

HODNOCENÍ TESTOVACÍHO MĚŘENÍ RŮZNÝCH TYPŮ MALÝCH SENZORŮ KVALITY OVZDUŠÍ NA OBSERVATOŘI TUŠIMICE:

Cairclip (Cairpol, FR), PMS 7003 (Plantower, CHN),

OPC-N2 (Alphasense, UK)



Měření realizováno ve spolupráci se společnostmi



VAISALA



Zpracováno: Petra Bauerová, Josef Keder

Schváleno:

Datum: 7. března 2019

Manažerské shrnutí

V průběhu poslední dekády lze zaznamenat velký nárůst poptávky po cenově dostupných, rozměrově malých a lehce přenositelných senzorech na měření kvality ovzduší (tzv. mikrosenzory či malé senzory), jakož i jejich nabídky na trhu.

Tento typ senzorů lze obecně rozdělit do několika kategorií na základě principu měření a z něho plynoucích možností využití pro detekci určité znečišťující látky.

Tyto cenově nenáročné přístroje se jeví jako perspektivní pro zahuštění stávající sítě monitorování kvality ovzduší, k pokrytí míst, kde by bylo z různých důvodů obtížné zřizovat monitorovací stanice stávajícího typu. Vzhledem k jejich malým rozměrům a nízké hmotnosti mohou být tato čidla rovněž využívána pro mobilní měření a na bezpilotních letových prostředcích (dronech).

Z dosavadních zkušeností získaných při nasazení těchto senzorů v různých zemích ovšem vyplynula řada problémů, které jsou s používáním mikrosenzorů spojeny.

Z výsledků řady testovacích a srovnávacích měření v ČR i v zahraničí (ČHMÚ, US EPA, JRC EC, NILU, WHO, WMO) vyplývá, že malé senzory:

- mají ve srovnání s používanými metodami vyšší detekční prahy a nižší citlivost měření (mimo jiné důsledek miniaturizace technologie),
- projevuje se u nich výrazná interference s jinými znečišťujícími látkami
- jsou značně citlivé na meteorologické podmínky, zejména na teplotu a vlhkost vzduchu
- u některých výrobců se vyskytují významné rozdíly v měření mezi různými kusy stejného typu čidla
- cenová výhodnost může být pouze zdánlivá; průměrná reálná doba životnosti většiny senzorů aplikovaných pro venkovní měření je jeden rok (některými výrobci uváděné maximum životnosti až 3 roky)
- nejsou zpracována pravidla metrologické návaznosti mikrosenzorů na referenční metody a postupy jejich kontroly před nasazením do měřicích sítí a průběžných kontrol kvality dat.

Možnost, jak se vyrovnat s nižší kvalitou dat ve srovnání s referenčními metodami, je využití matematicko-statistických postupů pro zpracování velkých objemů dat – vytěžování dat (data mining), zpracování dat vágní povahy, fuzzy postupy apod.

Vzhledem k technickému vývoji senzorů lze však i přes výše uvedené problémy říci, že tyto senzory představují významný potenciál do budoucna, neboť řada jmenovaných nedostatků může být dalším vývojem odstraněna nebo minimalizována.

Malé senzory tedy mohou být v současnosti využity jako doplněk stávající monitorovací sítě, pro screeningové odhalování případných problémových oblastí (hotspotů) a detekci trendů vývoje. Pro efektivní využití senzorů k těmto účelům je ovšem důležité dodržovat metodické postupy pro eliminaci výskytů náhodných chyb v měření.

Za stávající úrovně stavu vývoje techniky malých senzorů a při současné úrovni poznání platí následující zásadní závěry:

- **Data získávaná z malých senzorů nepředstavují rovnocennou alternativu zavedených postupů v monitoringu kvality ovzduší.**
- **Nelze je využívat pro vyhodnocování plnění požadavků vyplývajících z environmentální legislativy ani jako podkladů pro rozhodnutí, která by zasahovala do života občanů a případně omezovala jejich práva, jakož i v případech, kdy by taková rozhodnutí měla za následek výrazné ekonomické náklady nebo ztráty.**

OBSAH

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY MALÝCH SENZORŮ	5
2	TESTOVÁNÍ MALÝCH SENZORŮ NA OBSERVATOŘI V TUŠIMICÍCH.....	6
2.1	Kontrola kvality a zpracování dat naměřených malými senzory	6
2.1.1	CAIRCLIP SENZORY PLYNNÝCH LÁTEK (Cairpol, Environment SA, Envea, FR)	7
2.1.1.1	Technická specifikace Cairclip senzorů.....	8
2.1.1.2	Metodika měření	8
2.1.1.3	Výsledky měření	9
2.1.1.4	Shrnutí výsledků měření	13
2.1.2	PRACHOMĚR PMS 7003 (Plantower, CHN).....	15
2.1.2.1	Technická specifikace prachoměru PMS 7003	16
2.1.2.2	Metodika měření	16
2.1.2.3	Výsledky měření	17
2.1.2.4	Shrnutí výsledků	25
2.1.3	PRACHOMĚR OPC-N2 (Alphasense, UK)	28
2.1.3.1	Technická specifikace prachoměru OPC-N2.....	28
2.1.3.2	Metodika měření	29
2.1.3.3	Výsledky měření	29
2.1.3.4	Shrnutí výsledků	38
3	ZÁVĚR.....	39
4	Příloha č. 1 – Technická specifikace referenčních monitorů (RM) používaných ve státní imisní monitorovací síti.....	41
5	Příloha č. 2 – Technická specifikace Palas Fidas200 analyzátorů	41
6	Použitá literatura	43

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY MALÝCH SENZORŮ

Za posledních 10 let lze zaznamenat velký nárůst nabídky a poptávky po cenově dostupných, rozměrově malých a lehce přenositelných senzorech na měření kvality ovzduší (tzv. mikrosenzory či malé senzory). Tyto mikrosenzory lze obecně rozdělit do několika kategorií na základě principu měření, a to na elektrochemické (pro plynné polutanty NO₂, NO, SO₂, O₃, CO), metal-oxidové (pro NO₂, O₃ a CO), fotoionizační (pro VOC) či optické čítače částic (pro aerosoly PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀) [1,2]. Přestože jsou tyto cenově nenáročné nástroje poměrně perspektivní z hlediska možnosti získání dat i z doposud nepokrytých míst (v horizontální i vertikální rovině), a mohou tak být využity k zahuštění oficiálních národních monitorovacích sítí či k identifikaci nových hotspotů [3,4], má tato technologie i svá úskalí, která musí být při hodnocení naměřených dat uvážena.

Z dosavadních zkušeností z různých zemí vyplývá, že zvláštní obezřetnost by měla být věnována již při výběru vhodných (důvěryhodných) typů senzorů. Obecně by měly být podporovány spíše otevřené systémy, nikoli systémy typu „černá skříňka“, o kterých nelze nic zjistit. Dále je potřeba se zaměřit na vhodné způsoby zpracování dat (zejména jejich validaci) a následný způsob interpretace výsledků, jelikož samotné měření může být silně ovlivňováno nejen přiznanou sníženou přesností měření senzorů [5], ale i aktuálními meteorologickými podmínkami (zejména vliv teploty a vlhkosti vzduchu) či interferencí různých polutantů (pozorováno zejména u senzorů pro plynné látky) [2,6,7].

Tento dokument vznikl na základě vlastního hodnocení kvality měření několika typů malých senzorů, jakožto průzkum potencionálně použitelných čidel pro účely rozvoje experimentálního měření v těžko dostupných místech v rámci ČHMÚ.

2 TESTOVÁNÍ MALÝCH SENZORŮ NA OBSERVATOŘI V TUŠIMICÍCH

V rámci výzkumu meteorologie a kvality ovzduší v mezní vrstvě atmosféry se problematikou malých senzorů kvality ovzduší v posledních letech zabývá i Observatoř Tušimice (lokální observatoř ČHMÚ v Podkrušnohoří), a to zejména pro možnost měření imisního znečištění ovzduší ve vertikálním profilu (stožárové měření či měření za pohybu pomocí bezpilotních systémů). Pro tyto účely bylo v průběhu roku 2015 a poté kontinuálně od září roku 2017 do současnosti testováno několik sad malých senzorů. Všechny tyto sady byly umístěny v průvzdušných boxech v bezprostřední blízkosti referenční automatické imisní monitorovací stanice (AIM). Během testování byla hodnocena kvalita měření párových sad senzorů, a to jak mezi sebou (hodnocení souměření v rámci sady stejných analyzátorů), tak v porovnání s referenčními monitory (RM, technická specifikace jednotlivých monitorů viz **Příloha č. 1**). V případě měření koncentrací různých frakcí prachových částic byla data ze senzorů dále porovnávána i s daty z nereferenčního analyzátoru částic Fidas200 (Palas, DE), jelikož se jedná o podobný princip měření (optoelektronická metoda) stanovující hmotnostní koncentraci částic PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ jako v případě malých prachoměrů (technická specifikace a porovnání s RM viz **Příloha č. 2**).

2.1 *Kontrola kvality a zpracování dat naměřených malými senzory*

Všechna naměřená data byla před dalším statistickým zpracováním ověřena. Případné výpadky či nulové a záporné hodnoty byly označeny jako chybějící hodnoty (NA). Hodinové průměry byly vypočítány z 10minutových hodnot (zprůměrováno systémem) v původních jednotkách dle nastavení od výrobce (plynné látky ppb či ppm, aerosolové částice v $\mu\text{g}/\text{m}^3$). V případě, že bylo více jak 40 % NA v dané hodině (tzn. více jak 2.4 hodnot), byl hodinový průměr označen také jako NA. Platné vypočítané hodinové průměry byly posléze pro možnost srovnání s naměřenými hodinovými průměry RM převedeny na $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dle převodních faktorů stanovených Evropskou komisí (při 20 °C a 1013 mB; viz **Tab. č. 1**). Za extrémně odlehle hodnoty naměřené senzory byly považovány takové, které přesahovaly trojnásobek maximální hodinové koncentrace naměřené RM (podobně jako v [8]). Přestože pro účely zhodnocení kvality měření senzorů byly tyto extrémní hodnoty v datasetu ponechány, při reálném monitoringu ovzduší by za předpokladu udržení reprezentativnosti naměřených dat měly být takovéto hodnoty bezpochyby vyřazeny.

V rámci hodnocení výkonu malých senzorů byly použity jednoduché korelace (použit neparametrický Spearmanův korelační koeficient - r_s) a regresní vztahy vycházející z porovnání dat s RM.

Tab. č. 1. Převodní faktory mezi ppb / ppm a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pro plynné polutanty (O_3 , NO_2 , CO a SO_2) dle standardů Evropské komise (EC) a Světové zdravotnické organizace (WHO). Použité konverzní faktory jsou zvýrazněny v červeném obdélníku.

Pollutant	EC 20 °C and 1013mb	WHO 25°C and 1013mb
Ozone	1 ppb = 1.9957 $\mu\text{g m}^{-3}$	1 ppb = 1.96 $\mu\text{g m}^{-3}$
Nitrogen dioxide	1 ppb = 1.9125 $\mu\text{g m}^{-3}$	1 ppb = 1.88 $\mu\text{g m}^{-3}$
Carbon monoxide	1 ppm = 1.1642 mg m^{-3}	1 ppm = 1.15 mg m^{-3}
Sulphur dioxide	1 ppb = 2.6609 $\mu\text{g m}^{-3}$	1 ppb = 2.62 $\mu\text{g m}^{-3}$
Benzene	1 ppb = 3.2430 $\mu\text{g m}^{-3}$	1 ppb = 3.19 $\mu\text{g m}^{-3}$
1,3-butadiene	1 ppb = 2.2452 $\mu\text{g m}^{-3}$	1 ppb = 2.21 $\mu\text{g m}^{-3}$

2.1.1 CAIRCLIP SENZORY PLYNNÝCH LÁTEK (CAIRPOL, ENVIRONMENT SA, ENVEA, FR)

Elektrochemické senzory pro plynné polutanty od firmy Cairpol jsou malé autonomní měřící jednotky válečkovitého tvaru s průměrem 32 mm, délkou 62 mm a hmotností 55 g (**Obr. č. 1**). Každý senzor má integrovanou baterii s průměrnou provozní dobou od 24 do 36 hodin (plně nabitě) nebo může být napájen přímo ze zdroje (odběr 5V/500mA). Každý senzor je také vybaven malým displayem, kde jsou zobrazovány měřené hodnoty či různé varovné a chybové hlášky. Interval měření je možno zvolit 1minutový či 15minutový (průměr). Produkované protokoly jsou v podobě ASCII nebo CSV souborů.



Obr. č. 1. Autonomní měřící jednotky Cairclip od firmy Cairpol (Environment SA, Envea, FR).
Foto: P. Bauerová

2.1.1.1 Technická specifikace Cairclip senzorů

SO₂ Cairclip senzor má uváděný rozsah měření zhruba 0 – 1000 ppb, limit detekce okolo 50 ppb a přiznanou nejistotu měření < 25 %. Dále je uváděno výrobcem, že se během měření může projevit silná negativní interference s oxidy NO₂ a O₃ (~ -125 %) či pozitivní interference se sirnými sloučeninami (H₂S, ~5 %).

