ktoré môžu mať nepriaznivé účinky na ľudské zdravie. Okrem toho PM prispieva k znečisteniu budov a môže mať dokonca aj korozívne účinky na budovy a stavby v závislosti od zloženia PM (European Environmental Agency, 2013).

Oxid dusičitý (NO_2) je reaktívny plyn, ktorý je tvorený najmä oxidáciou oxidu dusnatého (NO). Spaľovacie procesy pri vysokej teplote (napr. procesy v automobilových motoroch aj elektrárňach) sú hlavnými zdrojmi NO a NO_2 . Tieto dva plyny sú všeobecne známe ako NO_x . Najväčší podiel emisií NO_x tvorí oxid dusnatý. Malá časť emisií NO_x je priamo emitovaná ako NO_2 , zvyčajne 5 – 10 % pre väčšinu spaľovacích zdrojov. Vozidlá spaľujúce naftu sú výnimkou. Zvyčajne produkujú vyššie podiely NO_2 , pretože ich systémy na úpravu výfukových plynov zvyšujú priamu emisiu NO_2 (Grice et al., 2009). Existujú jasné náznaky, že priame emisie NO_2 v doprave sa dramaticky zvyšujú v dôsledku vyššieho počtu vozidiel so vznetrovými motormi, najmä nových vozidiel spĺňajúcich požiadavky Európskych emisných noriem Euro 4 a Euro 5. To môže viesť k častému prekročeniu limitných hodnôt NO_2 v špičkových hodinách intenzity dopravy.

Podobne ako ozón (O_3), aj oxid dusičitý je jednou z látok znečisťujúcich ovzdušie, ktoré primárne postihujú dýchaciu sústavu. Krátkodobá expozícia NO_2 môže mať nepriaznivé účinky na ľudské zdravie, ako

Tab. 1. Priemerné hodnoty meteorologických charakteristík počas rôznych meracích období na meracom stanovišti diaľnica D1 Predmier

Rok 2013	Teplota vzduchu [°C]	Vlhkosť [%]	Rýchlosť vetra [m.s ⁻¹]	Zrážky [mm.24 h ⁻¹]	Tlak [hPa]
Január	1,1	85,5	1,5	3,6	972
Máj	13,9	91,6	2,2	2,9	976
November	5,6	83,2	1,5	2,7	972



Obr. 2. Priemerné koncentrácie PM na meracom stanovišti pri diaľnici D1 Predmier za obdobie január 2013, máj 2013, november 2013



Obr. 3. Meracie stanovište v intraviláne v centre Žiliny na Ulici Vojtecha Spanyola (na obrázku vpravo hore s meracím zariadením – Leckel LVS3 (apríl, 2012). Foto: Dušan Jandačka

je znížená funkcia pľúc u citlivej časti populácie, zatiaľ čo dlhodobá expozícia môže viesť k nepriaznivým účinkom, ako je vyššia citlivosť na infekcie dýchacích ciest.

NO₂ je jedným z reaktívnych dusíkatých zlúčenín, ktoré môžu mať nežiaduce účinky na ekosystémy, ako je okysľujúci účinok. Je však aj zdrojom dôležitých živín. Prebytok reaktívneho ukladania dusíka môže viesť k prebytku živín dusíka v suchozemských a vodných ekosystémoch, čo spôsobuje eutrofizáciu (nadbytok živín). Prebytok dusíka môže viesť k zmenám v jedinečných suchozemských a vodných živočíchoch a rastlinách a môže ohroziť biodiverzitu. Oxidy dusíka (NO_x) zohrávajú dôležitú úlohu pri tvorbe O₃. Tiež prispievajú k tvorbe sekundárnych anorganických aerosólov (SIA) prostredníctvom tvorby dusičnanov, čím zvyšujú koncentrácie PM₁₀ a PM_{2,5} (European Environmental Agency, 2013; Jandačka et al, 2017).

Monitoring kvality ovzdušia mimo zastavaného územia

Merania vybraných znečisťujúcich látok (NO, NO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁) boli vykonané na diaľnici D1 medzi Považskou Bystricou a Žilinou pri obci Predmier. Meracie prístroje boli umiestnené v priestoroch bývalého Strediska správy a údržby diaľnic približne 500 m od obce Predmier, ktorá leží na ľavom brehu rieky Váh. Na severozápade ho ohraničuje pohorie Javorníky a na juhovýchode Strážovská hornatina. Diaľnica D1 prechádza údolím rieky Váh a je orientovaná v smere juhozápad – severovýchod. Orientácia údolia naznačuje prevládajúci smer vetra, ktorý prúdi predovšetkým z juhozápadu alebo severovýchodu. Mobilné monitorovacie zariadenia boli umiestnené 7 m od okraja spevnenej krajnice komunikácie (obrázok na str. 4 obálky).

Intenzita dopravy bola nepretržite monitorovaná automatickým sčítacím zariadením SIERZEGA SR4 na sledovanie zloženia dopravného prúdu (obr. 1). Súčasne sa v meteorologickej stanici monitorovali aktuálne meteorologické podmienky (teplota, relatívna vlhkosť, tlak, zrážky, rýchlosť vetra a smer vetra). Meteorologické podmienky počas

meracích období sú uvedené v tab. 1.

Diaľnica D1 je orientovaná v rovnakom smere ako rieka Váh. Táto skutočnosť tiež naznačuje hromadný

tok znečistenia spôsobený cestnou premávkou na D1 v smere orientácie diaľnice. Úroveň znečistenia ovzdušia cestnou premávkou po oboch stranách diaľnice môže byť ovplyvnená predpokladaným šírením imisíí v smere diaľnice. Aj napriek tomu sme sa pokúsili vytvoriť model vzťahov vybraných znečisťujúcich látok a okolitých podmienok.

Pokiaľ ide o podiel jednotlivých zložiek NO_x a NO_2 , vykazuje nadpriemernú prítomnosť v celkovom znečistení ovzdušia oxidmi dusíka. Percentuálny podiel NO_2 v NO_x predstavuje 39 % a NO v NO_x 61 %. Toto zistenie môže viesť k teórii veľkého počtu vozidiel s dieselovým motorom – nákladných vozidiel – v dopravnom prúde a tým k priamej produkcii NO_2 do ovzdušia (Grice et al., 2009).

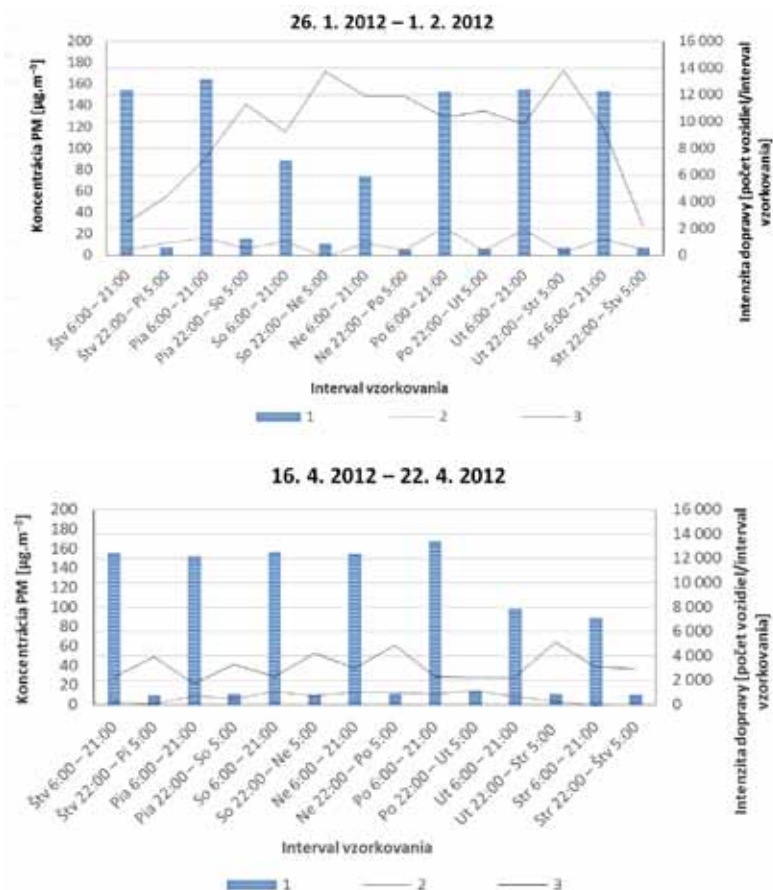
Na základe uskutočnených meraní mimo zastavaného územia (v blízkosti diaľnice D1) sa odhalilo niekoľko faktov o tuhých časticiach. Prvým faktorom je dominantné zastúpenie jemnej frakcie v celkovej meranej frakcii PM počas rôznych meracích období (leto, zima).

Frakcia tuhých častíc PM_{10} bola tvorená v priemere z 93 % jemnou frakciou $\text{PM}_{2,5}$ počas januára 2013, 82 % počas mája 2013 a 96 % v novembri 2013. Pomer $\text{PM}_{2,5}$ k PM_{10} bol vyšší v zimnom období (v januári a novembri 2013) ako v letnej sezóne (v máji 2013).

Druhým faktorom je zistenie, že koncentrácie PM boli výrazne rozdielne v rôznych meracích obdobiach. Priemerné koncentrácie PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} boli vyššie počas zimných meracích období (január 2013, november 2013) ako počas letného meracieho obdobia v máji 2013 (obr. 2).

Monitoring kvality ovzdušia v zastavanom území

Na porovnanie sme vykonali merania aj v zastavanom území, v ktorom je oproti nezastavanému územiu rozdielna skladba dopravného prúdu a miera lokálneho vykurovania v odlišných ročných obdobiach. Merania PM sa uskutočnili v rokoch 2010 až 2013 pri mestskej komunikácii v Žiline (na Ulici Vojtecha Spanyola), ktorá je jednou z hlavných mestských radiál, meralo sa pravidelne 4-krát do roka (obr. 3). Na určenie kon-

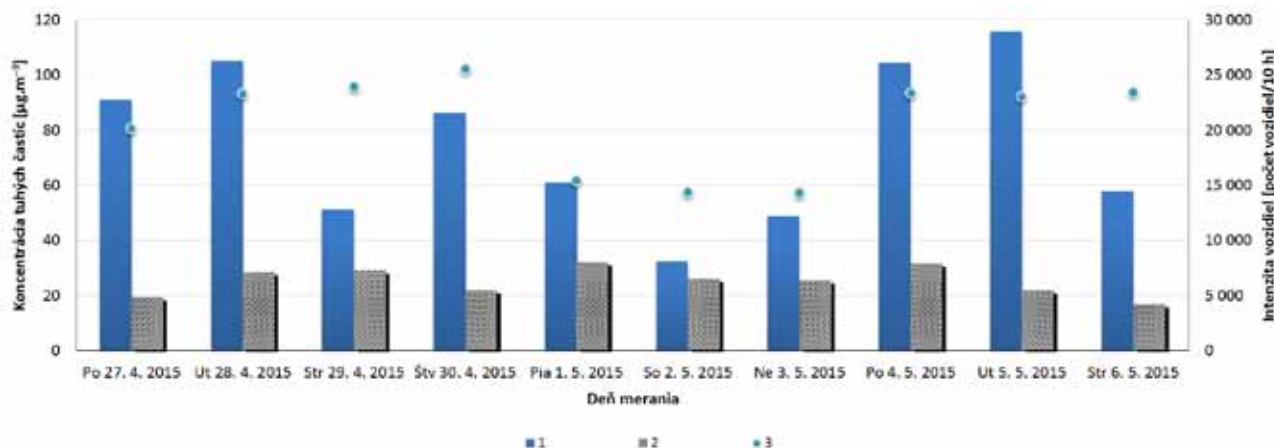


Obr. 4. Priebeh koncentrácií pevných častíc jemnej ($\text{PM}_{2,5}$) a hrubej frakcie ($\text{PM}_{2,5-10}$) počas meracích intervalov noc a deň za vybrané zimné obdobie 2012 a vybrané jarné obdobie 2012 v Žiline na Ulici Vojtecha Spanyola

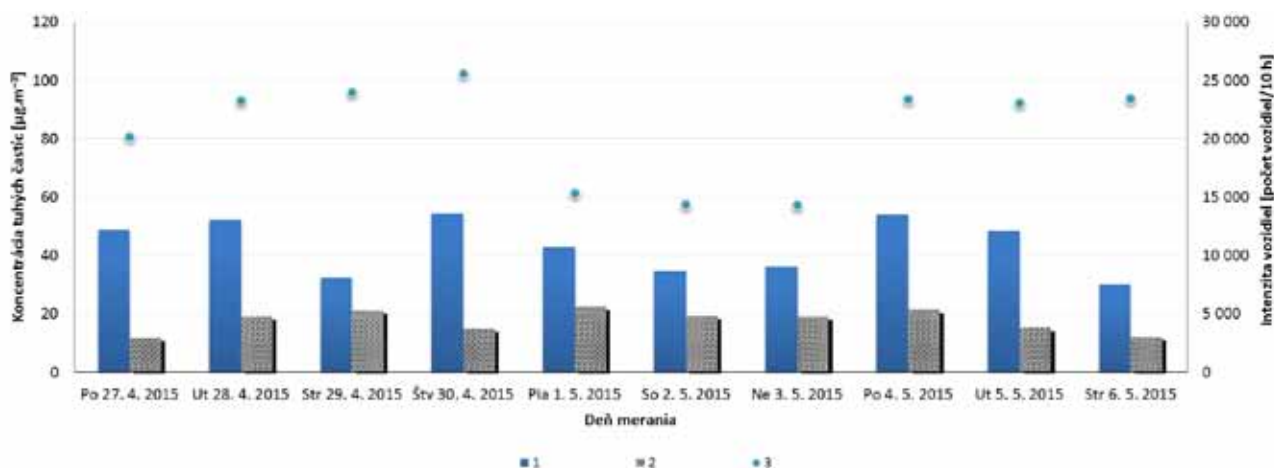
Vysvetlivky: 1 – intenzita dopravy, 2 – hrubá frakcia $\text{PM}_{2,5-10}$, 3 – jemná frakcia $\text{PM}_{2,5}$