NO₂ senzor má uváděn rozsah měření 0 – 250 ppb, limit detekce 20 ppb a přiznanou nejistotu měření < 30 %. Mimo negativní interference se sirnými sloučeninami (viz předchozí odstavec), je dále uváděna silná interference s Cl₂ a O₃ (~ 80 %).

Poměrně originálním výrobkem na světovém trhu je kombinovaný Cairclip senzor O₃/NO₂, který má stejný rozsah měření, limit detekce i nejistotu měření jako samostatný senzor na NO₂. Přestože přesný algoritmus, kterým je převáděna naměřená odpověď tohoto senzoru na samotnou koncentraci O₃, není znám (a nelze proto tuto koncentraci extrahovat), domníváme se, že senzor měří přibližnou sumu těchto dvou oxidů (vzhledem k jejich silné vzájemné interferenci [7,9,10]).

CO Cairclip senzor má rozsah měření 0 – 20 ppm, limit detekce 0.05 ppm a nejistotu měření < 25 %. Možné interference jsou uváděny s H₂, H₂S, NO_x či SO₂.

Všechny výše zmíněné (výrobci uváděné) technické specifikace senzorů jsou založeny na laboratorních testech ve standardních provozních podmínkách (T = 20 °C ± 2 °C, RH = 50 % ± 10 % a p = 1013 hPa ± 5 %). Možné provozní podmínky senzoru jsou pak uváděny při teplotách -20 až 50 °C a relativní vzdušné vlhkosti od 15 do 90 % (v nekondenzujících podmínkách) [7,11].

2.1.1.2 Metodika měření

Párová sada Cairclip senzorů pro plynné polutanty byla trvale zapojena na elektrický zdroj a datovou sběrnici v průvzdušném boxu instalovaném na střechu AIM stanice (**Obr. č. 2**). Sensory měřily nepřetržitě od konce listopadu 2017 do konce září 2018, kdy byla dosažena jejich maximální životnost (poté již neměřily). Párový set senzorů pro každý polutant je v datech označován s příponou 1 a 2 (např. NO₂_Cair1 = senzor 1, NO₂_Cair2 = senzor 2).



Obr. č. 2. Párové sady Cairclip senzorů na SO₂, NO₂, O₃/NO₂ a CO (b) instalované v průvzdušném boxu (a) na střeše referenční monitorovací stanice na Observatoři v Tušimicích (c). Foto: P. Bauerová

2.1.1.3 Výsledky měření

Popisná statistika hodinových koncentrací plyných polutantů naměřených Cairpol senzory a RM je zobrazena v **Tab. č. 2**. Hodnocení souměření daných čidel v párech ukázalo, že i přes silnou pozitivní korelaci ($r_s > 0.8$, $p < 0.05$, **Tab. č. 3**) naměřených koncentrací v rámci všech dvojic senzorů byl u čidel pro SO₂ a CO již od počátku měření pozorován výrazný posun v datech (viz rozdíly ve směrodatných odchylkách v **Tab. č. 2**). Čidla SO₂ a CO tedy nebyla vzhledem k nedůvěryhodnosti měření dále použita do dalších korekčních analýz (kapitola 3 a 4). Vyhovujících výsledků z pohledu souměření v párech naopak dosahovaly senzory pro NO₂ a O₃/NO₂. (**Tab. č. 2**).

Během porovnání naměřených koncentrací senzory a RM byla zjištěna nejslabší korelace u senzorů SO₂ (viz **Tab. č. 4**), které také měly nejvyšší procento extrémně odchýlených hodnot. Senzor SO₂_Cair1 přesahoval trojnásobek maximální hodinové koncentrace měřené RM

v 51 % naměřených hodnot, senzor SO₂_Cair2 pak tuto hodnotu přesahoval v 10 % naměřených hodnot (**Obr. č. 3**). U samostatných NO₂ Cairpol senzorů byly hodnoty korelace s RM sice signifikantní, nicméně v důsledku výrazného nadhodnocování i při nízkých koncentracích u RM byly jen velmi slabé a negativní ($r_s = -0.26$, **Tab. č. 4**; $R^2 = 0.10$ s kvadratickým proložením, **Obr. č. 5**). Naopak nejsilnější korelace byla dosažena u kombinovaných senzorů O₃/NO₂ ($r_s = 0.68$, **Tab. č. 4**; $R^2 = 0.80$ s polynomickým proložením při porovnání se sumou oxidů O₃ a NO₂ naměřených RM, **Obr. č. 4**).

Tab. č. 2. Popisná statistika hodinových koncentrací SO₂, NO₂, O₃ a CO naměřených Cairclip senzory (Cair1 a Cair2) a referenčními monitory (RM) v období 11/2017 až 09/2018. N = počet platných hodinových měření, SD = směrodatná odchylka, SE = střední chyba průměru. V případě CO chybí RM na lokalitě Tušimice. Senzory zvýrazněné žlutou barvou dosahovaly lepších výsledků v porovnání naměřených koncentrací v páru než senzory zvýrazněné červenou barvou (výrazné odchylky v měření mezi sebou).

Proměnná	N	Průměr	Min	Max	SD	SE
SO ₂ _Cair1 (µg/m ³)	7031	255.62	119.87	904.42	121.56	1.45
SO ₂ _Cair2 (µg/m ³)	5383	80.76	0.52	500.64	83.24	1.14
SO ₂ RM (µg/m ³)	6885	4.45	1.30	70.60	4.52	0.05
NO ₂ _Cair1 (µg/m ³)	7031	58.31	33.08	169.04	20.34	0.24
NO ₂ _Cair2 (µg/m ³)	7031	56.52	31.58	167.00	20.46	0.24
NO ₂ RM (µg/m ³)	6936	1.59	0.60	56.40	3.05	0.04
O ₃ /NO ₂ _Cair1 (µg/m ³)	7031	44.58	19.78	165.09	21.90	0.26
O ₃ /NO ₂ _Cair2 (µg/m ³)	7031	46.86	21.78	168.71	22.26	0.27
O ₃ RM (µg/m ³)	6959	65.01	1.00	181.70	32.07	0.38
O ₃ + NO ₂ RM (µg/m ³)	6630	77.61	19.20	188.00	28.26	0.35
CO_Cair1 (µg/m ³)	7031	2.11	0.942	7.76	1.06	0.01
CO_Cair2 (µg/m ³)	7031	14.26	1.09	26.21	8.33	0.10

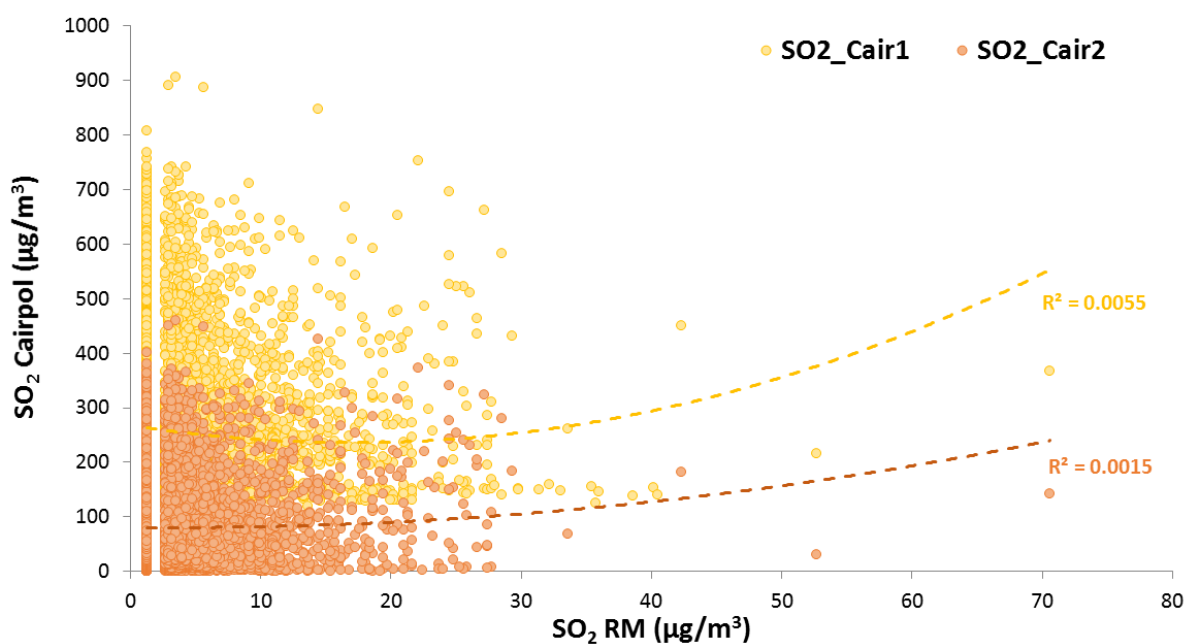
Tab. č. 3. Korelační matice průměrných hodinových koncentrací SO₂, NO₂, O₃ a CO naměřených analogickými senzory Cairpol 1 a 2 (Cair1, Cair2). Zobrazeny hodnoty korelačního koeficientu (r_s) s $p < 0.05$. N = 5383.

Proměnná	SO ₂ _Cair2	NO ₂ _Cair2	O ₃ /NO ₂ _Cair2	CO_Cair2
SO ₂ _Cair1	0.99	1.00	1.00	0.80

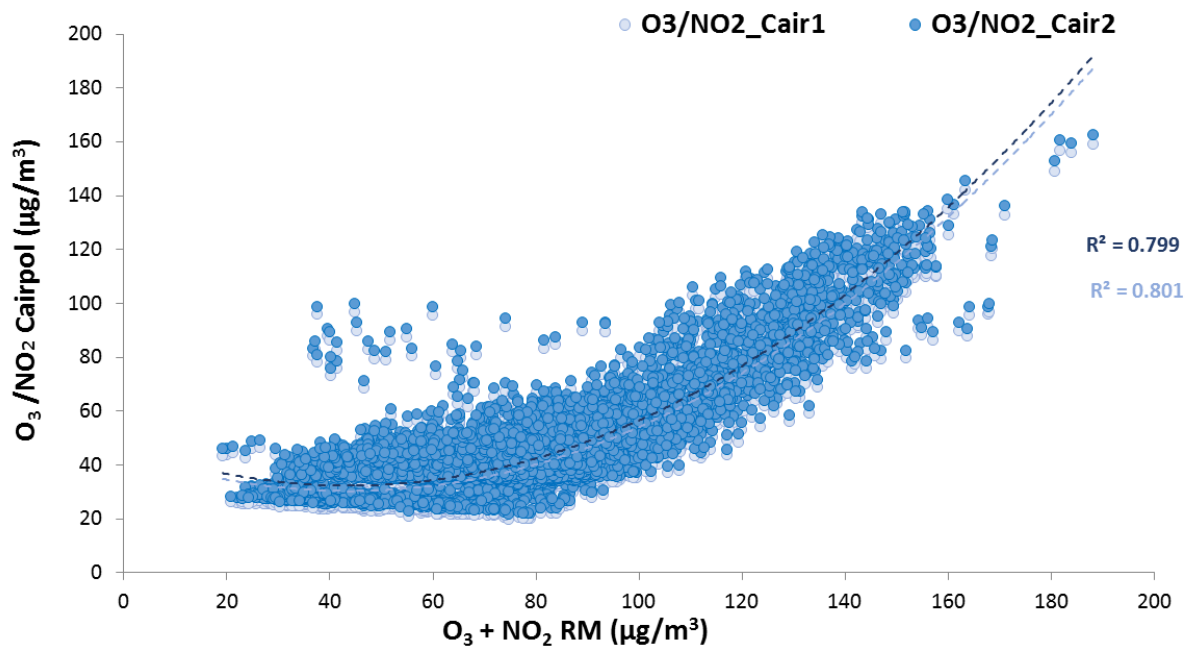
NO₂_Cair1	0.99	1.00	1.00	0.82
O₃/NO₂_Cair1	0.98	1.00	1.00	0.79
CO_Cair1	0.99	1.00	1.00	0.80

Tab. č. 4. Korelační matice průměrných hodinových koncentrací SO₂, NO₂ a O₃ naměřených senzory Cairpol 1 a 2 (Cair1, Cair2) a RM. Zobrazeny hodnoty korelačních koeficientů (r_s) s $p < 0.05$ (mimo nesignifikantních hodnot vyznačených kurzívou s $p > 0.05$). Pro Cair1 N = 6321, pro Cair2 N = 4814.