Obr. 5. Meracie stanovište v intraviláne Žiliny na Mostnej ulici: APM 2 – monitor znečistenia ovzdušia tuhými časticami a Leckel LVS 3 – nízkoobjemový vzorkovač (apríl, 2015). Foto: Dušan Jandačka



Obr. 6. Priebek koncentrácií tuhých častíc PM₁₀ v záreze (Leckel) a nad zárezom cestnej komunikácie (APM2) a intenzity dopravy počas meracieho obdobia v roku 2015 na Mostnej ulici v Žiline
Vysvetlivky: 1 – PM₁₀ (Leckel), 2 – PM₁₀ (APM2), 3 – intenzita dopravy



Obr. 7. Priebek koncentrácií tuhých častíc PM_{2,5} v záreze (Leckel) a nad zárezom cestnej komunikácie (APM 2) a intenzity dopravy počas meracieho obdobia v roku 2015 na Mostnej ulici v Žiline
Vysvetlivky: 1 – PM_{2,5} (Leckel), 2 – PM_{2,5} (APM 2), 3 – intenzita dopravy

centrácií PM bola použitá referenčná gravimetrická metóda podľa normy STN EN 12341.

Frakcia PM₁₀ je tvorená v priemere 70 – 90 % jemnou frakciou PM_{2,5}, preto je aj najviac ovplyvnená touto zložkou. Pri skúmaní zmien koncentrácií PM boli PM₁₀ rozdelené práve na túto jemnú frakciu PM_{2,5} a hrubú frakciu PM_{2,5-10}.

Tieto dve frakcie sa správajú úplne inak (obr. 4). Jemná frakcia PM_{2,5} je v nočných hodinách vyššia ako počas dňa, kedy je intenzita dopravy oveľa vyššia. Keďže doprava je hlavným zdrojom PM na danom stanovišti, dalo sa predpokladať, že práve v noci budú koncentrácie PM nižšie. Nižšie nočné koncentrácie môžeme pozorovať práve pri frakcii PM_{2,5-10}, čo je hrubá zložka frakcie PM₁₀.

Druhé stanovište v intraviláne Žiliny bolo na vnútornom mestskom okruhu, na Mostnej ulici. Merania

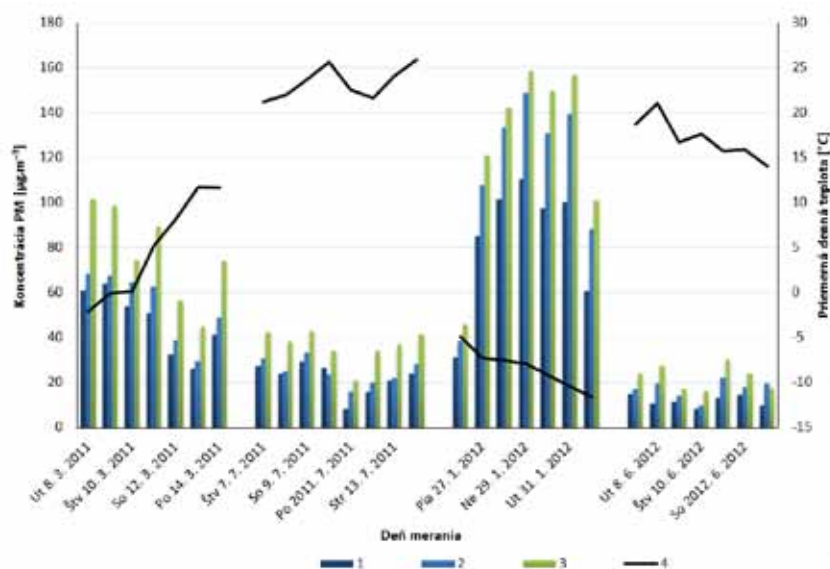
tu prebiehali v roku 2015 s použitím nízkoobjemových vzorkovačov Leckel LVS3 (dva kusy; gravimetrická metóda určovania koncentrácií PM) a monitoru znečistenia ovzdušia tuhými časticami APM 2 (optická metóda určovania koncentrácií PM). Cieľom bolo preukázať súvislosť medzi intenzitou dopravy a tvorbou tuhých častíc, pričom PM₁₀ a PM_{2,5} sme monitorovali pri cestnej komunikácii v záreze 7 m pod úrovňou komunikácie pre peších a zároveň sme ich sledovali aj na úrovni komunikácie pre peších nad cestnou komunikáciou (obr. 5).

Vplyv intenzity cestnej dopravy na koncentrácie tuhých častíc bol preukázaný hlavne v záreze cestnej komunikácie, kde môžeme pozorovať výrazný pokles koncentrácie tuhých častíc PM₁₀ a PM_{2,5} počas víkendu oproti pracovným dňom, kedy intenzita pohybu vozidiel výrazne klesla. Naopak, koncentrácie PM nad zárezom (v úrovni komunikácie pre peších) vykazujú

minimálnu zmenu počas víkendu oproti pracovným dňom (obr. 6, 7). Prejazd vozidiel po cestnej komunikácii v záreze má výrazný vplyv na zvýšenie koncentrácií tuhých častíc hrubej frakcie $PM_{2,5-10}$, ktorá pochádza predovšetkým z resuspencie cestného prachu. V priemere za celé meracie obdobie mala frakcia $PM_{2,5-10}$ o 13 % vyššie zastúpenie v celkovej frakcii PM_{10} v záreze cestnej komunikácie ako nad ním. Meranie počas víkendu, kedy klesla intenzita vozidiel približne o jednu tretinu oproti pracovným dňom, klesla koncentrácia hrubej frakcie $PM_{2,5-10}$ v záreze cestnej komunikácie 5-násobne na rozdiel od koncentrácie $PM_{2,5-10}$ nad zárezom cestnej komunikácie, ktorá sa prakticky nezmenila. Správanie sa hrubej frakcie $PM_{2,5-10}$ predurčuje predovšetkým jej nízka transportná schopnosť, a teda zostáva hlavne v blízkosti samotného zdroja, v okolí cestnej komunikácie. Dostáva sa však do dýchacej zóny. Jemná frakcia $PM_{2,5}$ môže byť transportovaná prúdením vetra na väčšie vzdialenosti a do väčších výšok, ale ani v prípade týchto častíc sa neprekázal presun nad zárez cestnej komunikácie k bytovej výstavbe.

Vzťah medzi znečisťujúcimi látkami, meteorologickými parametrami a intenzitou dopravy

Znečisťujúce látky nachádzajúce sa v atmosfére sú vystavené rôznym vplyvom, ktoré môžu znižovať ich koncentráciu alebo naopak. Sú to najmä meteorologické podmienky, ktoré významne ovplyvňujú koncentráciu znečisťujúcich látok v ovzduší (Ďurčanská, Jandačka, 2016; obr. 8). Skutočnosťou zostáva, že cestná doprava predstavuje primárny zdroj PM pochádzajúcich zo spaľovacích alebo nespäľovacích procesov v blízkosti komunikácií (Obara et al., 2011; Jandačka, Ďurčanská, 2017). Cestná doprava sa považuje tiež za primárny zdroj plyných znečisťujúcich látok, najmä oxidov dusíka (Schnitzhofer et al., 2008). Určenie, ktorý z faktorov, či primárny



Obr. 8. Priebeh koncentrácie tuhých častíc PM v závislosti od teploty v Žiline na Ulici Vojtecha Spanyola

Vysvetlivky: 1 – PM_1 , 2 – $PM_{2,5}$, 3 – PM_{10} , 4 – teplota ovzdušia

Tab. 2. Významné premenné pre závislé premenné PM_1 a výsledky viacrozmernej regresnej analýzy (MRA)

Premenná	Parameter „b“	Hladina významnosti „p“	Korelačný koeficient PM_1
Absolútny člen	62,27	0,000079	–
Nezávislé premenné teploty (TEMP)	–0,70	0,002606	–0,63
Rýchlosť vetra (WV)	–5,81	0,000150	–0,60
Vlhkosť vzduchu (HUMI)	–0,32	0,043782	–0,25

Tab. 3. Významné premenné pre závislé premenné $PM_{2,5}$ a výsledky viacrozmernej regresnej analýzy (MRA)

Premenná	Parameter „b“	Hladina významnosti „p“	Korelačný koeficient $PM_{2,5}$
Absolútny člen	43,94	0,000000	–
Nezávislé premenné teploty (TEMP)	–1,09	0,000914	–0,60
Vlhkosť vzduchu (WV)	–6,18	0,003011	–0,56

Tab. 4. Významné premenné pre závislé premenné PM_{10} a výsledky viacrozmernej regresnej analýzy (MRA)

Premenná	Parameter „b“	Hladina významnosti „p“	Korelačný koeficient PM_{10}
Absolútny člen	42,61	0,000000	–
Nezávislé premenné teploty (TEMP)	–0,96	0,000978	–0,60
Vlhkosť vzduchu (WV)	–5,18	0,004527	–0,55

zdroj (cestná doprava), alebo niektorý z ďalších sekundárnych faktorov (meteorologické podmienky) majú významný vplyv na emisie tuhých častíc v ovzduší, sa rozoberá v nasledujúcej časti.

Tab. 5. Výskyt kovov v tuhých časticiach ovzdušia

Zdroj znečistenia		Výskyt prvkov	
Cestná doprava	vozovka	Al, Si, Ca, Mg, C, Na, K, V, Ni	
	komponenty karosérie	Cu, Sn, Cr, Pb, Cd, As, Sb, Fe, Al	
	brzdové obloženia, komponenty motorov	Cu, Sb, Ba, Cr, Fe, Ni, Pb, Zn	
	pneumatiky	Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, Fe, Mn, Cr, Co	
	palivá a mazacie oleje	nafta	Al, Ca, Mg, Mn, Cu, Fe, Mo, V, Zn
		benzín	Sr, Cu, Mn
		olej	Fe, Ca, P, Zn, Mg
katalyzátor	Pt, Pa, Rh (platinové kovy)		
cestný prach	Zn, Al, K, Fe, Na, Mn		
Spaľovanie uhlia a odpadov		Zn, Sb, Cu, Cd, Hg, Se, As, Cr, Co, Al	
Priemysel		Sb, Ag, V, Ni, As, In, Cu, Mn, Ce, Co, Cr, Pb	
Spaľovanie biomasy		K	
Spaľovne		Cd, Pb, Sb, Zn	

Zdroj: Kukutschová et al. (2011); Pant, Harrison (2013); Sanderson et al. (2014); Thorpe, Harrison (2008)

Na hodnotenie bola použitá viacrozmerná regresná analýza (MRA). Hodnotenia sa zaoberajú koreláciou závislých veličín PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 a nezávislých premenných: teploty (TEMP), vlhkosti vzduchu (HUMI), zrážok (RAIN), tlaku (PRESS), rýchlosti vetra (WV), intenzity dopravy (TRAFF). Využitie boli dáta z meraní pri diaľnici D1 – mimo zastavaného územia. Analýza MRA sa týka skupiny techník používaných na štúdium lineárnej závislosti medzi dvoma alebo viacerými premennými.

Priemerné údaje za 24 hodín boli použité na účely MRA, t. j. koncentrácia PM za 24 hodín, priemerné meteorologické dáta za 24 hodín, ako aj intenzita dopravy za 24 hodín. Zdrojová matica údajov pozostávala zo šiestich vyššie vymenovaných nezávislých veličín a závislej premennej – vždy len jedna z frakcie PM_{10} , $PM_{2,5}$ alebo PM_1 . Počet meraní (objektov) bolo 36.

Frakcie PM, keď sú emitované do ovzdušia zo zdroja, sú vystavené množstvu okolitých vplyvov, ktoré môžu zmeniť ich fyzikálny a chemický charakter a, samozrejme, ich skutočnú koncentráciu. Meteorologické faktory a ich zmeny v priebehu času ovplyvňujú skutočný stav PM v okolitom ovzduší. Predovšetkým je to koncentrácia častíc, t. j. riedenie častíc vo vzduchu alebo, naopak, ich nahromadenie v priestore. Výsledky analýz pre jednotlivé frakcie sú nasledovné:

- najvýznamnejšia premenná frakcie PM_1 v súlade s modelom lineárnej regresie je teplota (tab. 2), ktorá koreluje s touto frakciou v najvyššej miere;
- najvýznamnejšia premenná frakcie $PM_{2,5}$ v súlade s modelom lineárnej regresie je teplota (tab. 3), ktorá koreluje s touto frakciou v najvyššej miere;
- celková frakcia PM_{10} ktorá zahŕňa jemnú aj hrubú frakciu, je definovaná pomocou rovnakých premenných – teplota, rýchlosť vetra (tab. 4).

Meracia stanica sa nachádzala na otvorenom priestranstve, kde je typické veterné počasie. Rýchlosť

vetra preto negatívne ovplyvňuje koncentráciu PM (tab. 2, 3, 4), t. j. zriedi koncentráciu PM v priestore. Rýchlosť vetra predovšetkým ovplyvňuje rozptýlenie častíc a prenos častíc na veľké vzdialenosti.