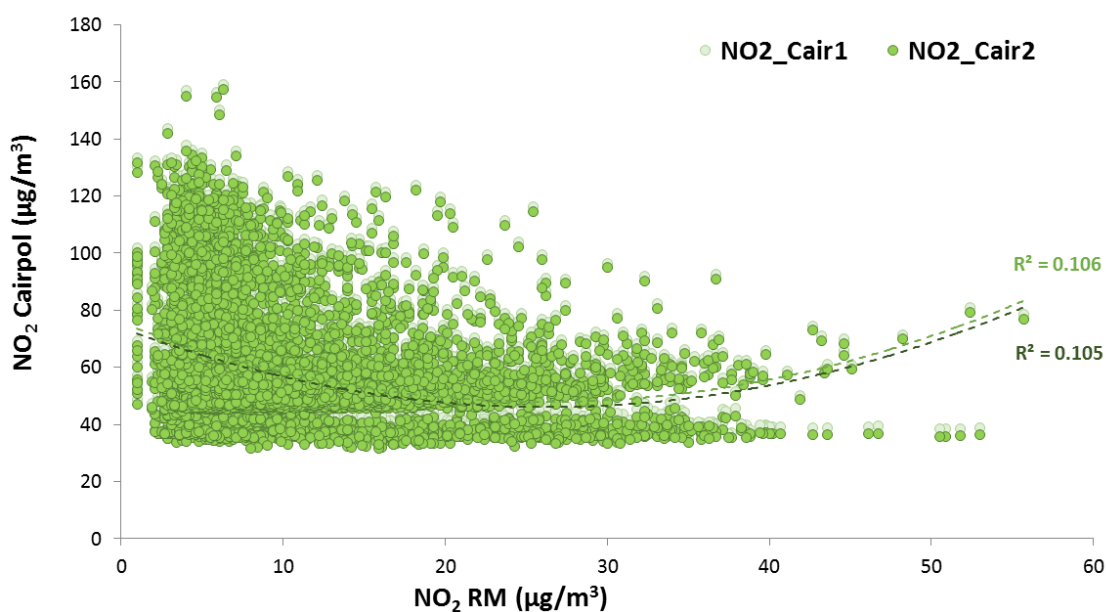
Proměnná	SO ₂ _RM	NO ₂ _RM	O ₃ _RM
SO₂_Cair1	-0.12	-0.28	0.69
NO₂_Cair1	-0.13	-0.29	0.69
O₃/NO₂_Cair1	-0.12	-0.27	0.69
SO₂_Cair2	<i>0.00</i>	-0.28	0.69
NO₂_Cair2	<i>0.01</i>	-0.26	0.69
O₃/NO₂_Cair2	<i>0.02</i>	-0.25	0.68



Obr. č. 3. Porovnání hodinových koncentrací SO₂ naměřených Cairpol senzory (osa y; žlutě SO₂_Cair1 a oranžově SO₂_Cair2) a referenčním monitorem AIM stanice (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM.



Obr. č. 4. Porovnání hodinových koncentrací O₃ a NO₂ naměřených kombinovanými Cairpol senzory (osa y; O₃/NO₂_Cair1 a O₃/NO₂_Cair2) a RM (osa x). R² = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM.



Obr. č. 5. Porovnání hodinových koncentrací NO₂ naměřených samostatnými Cairpol senzory (osa y; NO₂_Cair1, NO₂_Cair2) a RM (osa x). R² = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM.

2.1.1.4 Shrnutí výsledků měření

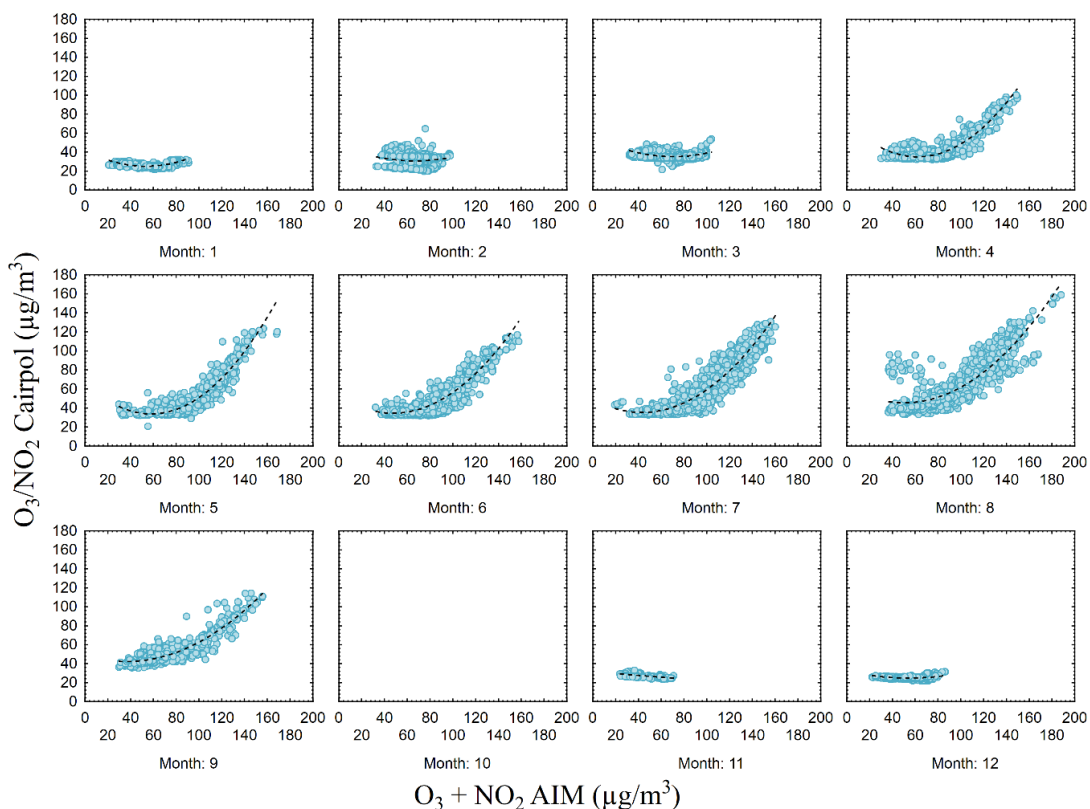
Z kompletní sady (elektrochemických) senzorů plyných látek od firmy Cairpol nejhůře dopadly senzory na SO₂ a CO, které vykazovaly podezřele nereálné hodnoty jak v porovnání mezi sebou v párech, tak v porovnání s RM.

Naopak nejlepších výsledků v této sadě dosahovaly kombinovaná čidla Cairpol O₃/NO₂, která měřila konzistentně jak mezi sebou, tak dosahovala vyhovujících hodnot v porovnání s RM. Určitou nevýhodou tohoto čidla se jeví nemožnost oddělení dvou plyných složek, které měří. Z porovnání koncentrací naměřených samostatným čidlem pro NO₂ a kombinovaným čidlem O₃/NO₂ je evidentní, že se nejedná o čistou sumu těchto oxidů (viz předchozí kapitola **Tab. č. 2**) a přesný algoritmus v tomto případě není znám. Pravděpodobně se ovšem jedná o způsob, jak tato firma řeší problematiku interference těchto dvou oxidů, která často vede k velmi slabým výsledkům u čidel konstruovaných pro individuální plyné látky (viz hodnocení senzorů od různých výrobců [9]). Na zvýšené riziko projevu neodfiltrované interference plynů ostatně poukazuje i samotná sada Cairpol senzorů, kdy byla zjištěna velmi silná pozitivní korelace mezi všemi koncentracemi naměřenými u různých plyných látek ($r_s > 0.80$; viz kapitola výsledky **Tab. č. 3**). Takováto pozitivní korelace je ovšem vzhledem k chemickým vlastnostem a reakcím u některých plyných látek poněkud neobvyklá (viz **Tab. č. 5** níže pro RM).

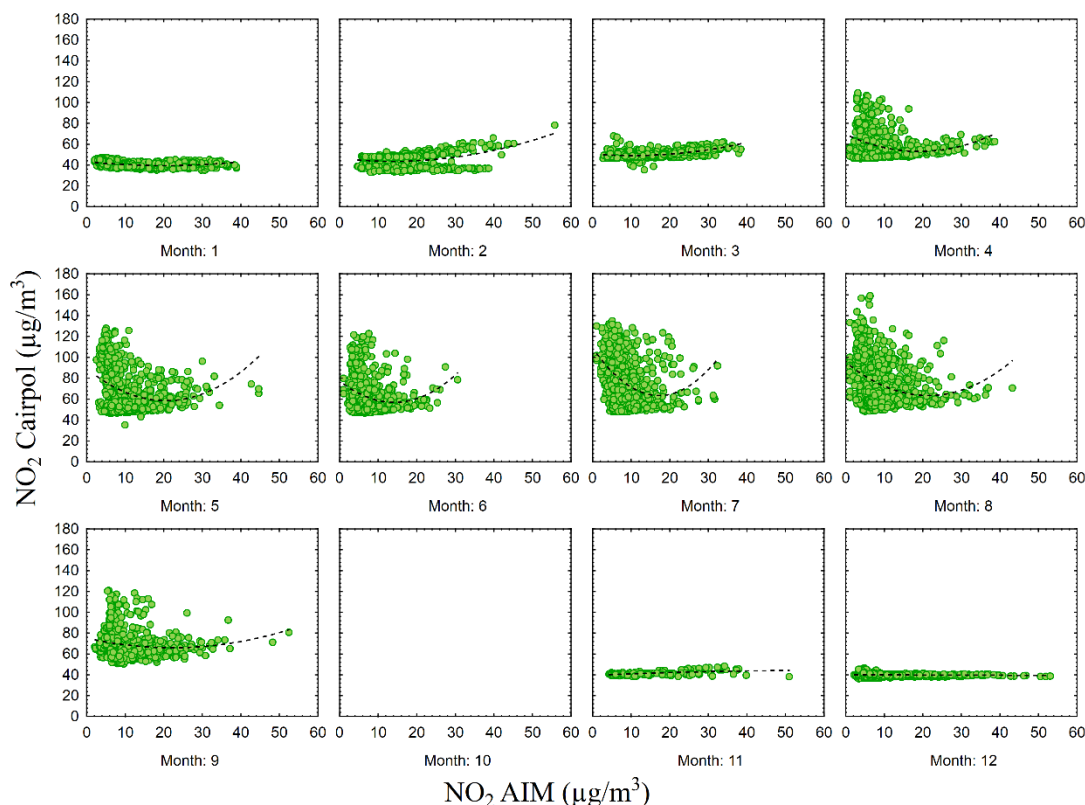
Důležitým bodem k zohlednění při hodnocení kvality měření senzorů je i vliv sezónnosti, který byl různým způsobem evidentní na všech Cairpol senzorech. Například senzor O₃/NO₂ vykazoval daleko lepší kvalitu měření v porovnání s RM v teplejších měsících (od dubna do září) než v těch chladnějších (listopad až březen; viz **Obr. č. 6**). Naopak senzory SO₂ a NO₂ měřily v porovnání s RM nejhůře v teplejších měsících a o něco málo lépe v těch chladnějších (**Obr. č. 7**).

Tab. č. 5. Korelační matice hodinových koncentrací plyných polutantů (SO₂, NO₂ a O₃) naměřených na RM Observatoře v Tušimicích. Zobrazeny hodnoty korelačního koeficientu (r_s) s $p < 0.05$. N = 4115.

Proměnná	SO ₂ _RM	NO ₂ _RM	O ₃ _RM
SO ₂ _RM	1.00		
NO ₂ _RM	0.58	1.00	
O ₃ _RM	- 0.26	- 0.65	1.00



Obr. č. 6. Porovnání hodinových koncentrací O₃ a NO₂ naměřených kombinovaným Cairpol senzorem (osa y) a RM (osa x) během jednotlivých měsíců v roce (měřeno od listopadu 2017 do září 2018).



Obr. č. 7. Porovnání hodinových koncentrací NO₂ naměřených Cairpol senzorem (osa y) a RM (osa x) během jednotlivých měsíců v roce (měřeno od listopadu 2017 do září 2018).

2.1.2 PRACHOMĚR PMS 7003 (PLANTOWER, CHN)

Prachoměr Plantower PMS7003 je miniaturní optický čítač částic o rozměrech 48 x 37 x 12 mm, který na bázi rozptylu laserového paprsku měří počet částic ve velikostní frakci PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ ve známém průtoku vzduchu, čímž definuje jejich hmotnostní koncentraci (**Obr. č. 8**). Analyzátor je elektricky napájen externě (4.5 až 5.5 V DC), je vybaven větrákem a jeho proudový odběr je do 100 mA (při měření; do 100 µA mimo měření). Objemová jednotka je 0.1 litru a jednotka hmotnostní koncentrace je µg/m³. Jsou dvě možnosti digitálního výstupu a sběru dat – aktivní a pasivní. Výchozím nastavením senzorů je aktivní (automatický) sběr dat prostřednictvím sériového portu. V případě, že změna koncentrace částic je malá, senzor automaticky pracuje ve stabilním módu s intervalem měření 2.3 sekundy. V případě, že změna koncentrací částic je velká, senzor automaticky přechází do rychlejšího módu a sbírá data v intervalu po 200 až 800 ms (čím vyšší je koncentrace, tím kratší je interval měření). Datové protokoly jsou pak publikovány v podobě ASCII nebo ASCII CSV souborů [12].