Z výsledkov MRA vykonaných pre PM merané v blízkosti diaľnice D1 sa ukázalo, že k významným premenným – teplote a rýchlosti vetra (ako dominantným faktorom ovplyvňujúcim koncentráciu PM mimo zastavaného územia) – bola pridaná ešte premenná vlhkosť pre frakciu PM_1 . Všetky tri premenné ovplyvňujú negatívne koncentráciu PM v atmosfére, t. j. čím je vyššia hodnota nezávislej premennej, tým je koncentrácia PM nižšia. Teplota sa ukázala ako najvýznamnejší faktor ovplyvňujúci koncentráciu PM, mala teda vysoký korelačný koeficient (tab. 2, 3, 4). Teplota vzduchu má významný vplyv na proces tvorby, zmeny a stavu častíc vo vzduchu.

Výsledky hodnotenia analýz

Výskum znečistenia ovzdušia cestnou dopravou je komplikovaný proces, najmä pokiaľ ide o priamy vzťah merania znečistenia a cestnej dopravy. Emisie spôsobené cestnou premávkou sú ovplyvnené mnohými faktormi, ktoré majú vplyv na ich šírenie a na ich druhotnú tvorbu. Merania vykonané mimo zastavaného územia pri diaľnici D1 potvrdili niekoľko predpokladov týkajúcich sa vzťahov znečisťujúcich látok a meteorologických parametrov. Teplota sa javila ako najpodstatnejší faktor ovplyvňujúci koncentrácie PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 . Korelácia s teplotou bola negatívna pre všetky znečisťujúce látky, t. j. čím je teplota nižšia, tým je koncentrácia vyššia. Ďalšími významnými premennými pre model koncentrácií vybraných znečisťujúcich látok boli rýchlosť vetra a intenzita dopravy.

Správanie a rozptyl znečisťujúcich látok vo vzduchu je do značnej miery ovplyvňované charakterom oblasti, meteorologickými parametrami a samotným

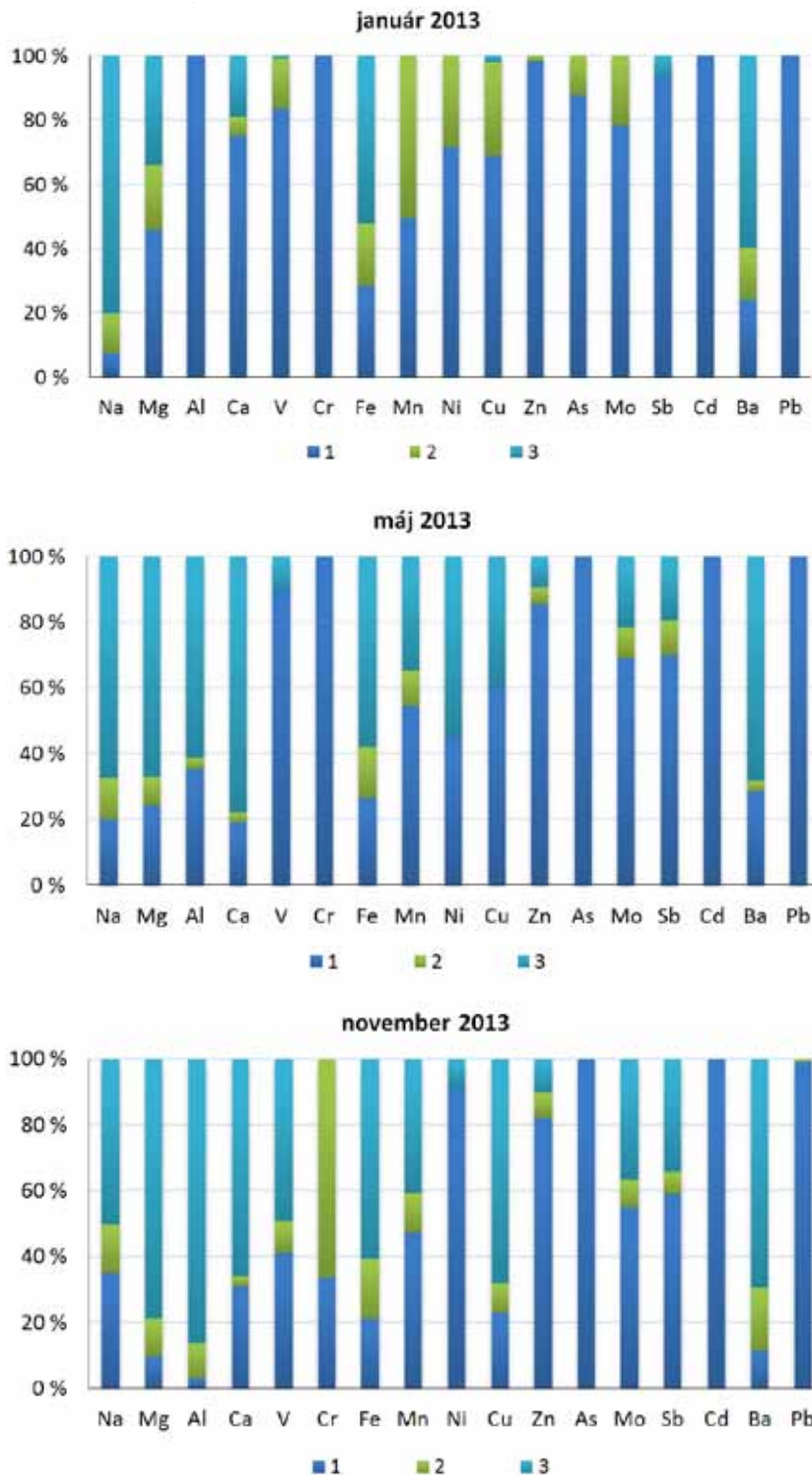
zdrojom znečistenia. Emisie produkované cestnou premávkou sú ovplyvnené sekundárnymi faktormi a ich „pohyb“ vo vzduchu je výsledkom spolupôsobenia jednotlivých zložiek životného prostredia, ktoré je zasiahnuté znečistením ovzdušia.

Z výsledkom meraní PM vyplynulo, že dominantnou frakciou v distribúcii PM je jemná frakcia $PM_{2,5}$. Táto jemná frakcia môže mať až 96 % zastúpenie v celkovej meranej frakcii PM_{10} v závislosti od okolitých podmienok.

Chemické zloženie sledovaných tuhých častíc

Správanie častíc vo vzduchu je zaujímavý proces. Jedným z primárnych zdrojov, ktoré vytvárajú častice v prostredí a ktorý treba brať do úvahy, je cestná doprava. Frakcie PM_{10} a frakcie $PM_{2,5}$ sú najviac monitorované. Častice majú fyzikálne vlastnosti (tvar, veľkosť) a chemické vlastnosti (obsah kovov, chemických zlúčenín). Tieto vlastnosti predurčujú škodlivosť PM pre ľudské telo a životné prostredie (Balachandran et al., 2000). Ich zloženie, veľkosť a vlastnosti sú výsledkom distribúcie všetkých zdrojov v priestore a čase na jednej strane a meteorologických a klimatických podmienok na strane druhej. Výskum sa zameriaval na meranie rôznych frakcií častíc a určenie množstva kovov v rôznych frakciách tuhých častíc (Balachandran et al., 2000; Chen et al., 2010; Ďurčanská, Jandačka, 2016). Cieľom bolo zistiť množstvo kovov v každej frakcii PM a distribúciu kovov počas rôznych meracích období.

Na časticovú hmotu môžu byť nadviazané rôzne prvky a zlúčeniny. Zamerali sme sa na sledovanie vybraných prvkov (sodíka – Na, horčíka – Mg, hliníka – Al, vápnika – Ca, vanádu – V, chrómu – Cr, železa – Fe, mangánu – Mn, niklu – Ni, medi – Cu, zinku – Zn, arzenu – As, molibdenu – Mo, antimónu – Sb, bária – Ba). Každý z týchto kovov môže pochádzať zo špecifického zdroja (tab. 5).



Obr. 9. Priemerné percentuálne podiely chemických prvkov vo frakciách PM zaznamenané počas rôznych meracích období v roku 2013 pri diaľnici D1 Predmier

Vysvetlivky: 1 – PM_1 , 2 – $PM_{1-2,5}$, 3 – $PM_{2,5-10}$

S cieľom identifikovať, prípadne určiť množstvo chemických prvkov vo vzorke tuhých častíc boli pou-

žité spektroskopické metódy. Analýzy filtrov a stanovenie kovov prítomných vo frakcii PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_{10} boli vykonané podľa normy STN EN 14902.

Vzorky odobrané v máji 2013 reprezentujú letnú sezónu a v januári a novembri 2013 reprezentujú zimnú sezónu. Znečistenie ovzdušia môže pochádzať z viacerých zdrojov okrem cestnej dopravy. Koncentrácia niektorých kovov vykazovala v máji 2013 vyššie hodnoty ako v novembri a januári 2013. V januári 2013 sa namerali vyššie koncentrácie PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_{10} , čo by mohlo ovplyvniť pokles podielu kovov vo frakcii. Na druhej strane to naznačuje, že vo vzduchu nie je veľká zmena množstva sledovaných kovov. To signalizuje nie veľkú rozmanitosť (zmenu) potenciálnych zdrojov znečistenia v priebehu roka, ktoré tieto kovy produkujú. Môžeme pozorovať výrazný nárast vo frakcii PM_{10} v januári 2013 oproti máju a novembri 2013. Niektoré monitorované kovy sú prítomné v hrubej frakcii $PM_{2,5-10}$ a niektoré v jemnej frakcii $PM_{2,5}$ ($PM_1 + PM_{1-2,5}$) v závislosti od obdobia vykonaného merania (obr. 9).

Výsledky hodnotenia analýz

Frakcie častíc PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 a chemické prvky (kovy) v týchto frakciách sa sledovali v zastavanom území aj mimo zastavaného územia. Prezentované výsledky sú len zo stanovišťa mimo zastavaného územia v blízkosti diaľnice D1.

Väčšina prvkov bola obsiahnutá v jemnej frakcii $PM_{2,5}$ v meracom cykle január 2013. Prvky Na a Ba boli obsiahnuté aj vo frakcii $PM_{2,5-10}$ v januári 2013. Prvky Na, Mg, Al, Ca, Fe, Ba boli v máji 2013 obsiahnuté v $PM_{2,5-10}$ a V, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Mo, Sb, Cd, Pb vo frakcii $PM_{2,5}$. Prvky Mg, Al, Ca, Fe, Cu, Ba boli v novembri 2013 obsiahnuté vo frakcii $PM_{2,5-10}$ a Cr, Mn, Ni, Zn, As, Mo, Sb, Cd, Pb vo frakcii $PM_{2,5}$. Koncentrácia väčšiny prvkov bola v máji 2013 vyššia ako v januári 2013 a novembri 2013. Môže to byť spôsobené nižšou koncentráciou tuhých častíc v máji 2013 (PM_1 10,1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2,5}$ 13,8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 16,9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) oproti januáru 2013 (PM_1 25,6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2,5}$ 35,6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 36,1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a oproti novembri 2013 (PM_1 23,3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2,5}$ 31,1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 31,2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a tiež nie významnou zmenou kovov v PM. Identifikované prvky boli následne podrobené štatistickým analýzám.

Identifikácia zdrojov tuhých častíc PM_{10}

Uvedený výskum sa zameriaval na sledovanie rôznych frakcií PM a na určenie množstva ťažkých kovov v rôznych frakciách PM. Cieľom bolo identifikovať zdroje PM pomocou štatistických metód prostredníctvom reprezentatívnych vybraných kovov v PM. Pri tomto hodnotení sa používajú kovy, ktoré sú súčasťou cestnej dopravy a obrusu povrchu vozoviek. Matica údajov s riadkami zodpovedajúcimi jednotli-

vým meraniam (vzorkám) a stĺpcom zodpovedajúcim premenným (namerané znečisťujúce látky) slúži ako vstup pre výpočty. Znečisťujúce látky charakterizujúce a definujúce zdroje znečistenia sa vyberajú ako premenné. Za hlavný zdroj znečistenia budeme preto považovať cestnú dopravu (emisie súvisiace so spaľovaním, nespáľovacie emisie a cestný prach). Profil kovov v PM bol použitý na identifikáciu zdrojov.

Na štatistické vyhodnotenie sa použili viacrozmerné štatistické analýzy PCA – analýza hlavných komponentov a FA – faktorová analýza (Yang et al., 2011; Guo et al., 2004; Song et al., 2006; Chen et al., 2010). S cieľom aproximovať príspevok špecifických zdrojov PM bola použitá metóda absolútnych komponentných skóre (APCS) v spojení s viacrozmernou regresnou analýzou – MRA (Guo et al., 2004; Song et al., 2006; Huzlík a kol., 2011).

Dátová matica bola zostavená z koncentrácií vybraných prvkov v $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (Na, Mg, Al, Ca, Cu, Sb, Ba, Pb, Cd, As, Mo, V, Mn, Fe, Zn) a PM_{10} v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ zistených z troch cyklov merania počas roka 2013. Matica údajov obsahovala 16 premenných a 36 objektov (Ďurčanská, Jandačka, 2016). Identifikácia zdrojov PM_{10} bola realizovaná z meraní uskutočnených na stanovišti mimo zastavaného územia pri diaľnici D1.