Obr. č. 8. Optický analyzátor částic PMS7003 (Plantower, CHN) na měření hmotnostních koncentrací frakcí aerosolu PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀. Zdroj: <http://www.plantower.com>

2.1.2.1 Technická specifikace prachoměrů PMS 7003

Prachoměry PMS 7003 pro částice ve frakcích PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ mají uváděný rozsah měření 0.3 - 1.0, 1.0 - 2.5 a 2.5 - 10 μm . Účinnost stanovení počtu částic je uváděna nižší (50 %) u částic o velikosti 0.3 μm a podstatně vyšší (98 %) u částic > 0.5 μm . Efektivní rozsah hmotnostní koncentrace částic je 0 - 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, maximální rozsah pak může být i > 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (v obou případech uváděno standardně pro částice PM_{2.5}). Rozlišovací schopnost měření hmotnostní koncentrace je uváděna 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Standardní objemová jednotka při měření je 0.1 litru. Celkový čas odezvy je uváděn < 10 sekund. Maximální chyba konzistence dat je $\pm 10 \%$ při koncentracích 100 až 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ při koncentracích 0 až 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Možné provozní podmínky senzoru jsou uváděny při teplotách -10 až 60 °C a relativní vlhkosti vzduchu 0 až 99 %. Průměrná doba provozu bez výskytu poruch je výrobcem uvedena více jak 3 roky [12].

2.1.2.2 Metodika měření

Párová sada prachoměrů PMS7003 pro měření hmotnostní koncentrace částic PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ byla na observatoři instalována v průvzdušném boxu na střeše referenční AIM stanice od 03/2018 do konce 12/2018 (**Obr. č. 9**). Hodinové průměry byly počítány z 10minutových dat (10min průměry provedeny systémem). Párový set senzorů pro jednotlivé frakce částic je v datech označován s příponou 1 a 2 (Pltw1 = senzor 1, Pltw2 = senzor 2). Hodinové koncentrace částic naměřené Plantower senzory byly porovnávány s hodinovými koncentracemi naměřenými jak referenčními analyzátoři (v případě PM_{2.5} a PM₁₀), tak nereferečním analyzátořem Fidas200 (PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀).



Obr. č. 9. Párová sada prachoměrů Plantower PMS7003 (c) instalovaná v průvzdušném boxu (b) umístěném na střeše referenční stanice AIM na Observatoři v Tušimicích (a). Foto: P. Bauerová

2.1.2.3 Výsledky měření

Popisná statistika průměrných hodinových koncentrací prachových částic PM_{10} , $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřených párovými prachoměry PMS 7003 (Pltw1 a Pltw2), RM (dostupné pouze pro $PM_{2.5}$ a PM_{10}) a nereferenčním analyzátozem Fidas200 je zobrazena v **Tab. č. 6**. Hodnocení souměření prachoměrů v páru ukázalo silnou pozitivní korelaci jak u frakce PM_{10} , tak u $PM_{2.5}$ i PM_{10} ($r_S > 0.95$, **Tab. č. 7**). Při porovnání reálných hodnot naměřených v rámci dvou analogických prachoměrů byla zaznamenána výraznější odchylka u maximálně dosažených hodinových koncentrací PM_{10} (rozdíl $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Průměrné hodnoty se pak nijak zvlášť nelišily u žádné z frakcí (**Tab. č. 6**).

Při porovnání koncentrací $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřených Plantower prachoměry s koncentracemi z RM byly u obou frakcí zjištěny signifikantní pozitivní korelace ($PM_{2.5}$: $r_{S_Pltw1} = 0.63$, $r_{S_Pltw2} = 0.65$; PM_{10} : $r_{S_Pltw1} = 0.62$, $r_{S_Pltw2} = 0.63$; **Tab. č. 8**). Vztahy s RM byly ovšem obecně výrazně slabší (pro $PM_{2.5}$ $R^2_{Pltw1} = 0.32$, $R^2_{Pltw2} = 0.36$ s polynomickým proložením, **Obr. č. 10**; pro PM_{10} $R^2_{Pltw1} = 0.30$, $R^2_{Pltw2} = 0.29$ s polynomickým proložením, **Obr. č. 11**) než v porovnání s nereferenčním analyzátozem Fidas200 (obecně $r_S > 0.70$; **Tab. č. 8**). Nejsilnější korelace při porovnání s Fidas200 bylo dosaženo u částic PM_{10} ($r_{S_Pltw1} = 0.88$, $r_{S_Pltw2} = 0.91$; $R^2_{Pltw1} = 0.74$,

$R^2_{Pltw2} = 0.79$ obojí s polynomickým proložením, **Obr. č. 12**) a $PM_{2.5}$ ($r_{S_Pltw1} = 0.87$, $r_{S_Pltw2} = 0.90$; $R^2_{Pltw1} = 0.76$, $R^2_{Pltw2} = 0.81$ s polynomickým proložením, **Obr. č. 13**), nejslabší korelace pak u částic PM_{10} ($r_{S_Pltw1} = 0.70$, $r_{S_Pltw2} = 0.73$; $R^2_{Pltw1} = 0.49$, $R^2_{Pltw2} = 0.51$ obojí s polynomickým proložením, **Obr. č. 14**). V případě Plantower senzorů se ani u jedné z frakcí nevyskytovaly extrémně odchylené hodnoty v porovnání s RM či s Fidas200.

Při porovnání reálných hodnot v různém ročním období bylo zjištěno, že Plantower senzory v případě $PM_{2.5}$ a PM_{10} špatně odpovídají denním chodům a špičkám hodnot naměřených RM, a to jak v zimě, tak v létě (**Obr. č. 16 a 17**). Hodnoty koncentrací PM_1 , $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřené senzory naopak daleko lépe odpovídaly denním chodům i jednotlivým špičkám v datech naměřených nereferenčním analyzátořem Fidas200 (**Obr. č. 15 - 17**).

Tab. č. 6. Popisná statistika hodinových koncentrací částic PM_1 , $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřených Plantower senzory (Pltw1 a Pltw2, žlutě zvýrazněné), referenčními monitory (RM; dostupné pouze pro $PM_{2.5}$ a PM_{10}) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (Fidas; PM_1 , $PM_{2.5}$ a PM_{10}) v období 03/2108 až 12/2018. N = počet platných hodinových měření, SD = směrodatná odchylka, SE = směrodatná chyba průměru. Všechny hodnoty jsou uvedeny v $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

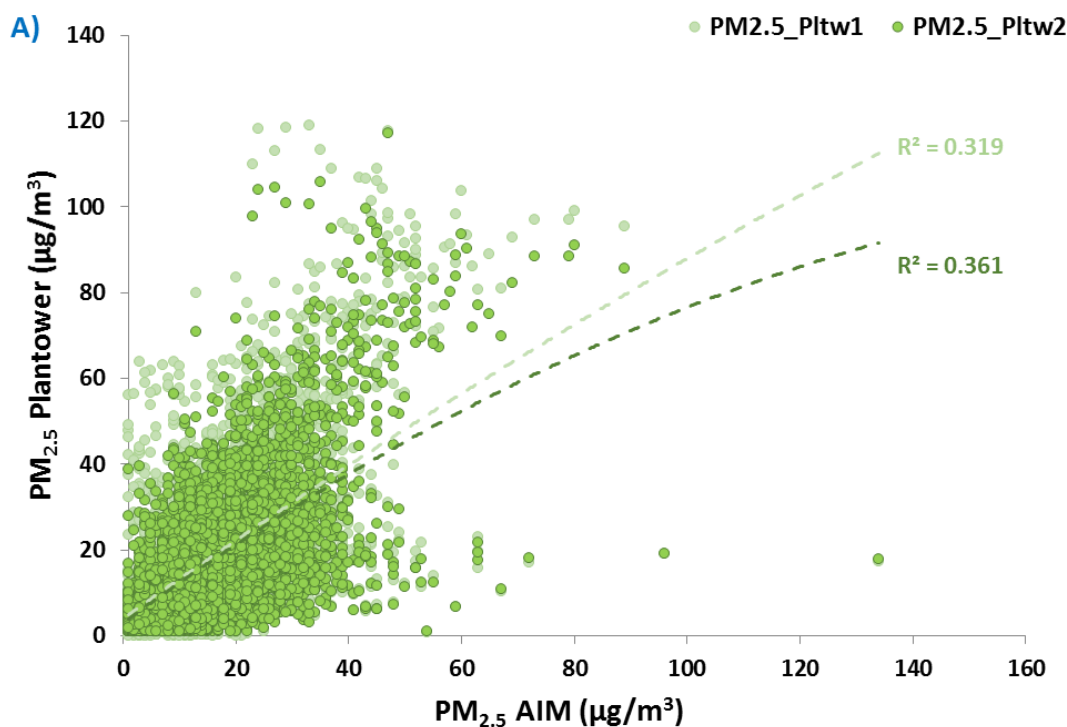
Proměnná	N	Průměr	Mín	Max	SD	SE
PM_1_Pltw1	6736	15.14	0.10	73.57	12.18	0.15
PM_1_Pltw2	6852	13.38	0.10	74.50	10.82	0.13
PM_1_Fidas	7088	12.67	0.10	81.10	10.21	0.12
$PM_{2.5}_Pltw1$	6840	22.11	0.10	126.20	19.17	0.23
$PM_{2.5}_Pltw2$	6712	20.65	1.00	117.17	16.92	0.21
$PM_{2.5}_RM$	7074	17.39	1.00	134.00	12.09	0.14
$PM_{2.5}_Fidas$	7089	14.65	0.10	127.80	11.01	0.13
PM_{10}_Pltw1	6919	24.25	0.10	151.27	21.80	0.26
PM_{10}_Pltw2	6921	22.48	0.10	87.17	18.50	0.22
PM_{10}_RM	7050	24.46	1.00	175.00	16.63	0.20
PM_{10}_Fidas	7078	22.18	0.20	158.10	14.59	0.17

Tab. č. 7. Korelační matice hodinových koncentrací PM_1 , $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřených dvěma analogickými senzory Plantower (Pltw1 a Pltw2, zvýrazněno žlutě). Zobrazeny hodnoty korelačního koeficientu (r_s) s $p < 0.05$.

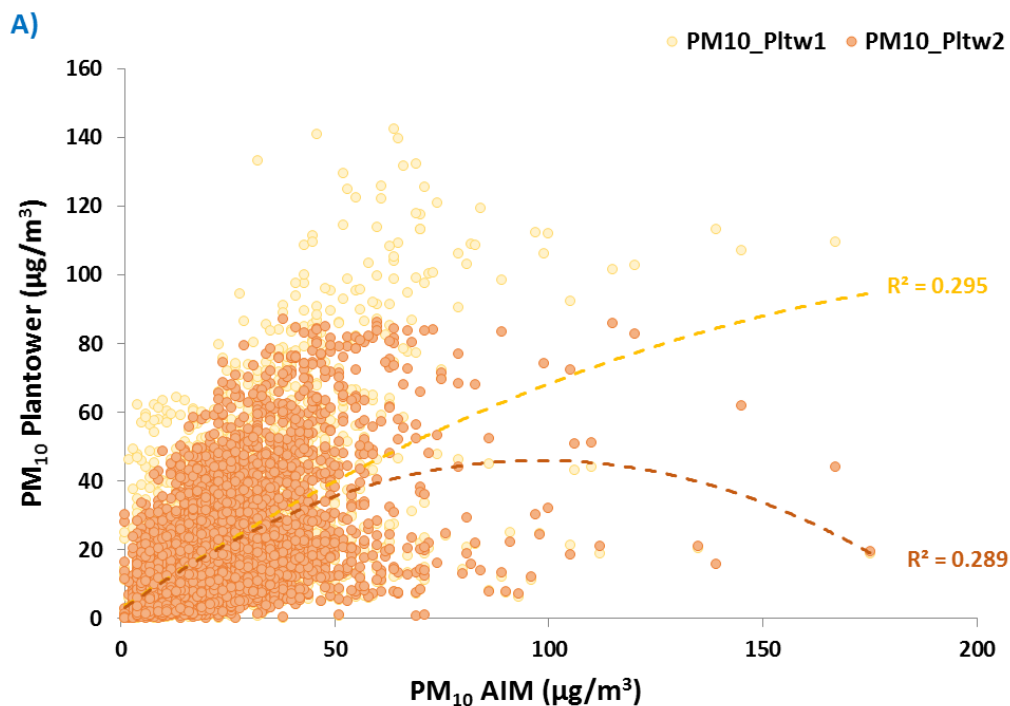
Proměnná	PM_1_Pltw2	$PM_{2.5}_Pltw2$	PM_{10}_Pltw2
PM_1_Pltw1	0.95	0.95	0.94
$PM_{2.5}_Pltw1$	0.95	0.96	0.95
PM_{10}_Pltw1	0.95	0.96	0.96

Tab. č. 8. Korelační matice průměrných hodinových koncentrací prachových částic PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ naměřených senzory Plantower 1 a 2 (Pltw1, Pltw2), RM a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (Fidas). Zobrazeny hodnoty korelačních koeficientů (r_s) s $p < 0.05$. Pro PM₁ chybí certifikovaný RM.

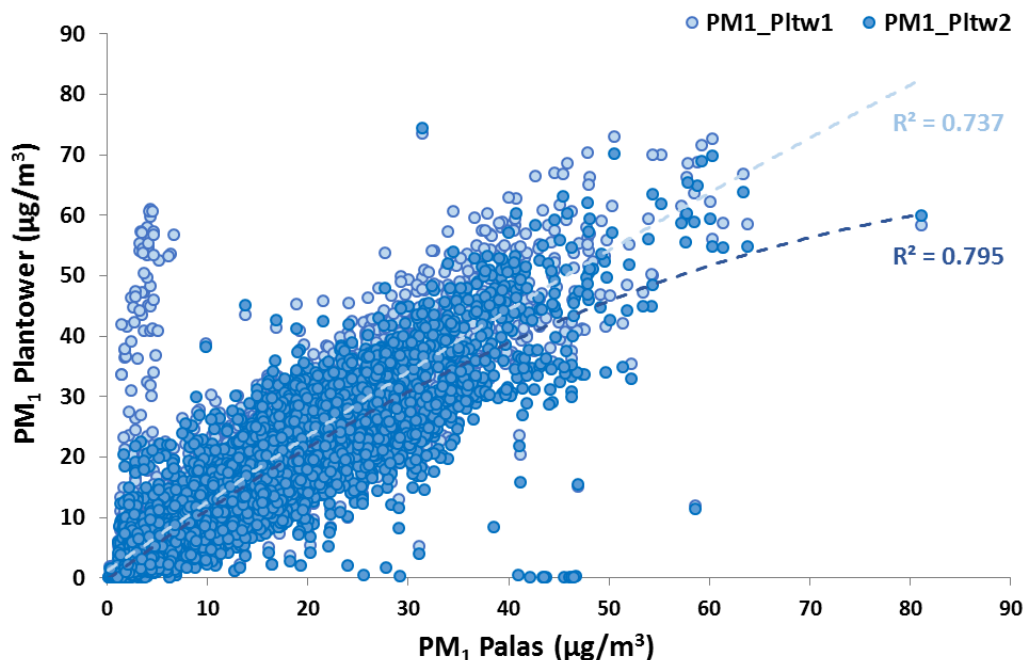
Proměnná	PM _{2.5} _RM	PM ₁₀ _RM	PM ₁ _Fidas	PM _{2.5} _Fidas	PM ₁₀ _Fidas
PM ₁ _Pltw1	0.63	0.62	0.88	0.86	0.71
PM _{2.5} _Pltw1	0.63	0.62	0.89	0.87	0.70
PM ₁₀ _Pltw1	0.63	0.62	0.89	0.87	0.70
PM ₁ _Pltw2	0.66	0.64	0.91	0.90	0.74
PM _{2.5} _Pltw2	0.65	0.64	0.92	0.90	0.73
PM ₁₀ _Pltw2	0.65	0.63	0.91	0.89	0.73



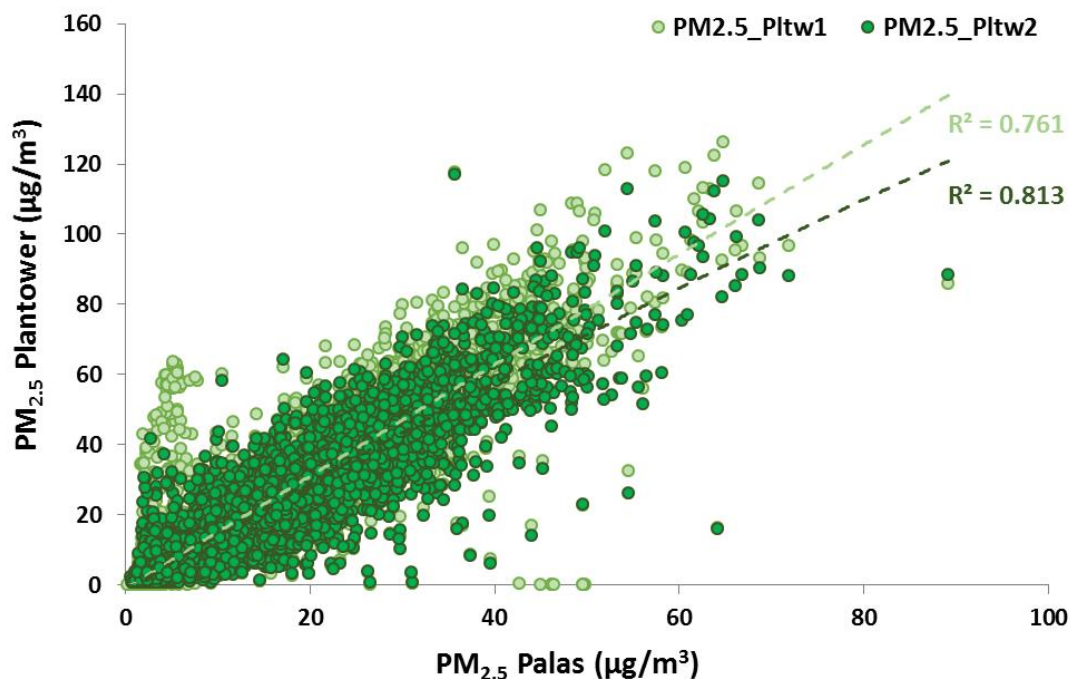
Obr. č. 10. Porovnání hodinových koncentrací částic PM_{2.5} naměřených Plantower senzory (osa y; PM_{2.5}_Pltw1 a PM_{2.5}_Pltw2) a RM (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM.



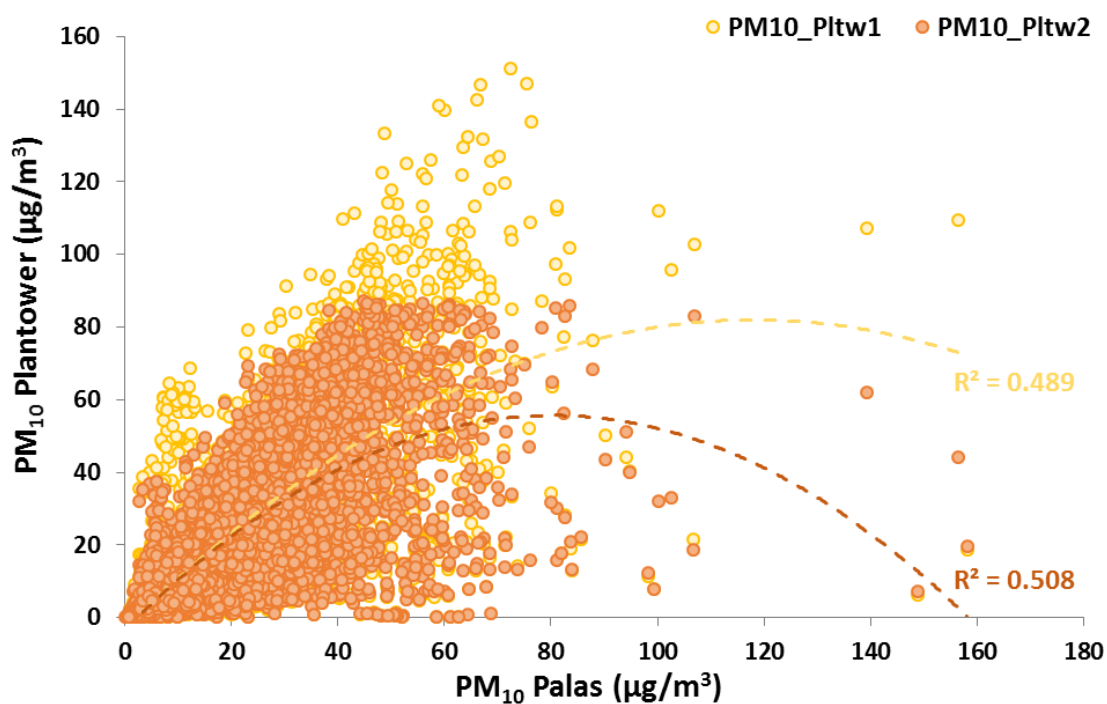
Obr. č. 11. Porovnání hodinových koncentrací částic PM₁₀ naměřených Plantower senzory (osa y; PM₁₀_Pltw1 a PM₁₀_Pltw2) a RM (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM.



Obr. č. 12. Porovnání hodinových koncentrací částic PM₁ naměřených Plantower senzory (osa y; PM₁_Pltw1, PM₁_Pltw2) a analyzátořem Palas Fidas200 (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a analyzátořem Fidas200.

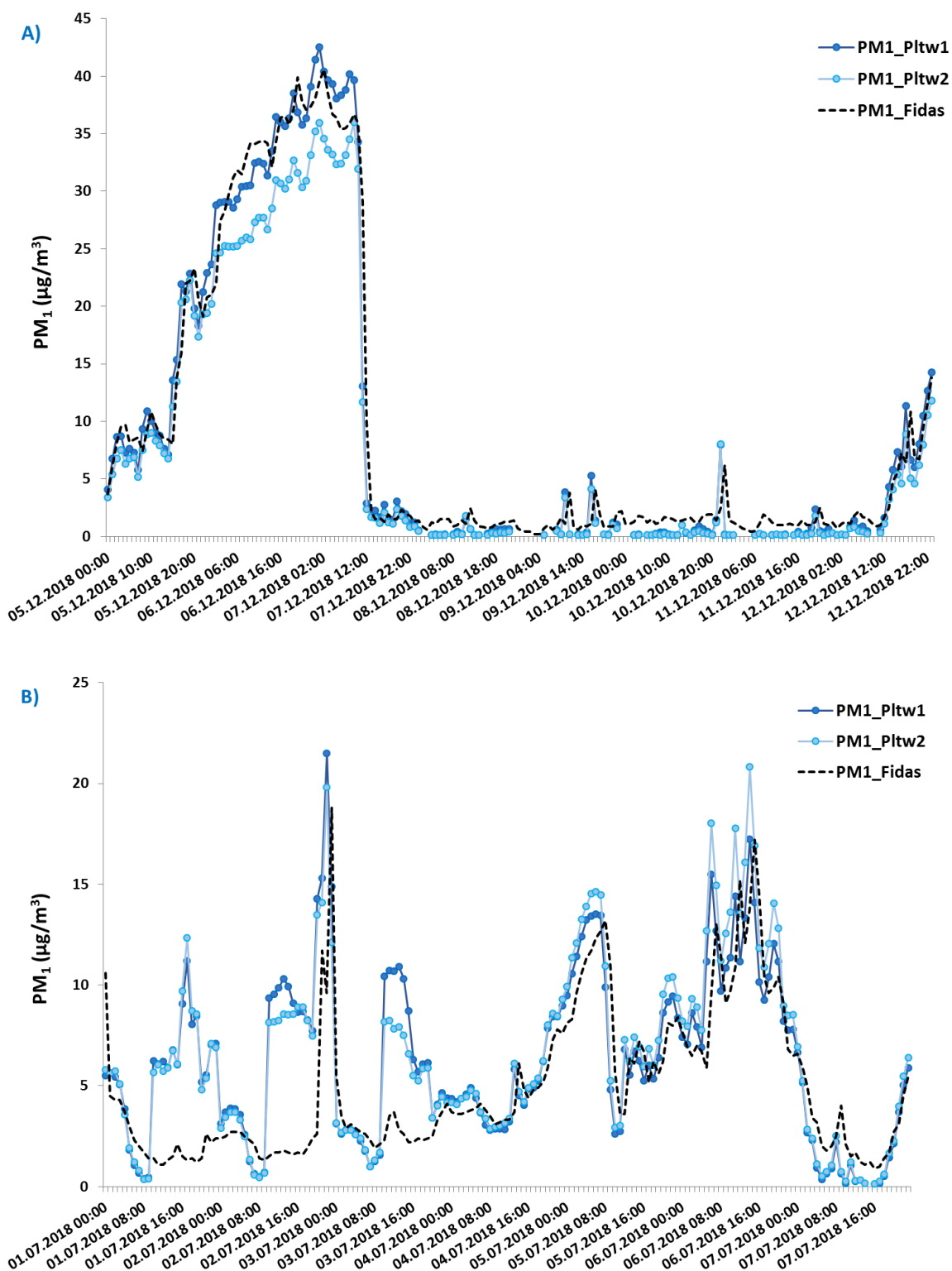


Obr. č. 13. Porovnání hodinových koncentrací částic PM_{2.5} naměřených Plantower senzory (osa y; PM_{2.5}_Pltw1, PM_{2.5}_Pltw2) a analyzátořem Palas Fidas200 (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a analyzátořem Fidas200.