Metóda hlavných komponentov je jedna z najstarších a najviac používaných metód viacrozmernej štatistickej analýzy. Cieľom analýzy hlavných komponentov je predovšetkým zjednodušenie popisu skupiny vzájomne lineárne závislých alebo korelovaných znakov (vybraných prvkov). Techniku možno popísať ako lineárnu transformáciu pôvodných znakov na nové, nekorelované premenné nazvané hlavné komponenty. Z tejto analýzy bol zistený počet hlavných komponentov, ktoré dostatočne popisujú rozptyl pôvodných znakov. Boli vybrané tri hlavné komponenty, ktoré definujú 78,71 % z celkového rozptylu pôvodných znakov (vybraných prvkov).

Informácia o počte využiteľných hlavných komponentov je nevyhnutná pre samotnú faktorovú analýzu. Faktorová analýza je viacrozmerná technika na vyšetrovanie vnútorných súvislostí a vzťahov (korelácií) a na odhalenie základnej štruktúry zdrojovej matice dát. Týka sa analýzy štruktúry vnútorných vzťahov medzi veľkým počtom pôvodných znakov (vybraných prvkov) pomocou súboru menšieho počtu latentných premenných, zvaných faktory. Najskôr sú identifikované faktory a potom je každému faktoru pridelený obsahový, obvykle fyzikálny význam, pomocou ktorého je každý pôvodný znak vysvetlený vybraným faktorom.

Na obrázkoch na str. 3 obálky sú priradené faktorové záťažky ku konkrétnym znakom a konkrétnym faktorom. Môžu byť vysvetlené ako korelácia medzi faktormi a znakmi. Predstavujú najdôležitejšiu informáciu, na ktorej je založená interpretácia faktorov.

Každý faktor prispieva niekoľkými prvkami (znakmi). Ako rozhodujúca faktorová záťaž bola vybraná hodnota blízka alebo väčšia ako 0,7. Na základe reprezentácie prvkov v konkrétnych faktoroch bolo možné pomenovať nasledujúce faktory: F1 – lokálne spaľovanie a nevýfukové emisie (obrus pneumatík), F2 – výfukové emisie (nafta, mazacie oleje) a zemská kôra, F3 – cestný prach a materiál zimného posypu.

Proces interpretácie (pomenovania) každého faktora je veľmi komplikovaný hlavne preto, že v atmosfére sa miešajú rôzne zdroje PM a chemické prvky môžu pochádzať z rôznych zdrojov. Interpretácia faktorov ako zdrojov PM sa preto zakladá hlavne na hodnotení životného prostredia a potenciálnych zdrojov v tomto prostredí. Každý pomenovaný faktor bol tiež konfrontovaný s možnosťou príspevku zdrojov počas roka. Bola zohľadnená aj variabilita koncentrácií chemických prvkov v rôznych ročných obdobiach.

Na odhad príspevku jednotlivých zdrojov PM možno použiť metódu absolútnych komponentných skóre (*Absolute Principal Component Scores* – APCS) v spojení s MRA výberový priemer j-tej veličiny (Guo et al., 2004; Song et al., 2006; Huzlík a kol., 2011).

K priemernej koncentrácii tuhých častíc PM₁₀ prispieva faktor 1 hodnotou 23 %, faktor 2 sa podieľa 33 % a faktor 3 dosahuje hodnotu 44 % (tab. 6). Priemerné absolútne príspevky faktorov a priemerné percentuálne príspevky faktorov sa vzťahujú k priemernej koncentrácii PM₁₀ 25,79 µg.m⁻³ zo všetkých analyzovaných údajov.

* * *

Štatistickým analýzám boli podrobené merania z oblasti pri diaľnici D1. Merania PM₁₀ sa uskutočnili počas troch meracích cyklov v januári, máji a novembri 2013. Meracia stanica bola umiestnená v otvorenej oblasti mimo zastavaného územia. Celkovo sa uskutočnilo 36 odberov 24-hodinových vzoriek tuhých častíc. Vzorky častíc PM₁₀ sa podrobili chemickej analýze na stanovenie množstva 17 chemických prvkov – prevažne ťažkých kovov. Koncentrácie chemických prvkov sa použili na identifikáciu zdrojov PM₁₀ pomocou viacrozmernej štatistickej analýzy. Viacrozmerná štatistická analýza ukázala, že na meracom stanovišti sa podieľajú na tvorbe PM tri faktory: F1 – zdroj lokálneho spaľovania a nespálovacích emisií z dopravy (oter pneumatík), F2 – zdroj výfukových plynov (motorová nafta, mazací olej) a časti zemskej kôry, F3 – zdroj cestného prachu a pozostatky zimnej údržby. Tieto faktory ukázali významnú väzbu s prvkami: faktor 1 – s Fe, Mn, Cu, Zn, As, Mo, Sb, Cd, Pb; faktor 2 – s Mg, Ca, V, Al, Fe, Mn, Ba; faktor 3 – s Na.

Tab. 6. Absolútne príspevky faktorov k priemernej koncentrácii PM₁₀

Faktor [µg.m ⁻³]	Faktor1	Faktor 2	Faktor 3
Absolútne komponentné skóre (APCS)	6,03	8,44	11,30

Vysvetlivky: faktor 1 – lokálne spaľovanie a nevýfukové emisie z dopravy (oter pneumatík), faktor 2 – výfukové emisie (nafta, mazacie oleje) a zemská kôra, faktor 3 – cestný prach a materiál zimného posypu

Identifikované zdroje znečistenia prispievajú k tvorbe PM₁₀ odlišne, ako ukázala aj analýza APCS (tab. 6). Lokálne spaľovanie a nespálovací dopravný zdroj (pneumatiky) prispievajú k tvorbe PM₁₀ 23 %, zdroj výfukových plynov – motorová nafta, mazací olej a časti zemskej kôry 33 % a cestný prach a zimné solenie 44 %. Cestný prach a zimné solenie prispievajú najviac k tvorbe PM₁₀ na tomto meracom stanovišti. Diaľnice sú v priebehu zimy iba solené a spätné rozptýlenie, resuspenzia týchto materiálov z intenzívnej zimnej údržby významne prispieva k znečisteniu ovzdušia tuhými časticami.

Cieľom tejto štúdie bolo objasniť zdroje, ktoré prispievajú k znečisťovaniu ovzdušia v okolí cestných komunikácií v podobe PM a určiť ich podiel. Mimo zastavaného územia v okolí diaľnice D1, v otvorenej krajine sa cestná doprava prejavuje ako hlavný zdroj PM. Analýzy však naznačujú, že niektoré zdroje PM sa môžu kombinovať v konkrétnych faktoroch (faktor 1 – 3). Najčastejšie je to lokálne vykurovanie, ktoré môže prispieť k faktoru 1 v závislosti od situovania obytnej časti alebo tiež umiestnenie priemyselných zdrojov.