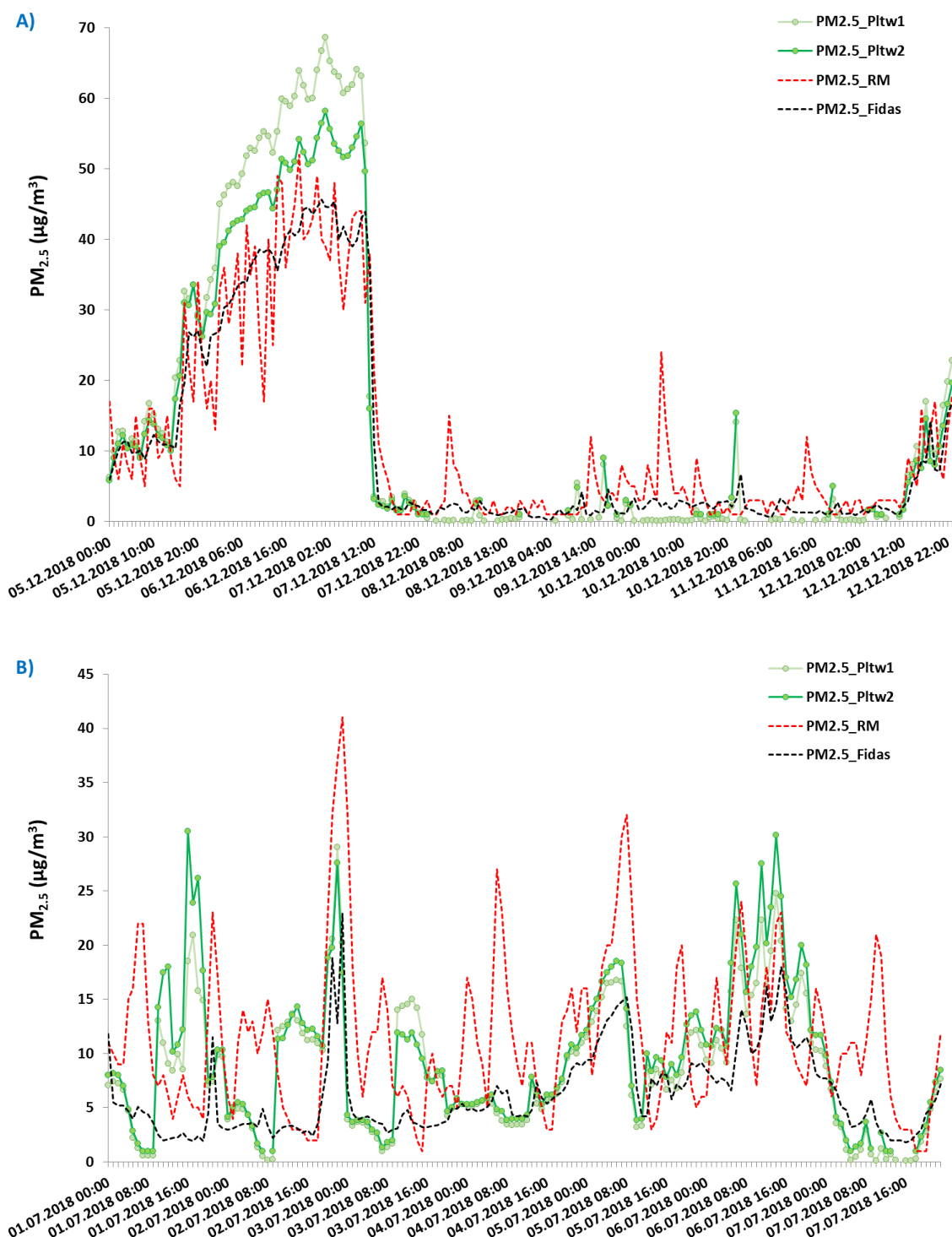


Obr. č. 14. Porovnání hodinových koncentrací částic PM₁₀ naměřených Plantower senzory (osa y; PM₁₀_Pltw1, PM₁₀_Pltw2) a analyzátořem Palas Fidas200 (osa x). R^2 = koeficient

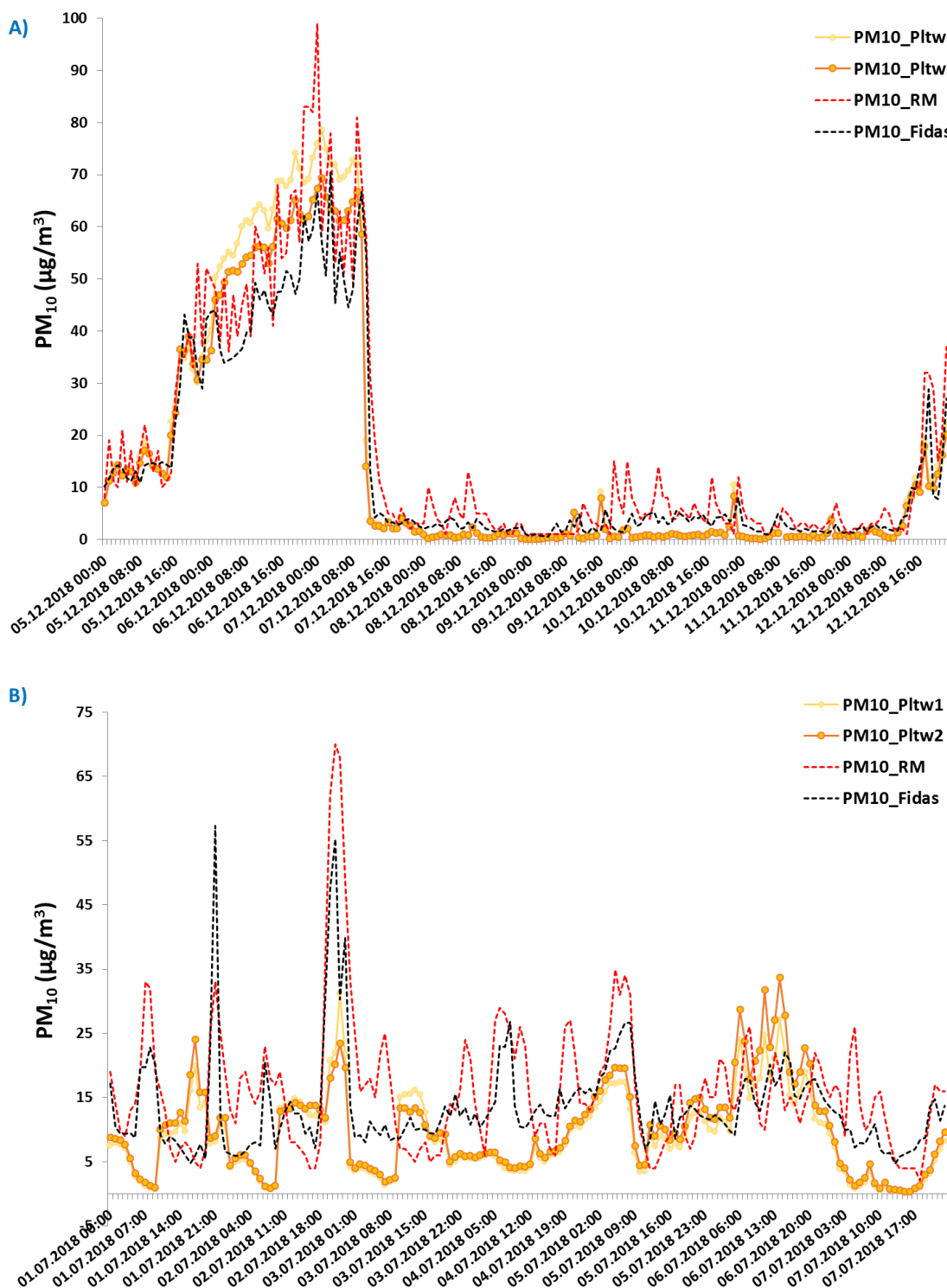
determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a analyzátořem Fidas200.



Obr. č. 15. Průběh hodinových koncentrací částic PM_{10} naměřených Plantower senzory (Pltw1, Pltw2; plné čáry) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (přerušovaná čára) **A)** v zimním období od 5.12. do 12.12. 2018, **B)** v letním období od 1.7. do 7.7. 2018.



Obr. č. 16. Průběh hodinových koncentrací částic $PM_{2.5}$ naměřených Plantower senzory (Pltw1, Pltw2; plné čáry), RM a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (přerušované čáry) **A)** v zimním období od 5.12. do 12.12.2018, **B)** v letním období od 1.7. do 7.7. 2018.



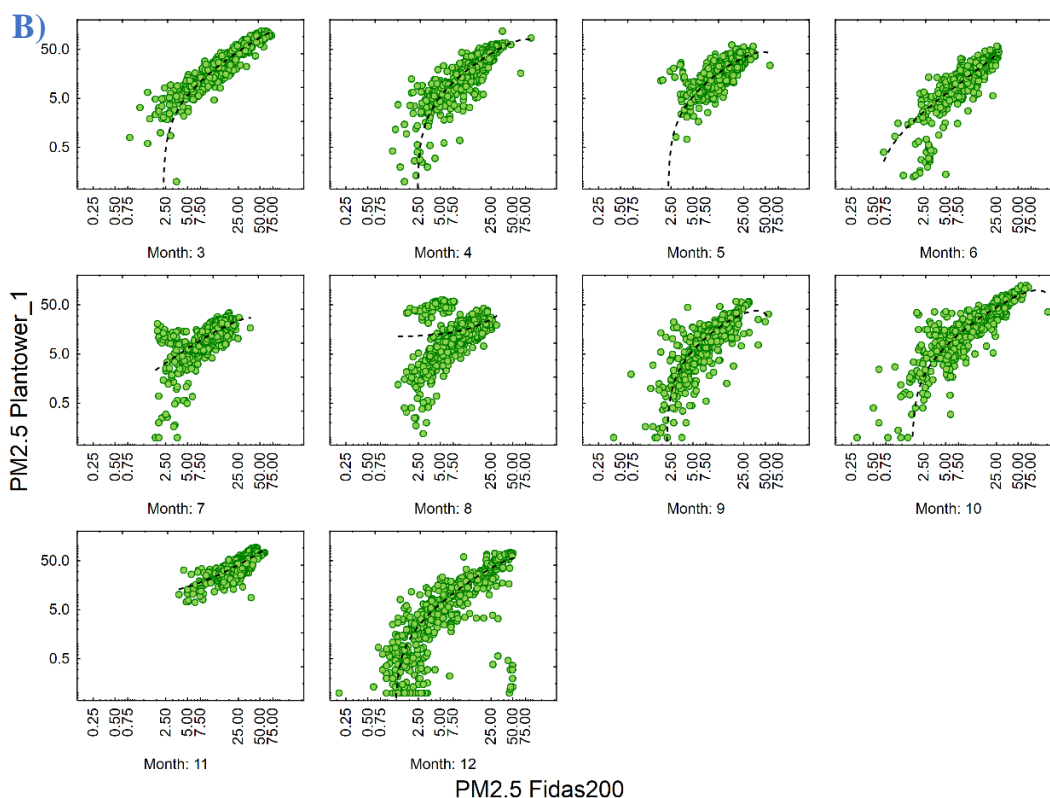
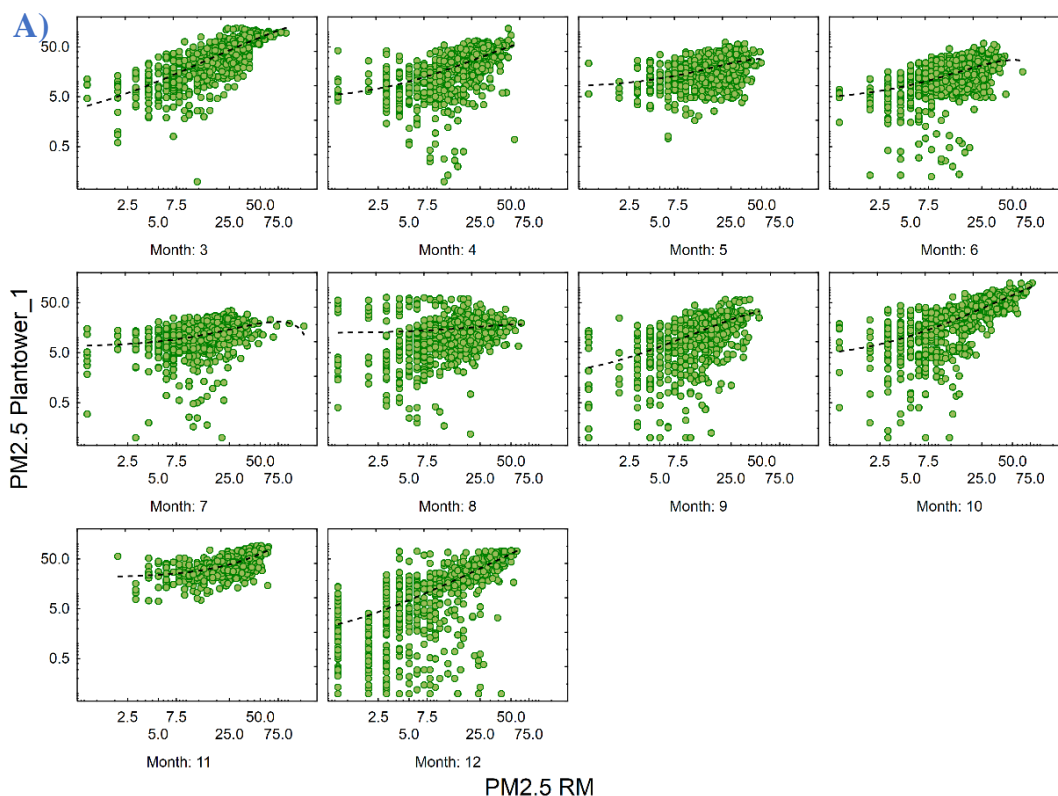
Obr. č. 17. Průběh hodinových koncentrací PM₁₀ naměřených Plantower senzory (Pltw1, Pltw2; plné čáry), RM a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (přerušované čáry) **A)** v období od 5.12. do 12.12.2018, **B)** v letním období od 1.7. do 7.7. 2018.

2.1.2.4 *Shrnutí výsledků*

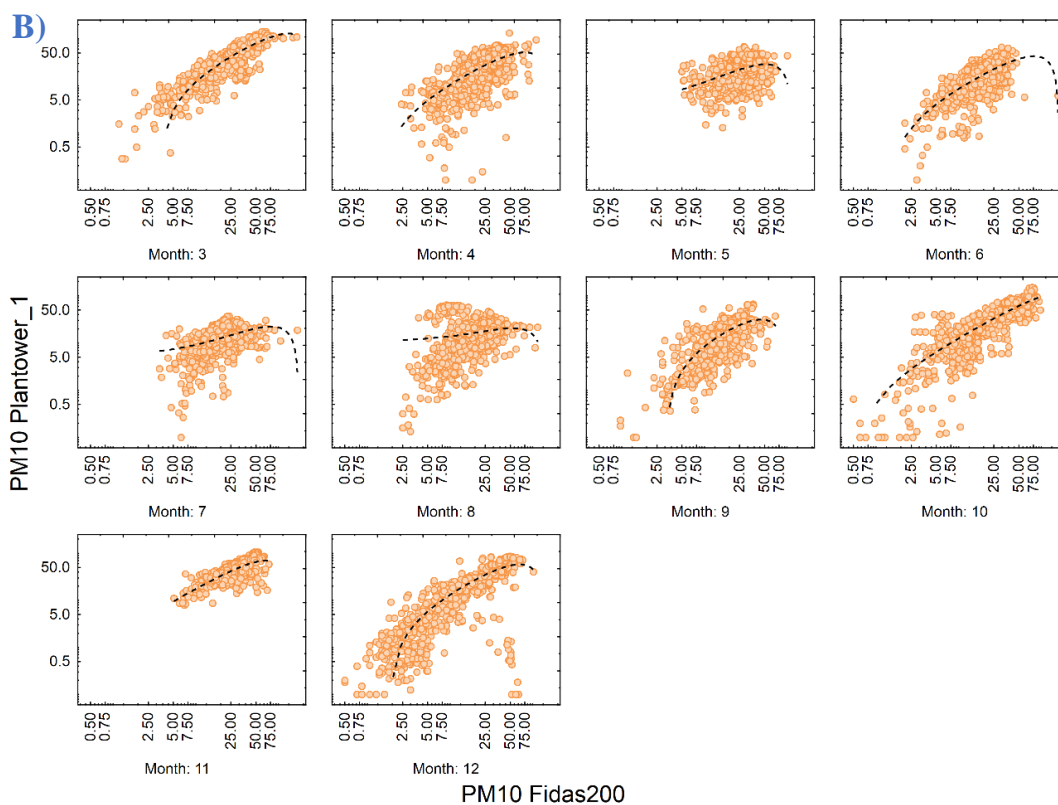
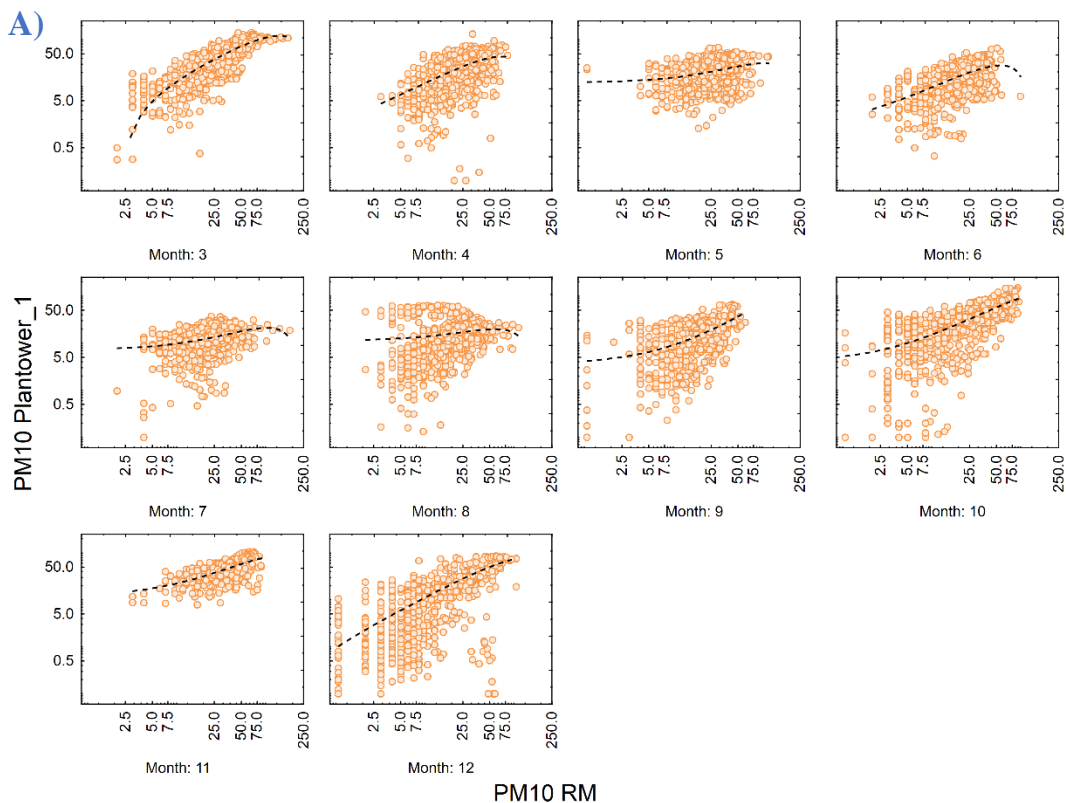
Prachoměry Plantower dosahovaly velmi uspokojivých výsledků při porovnání v páru. Výjimku tvořila pouze výraznější odchylka (rozdíl $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) u maximálních hodinových koncentrací PM_{10} naměřených senzory Plantower_1 a Plantower_2.

Podobně uspokojivých výsledků senzory dosahovaly i v porovnání s RM či nereferenčním analyzátozem Fidas200. U žádné z velikostních frakcí nebyly zaznamenány výrazné odchylky u průměrných či maximálních hodinových koncentrací oproti kontrolám. Nicméně při porovnání naměřených dat ze senzorů s kontrolními daty bylo obecně dosahováno lepších výsledků (vyšší korelace) v porovnání s nereferenčním analyzátozem Fidas200 než v porovnání s RM (dostupné pouze pro $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10}). Při částečném porovnání reálných hodnot (1 týden v zimě a 1 týden v létě) je evidentní, že data ze senzorů lépe odpovídají dennímu chodu a špičkám v datech z nereferenčního měření analyzátozem Fidas200 než z RM. Lepší výsledky senzorů v porovnání s nereferenční metodou lze vysvětlit podobností principu měření, jelikož obojí funguje na optoelektronické bázi, zatímco RM funguje na bázi radiometrie.

Efekt sezóny na kvalitu měření je v případě Plantower senzorů jen těžko pozorovatelný (**Obr. č. 18 a 19**).



Obr. č. 18. Porovnání hodinových koncentrací PM_{2.5} naměřených Plantower_1 senzorem (osa y) a **A)** RM (osa x), **B)** nereferečním Fidas200 analyzátořem (osa x) v jednotlivých měsících měřicího období. Koncentrace jsou udány v $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Osy x a y jsou zobrazeny v logaritmické škále.



Obr. č. 19. Porovnání hodinových koncentrací PM₁₀ naměřených Plantower_1 senzorem (osa y) a **A)** RM (osa x), **B)** nereferenčním Fidas200 analyzátořem (osa x) v jednotlivých měsících měřicího období. Koncentrace jsou udány v $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Osy x a y jsou zobrazeny v logaritmické škále.

2.1.3 PRACHOMĚŘ OPC-N2 (ALPHASENSE, UK)

Senzor OPC-N2 (Alphasense, UK) je obdobně jako jiné malé prachoměry, miniaturní optický čítač částic o rozměrech 63,5 x 60 x 75 mm a hmotnosti < 105 g, který udává vypočítanou hmotnostní koncentraci částic frakce PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ na základě měření jejich počtu ve známém průtoku vzduchu optickou komorou (**Obr. č. 20**). Analyzátor je elektricky napájen externě (4.8 až 5.2 V DC) a má proudový odběr 175 mA (při měření; 95 mA mimo měření). Standardní objemová jednotka vzorku je 0.22 litru a jednotka hmotnostní koncentrace je µg/m³. Napájení a přenos dat funguje prostřednictvím sériového rozhraní (SPI), aktualizace firmwaru a stahování dat z paměťové SD karty probíhá prostřednictvím microUSB rozhraní (2.0). Výrobce k tomuto produktu nabízí vlastní zpracovatelský a zobrazovací software, nicméně je možné data získávat v běžných log souborech (např. csv) [13].



Obr. č. 20. Miniaturní čítač částic OPC-N2 (Alphasense, UK) na měření hmotnostních koncentrací frakcí aerosolu PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀. Zdroj: <http://www.alphasense.com/>

2.1.3.1 Technická specifikace prachoměřů OPC-N2

Prachoměry OPC-N2 mají uváděný rozsah měření částic o velikosti od 0.38 až 17 µm. Interval vzorkování je od 1.4 do 10 sekund. Celkový průtok je uváděn 1.2 L/min, vzorkovací průtok pak 0.22 L/min. Maximální možný počet stanovených částic je 10 000 za sekundu. Pravděpodobnost náhodné chyby je uváděna 0.84 % stanovené koncentrace při 10⁶ počtu částic / L, 0.24 % stanovené koncentrace částic při počtu 500 částic / L.

Provozní či skladovací teplotní a vlhkostní podmínky bohužel nejsou v manuálu jasně popsány. Stejně tak výrobce neuvádí průměrnou dobu provozu bez případného výskytu poruch [13].

2.1.3.2 Metodika měření

Párová sada OPC-N2 prachoměrů pro měření hmotnostní koncentrace částic PM_{10} , $PM_{2.5}$ a PM_{10} je na observatoři instalována v ochranném boxu (s otvorem pro krátkou odběrovou sondu samotného senzoru) na střeše referenční AIM stanice (**Obr. č. 21**) od poloviny 09/2018 do nynějška (hodnocené období od 09/2018 do začátku 01/2019). Hodinové průměry koncentrací částic byly počítány z 10minutových dat (10min průměry provedeny systémem). Párový set senzorů pro jednotlivé frakce částic je v datech označován příponou 1 a 2 (Alpha1 = senzor 1, Alpha2 = senzor 2). Hodinové koncentrace částic naměřené Alphasense senzory byly porovnávány s hodinovými koncentracemi naměřenými jak referenčními analyzátory (v případě $PM_{2.5}$ a PM_{10}), tak nereferenčním analyzátorem Fidas200 (PM_{10} , $PM_{2.5}$ a PM_{10}).



Obr. č. 21. Párová sada prachoměrů Alphasense OPC-N2 (c) instalovaná v průvzdušném boxu (b) umístěném na střeše referenční stanice AIM na Observatoři v Tušimicích (a). Foto: P. Bauerová

2.1.3.3 Výsledky měření

Popisná statistika průměrných hodinových koncentrací prachových částic PM_{10} , $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřených párovými prachoměry OPC-N2 (Alpha1 a Alpha2), RM (dostupné pouze pro $PM_{2.5}$ a PM_{10}) a nereferenčním analyzátorem Fidas200 je zobrazena v **Tab. č. 9**. Hodnocení souměření prachoměrů v páru ukázalo silnou pozitivní korelaci u všech velikostních frakcí ($r_s = 0.99$ pro PM_{10} , $PM_{2.5}$ i PM_{10} ; **Tab. č. 10**). Při porovnání reálných hodnot naměřených v rámci

dvou analogických senzorů byla zaznamenána výrazná odchylka u průměrných (rozdíl > 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) a maximálních hodinových koncentrací PM_{10} (rozdíl > 1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; **Tab. č. 9**).

Při porovnání koncentrací naměřených Alphasense prachoměry s koncentracemi naměřenými RM byla zjištěna signifikantní pozitivní korelace u $\text{PM}_{2.5}$ ($r_{S_Alpha1} = 0.41$, $r_{S_Alpha2} = 0.38$, **Tab. č. 11**; $R^2_{Alpha1} = 0.15$, $R^2_{Alpha2} = 0.16$ obojí s polynomickým proložením, **Obr. č. 22**) a signifikantní, ale velmi slabá pozitivní korelace u PM_{10} ($r_S = 0.08$ pro Alpha1 i Alpha2, **Tab. č. 11**; $R^2 = 0.01$ pro Alpha1 i Alpha2, **Obr. č. 23**). V obou případech byly u senzorů zaznamenány hodnoty překračující trojnásobek maximální hodinové koncentrace naměřené RM (v případě $\text{PM}_{2.5}$ přesahovaly 4 % hodnot u senzoru Alpha1 a 6 % hodnot u senzoru Alpha2; v případě PM_{10} přesahovalo 5 % hodnot u senzoru Alpha1 a 7 % u senzoru Alpha2).

Silnějších korelací bylo dosaženo při porovnání hodnot naměřených Alphasense prachoměry s nereferenčním analyzátozem Fidas200. Nejlépe dopadlo toto porovnání u částic PM_1 ($r_{S_Alpha1} = 0.76$, $r_{S_Alpha2} = 0.74$, **Tab. č. 11**; $R^2_{Alpha1} = 0.54$, $R^2_{Alpha2} = 0.55$, **Obr. č. 24**) a $\text{PM}_{2.5}$ ($r_{S_Alpha1} = 0.66$, $r_{S_Alpha2} = 0.64$, **Tab. č. 11**; $R^2_{Alpha1} = 0.38$, $R^2_{Alpha2} = 0.48$, **Obr. č. 25**). Naopak nejhůře dopadlo porovnání s Fidas200 u částic PM_{10} (podobně jako u porovnání s RM; $r_S = 0.16$ pro Alpha1 i Alpha2, **Tab. č. 11**; $R^2_{Alpha1} = 0.02$, $R^2_{Alpha2} = 0.03$, **Obr. č. 26**).

Přestože Alphasense prachoměry obecně silně nadhodnocovaly koncentrace naměřené RM či Fidas200, z porovnání reálných hodnot naměřených senzory RM a Fidas200 v 7denních vzorcích dat (v prosinci a v říjnu 2018) je evidentní, že denním chodům a špičkám v datech z Alphasense senzorů trendově lépe odpovídaly spíše hodnoty naměřené nereferenčním analyzátozem Fidas200 než hodnoty naměřené RM (**Obr. č. 27 - 29**).

Tab. č. 9. Popisná statistika hodinových koncentrací částic PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10} naměřených Alphasense senzory (Alpha1 a Alpha2), referenčními monitory (RM; dostupné pouze pro $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10}) a nereferenčním analyzátozem Fidas200 (Fidas; PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10}) v období 09/2108 až 01/2019. N = počet platných hodinových měření, SD = směrodatná odchylka, SE = směrodatná chyba průměru. Všechny hodnoty jsou uvedeny v $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Senzory zvýrazněné červenou barvou vykazovaly výrazné odchylky v měření v porovnání s RM či s nereferenčním analyzátozem Fidas200.

Proměnná	N	Průměr	Min	Max	SD	SE
PM₁_Alpha1	2404	37.89	0.12	244.53	44.26	0.90
PM₁_Alpha2	2127	42.86	0.15	256.62	49.80	1.08
PM₁_Fidas	2641	15.17	0.10	63.30	12.52	0.24
PM_{2.5}_Alpha1	2404	54.35	0.15	546.27	74.24	1.51
PM_{2.5}_Alpha2	2127	66.06	0.19	569.83	90.40	1.96

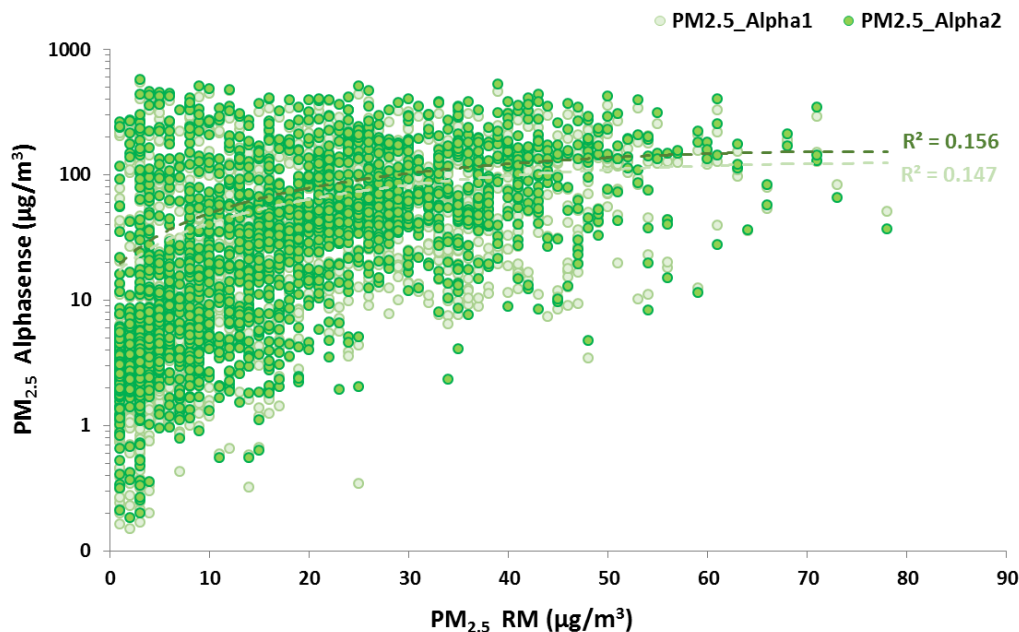
PM_{2.5}_RM	2635	17.91	1.00	78.00	14.22	0.28
PM_{2.5}_Fidas	2642	17.03	0.10	127.80	13.69	0.27
PM₁₀_Alpha1	2404	141.00	0.23	7495.31	561.10	11.44
PM₁₀_Alpha2	2126	189.04	0.29	9036.72	733.70	15.91
PM₁₀_RM	2617	25.13	1.00	99.00	19.47	0.38
PM₁₀_Fidas	2641	22.47	0.20	94.80	17.32	0.34

Tab. č. 10. Korelační matice průměrných hodinových koncentrací PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ naměřených dvěma analogickými senzory Alphasense (Alpha1 a Alpha2, zvýrazněno žlutě). Zobrazeny hodnoty korelačního koeficientu (r_s) s $p < 0.05$.

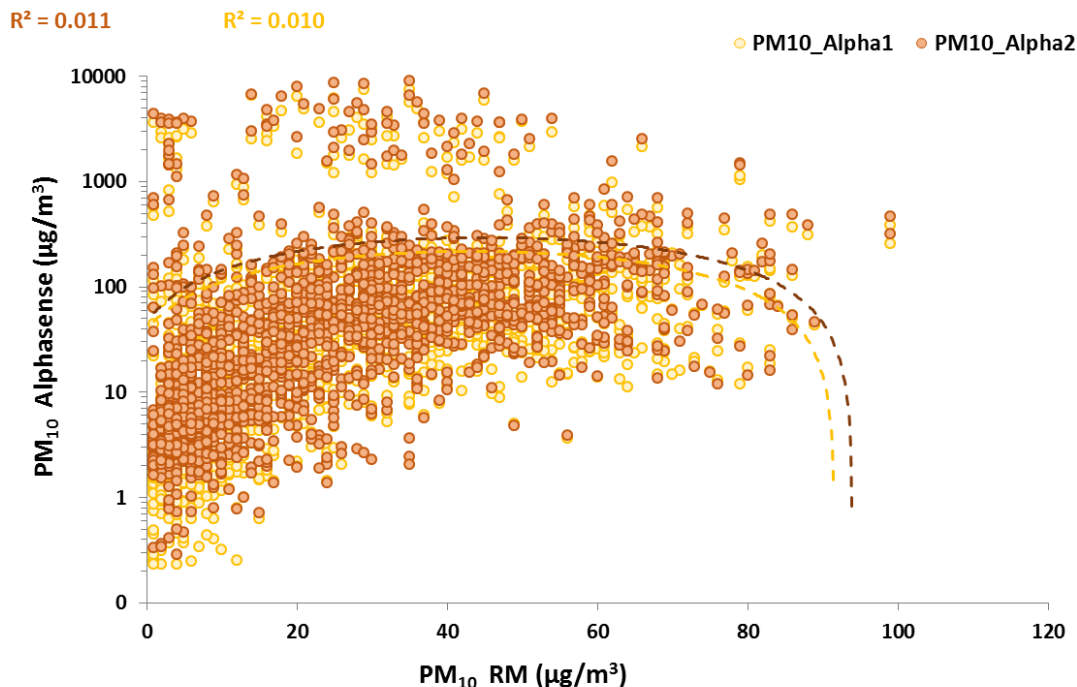
Proměnná	PM₁_Alpha2	PM_{2.5}_Alpha2	PM₁₀_Alpha2
PM₁_Alpha1	0.99	0.98	0.97
PM_{2.5}_Alpha1	0.98	0.99	0.98
PM₁₀_Alpha1	0.97	0.99	0.99

Tab. č. 11. Korelační matice průměrných hodinových koncentrací prachových částic PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ naměřených Alphasense senzory 1 a 2 (Alpha1, Alpha2), referenčními analyzátory (RM) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (Fidas). Zobrazeny hodnoty korelačních koeficientů (r_s) s $p < 0.05$ (r_s s $p > 0.05$ značeny kurzívou). Pro PM₁ chybí certifikovaný RM.

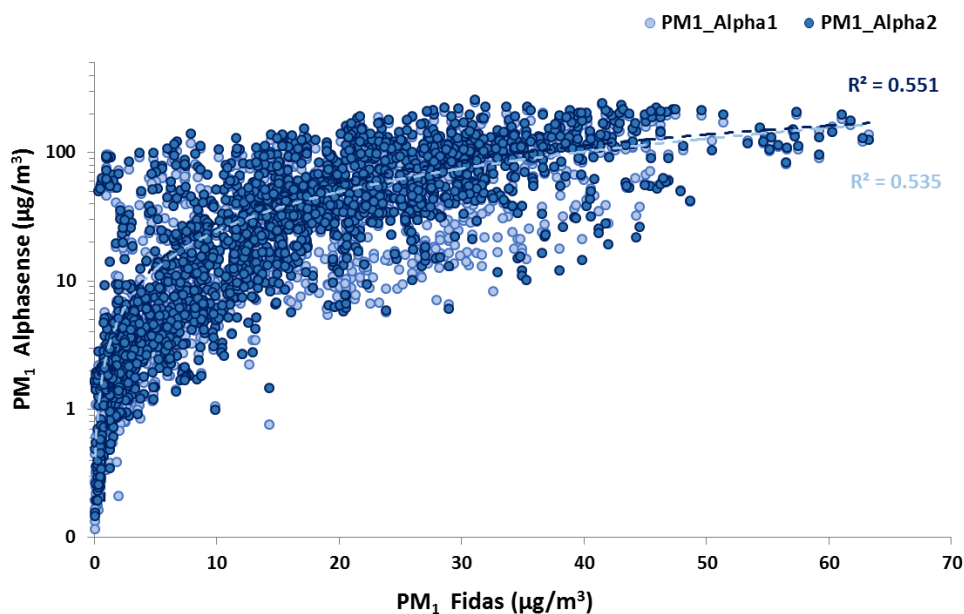
Proměnná	PM_{2.5}_RM	PM₁₀_RM	PM₁_Fidas	PM_{2.5}_Fidas	PM₁₀_Fidas
PM₁_Alpha1	0.58	0.59	0.76	0.75	0.63
PM_{2.5}_Alpha1	0.41	0.48	0.68	0.66	0.54
PM₁₀_Alpha1	<i>-0.04</i>	0.08	0.24	0.23	0.16
PM₁_Alpha2	0.56	0.57	0.74	0.72	0.60
PM_{2.5}_Alpha2	0.38	0.46	0.66	0.64	0.51
PM₁₀_Alpha2	<i>-0.05</i>	0.08	0.24	0.23	0.16