Hodnotenie kvality ovzdušia vykonáva poverená organizácia vo všetkých aglomeráciách a zónach pre tie znečisťujúce látky, pre ktoré sú určené limitné alebo cieľové hodnoty. Monitoring ovzdušia, ktorý sa vykonáva v zmysle zákona č. 24/2006 Z. z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov, nespadá pod hodnotenie kvality ovzdušia v zmysle zákona č. 137/2010 Z. z. o ovzduší. Ten preferuje stacionárne zdroje znečisťovania. Zákon o ovzduší mobilné zdroje síce definuje, ale nezaobera sa možnosťou ich monitorovania a hodnotenia znečistenia ovzdušia mobilnými zdrojmi. Vyhláška MŽP SR č. 244/2016 Z. z. o kvalite ovzdušia rieši okrajovo len indikatívne merania, ktorými sa realizuje monitoring v okolí pozemných komunikácií. Ten sa aj vykonáva, ale bez spätnej väzby, najčastejšie na posudzovanie vplyvov na životné prostredie.

Tento príspevok vznikol s podporou Kultúrnej a edukačnej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR č. 045ŽU-4/2017 Environmentálna príprava inžinierov pre uplatnenie vo verejnej správe a s podporou projektu Univerzitný vedecký park Žilinskej univerzity v Žiline (ITMS:26220220184) v rámci OP Výskum a vývoj spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- Balachandran, S., Meena, B. R., Khillare, P. S.: Particle Size Distribution and its Elemental Composition in the Ambient Air of Delhi. *Environment International*, 2000, 26, p. 49 – 54.
- Breyse, P. N., Delfino, R. J., Dominici, F., Elder, A. C. P., Frampton, M. W., Froines, J. R., Geyh, A. S., Goldeski, J. J., Gold, D. R., Hopke, P. K., Koutrakis, P., Li, N., Oberdörster, G., Pinkerton, K. E., Samet, J. M., Utell, M. J., Wexler, A. S.: US EPA Particulate Matter Research Centers: Summary of Research Results for 2005 – 2011. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2013, 6, 2, p. 333 – 355.
- Ďurčanská, D., Jandačka, D.: Chemical Composition of PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 and Influence of Meteorological Conditions on them in Žilina Self-Governing Region, Slovakia. *Solid State Phenomena*, 2016, 244, p. 171 – 181.
- Ďurčanská, D. a kol.: Analýza metód vyhodnocovania znečisťovania ovzdušia z cestnej dopravy: rozborová úloha. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2014, 84 s.
- European Environmental Agency: Air Quality in Europe – 2013 Report. Copenhagen, Denmark: EEA, 2013, 112 p.
- Grice, S., Stedman, J., Kent, A., Hobson, M., Norris, J., Abbott, J., Cooke, S.: Recent Trends and Projections of Primary NO_2 Emissions in Europe. *Atmospheric Environment*, 2009, 43, 13, p. 2154 – 2167.
- Guo, H., Wang, T., Louie, P. K. K.: Source Apportionment of Ambient Non-Methane Hydrocarbons in Hong Kong: Application of a Principal Component Analysis/Absolute Principal Component Scores (PCA/APCS) Receptor Model. *Environmental Pollution*, 2004, 129, 3, p. 489 – 498.
- Huzlík, J., Ličbinský, R., Mikuška, P.: Identifikace zdrojů resuspendovaných pevných částic statistickými metodami. In: Vodička, P. (ed.): Sborník XII. výroční konference České aerosolové společnosti. Čejkovice: Česká aerosolová společnost, 2011, p. 69 – 74.
- Chen, X., Xia, X., Zhao, Y., Zhang, P.: Heavy Metals Concentrations in Roadside Soils and Correlation with Urban Traffic in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181, 1 – 3, p. 640 – 646.
- Jandačka, D.: Vplyv cestnej dopravy na výskyt tuhých častíc. Dizertačná práca. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2013, 134 s.
- Jandačka, D., Ďurčanská, D., Bujdoš, M.: The Contribution of Road Traffic to Particulate Matter and Metals in Air Pollution in the Vicinity of an Urban Road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 50, p. 397 – 408. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.024>
- Kukutschová, J., Moravec, P., Tomášek, V., Matějka, V., Smolík, J., Schwarz, J., Seidlerová, J., Safářová, K., Filip, P.: On Airborne Nano/Micro-Sized Wear Particles Released from Low-Metallic Automotive Brakes. *Environmental Pollution*, 2011, 159, 4, p. 998 – 1006.
- Obara, P. G., Obara, Ch. E., Roberts, C., Young, Ch. H., Williams, C. D.: Influence of Vehicular Traffic on a Major Trunk Road on Rural Air Quality in UK. *Microchemical Journal*, 2011, 99, p. 344 – 351.
- Pant, P., Harrison, R. M.: Estimation of the Contribution of Road Traffic Emissions to Particulate Matter Concentrations from Field Measurements: A Review. *Atmospheric Environment*, 2013, 77, p. 78 – 97.
- Sanderson, P., Delgado-Saborit, J. M., Harrison, R. M.: A Review of Chemical and Physical Characterisation of Atmospheric Metallic Nanoparticles. *Atmospheric Environment*, 2014, 94, p. 353 – 365.
- Schnitzhofer, R., Beauchamp, J., Dunkl, J., Wisthaler, A., Weber, A., Hansel, A.: Long-Term Measurements of CO, NO , NO_2 , Benzene, Toluene and PM_{10} at a Motorway Location in an Austrian Valley. *Atmospheric Environment*, 2008, 42, 5, p. 1012 – 1024.
- Song, Y., Xie, S., Zhang, Y., Zeng, L., Salmon, L. G., Zheng, M.: Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing Using Principal Component Analysis/Absolute Principal Component Scores and UNMIX. *Science of the Total Environment*, 2006, 372, 1, p. 278 – 286.
- STN EN 12341: Ochrana ovzdušia. Vonkajšie ovzdušie. Stanovenie hmotnostnej koncentrácie suspendovaných častíc PM_{10} alebo $PM_{2.5}$ štandardnou gravimetrickou metódou merania. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2016, 44 s.
- STN EN 14902: Ochrana ovzdušia. Vonkajšie ovzdušie. Štandardná metóda na stanovenie Pb, Cd, As a Ni vo frakcii PM_{10} suspendovaných častíc. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2006, 48 s.
- Thorpe, A., Harrison, R. M.: Sources and Properties of Non-Exhaust Particulate Matter from Road Traffic: A Review. *Science of the Total Environment*, 2008, 400, 1 – 3, p. 270 – 282.
- Yang, Z., Lu, W., Long, Y., Bao, X., Yang, Q.: Assessment of Heavy Metals Contamination in Urban Topsoil from Changchun City, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108, 1, p. 27 – 38.

doc. Ing. Daniela Ďurčanská, CSc.,

daniela.durcanska@fstav.uniza.sk

Ing. Dušan Jandačka, PhD., dusan.jandacka@fstav.uniza.sk

Katedra cestného staviteľstva Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina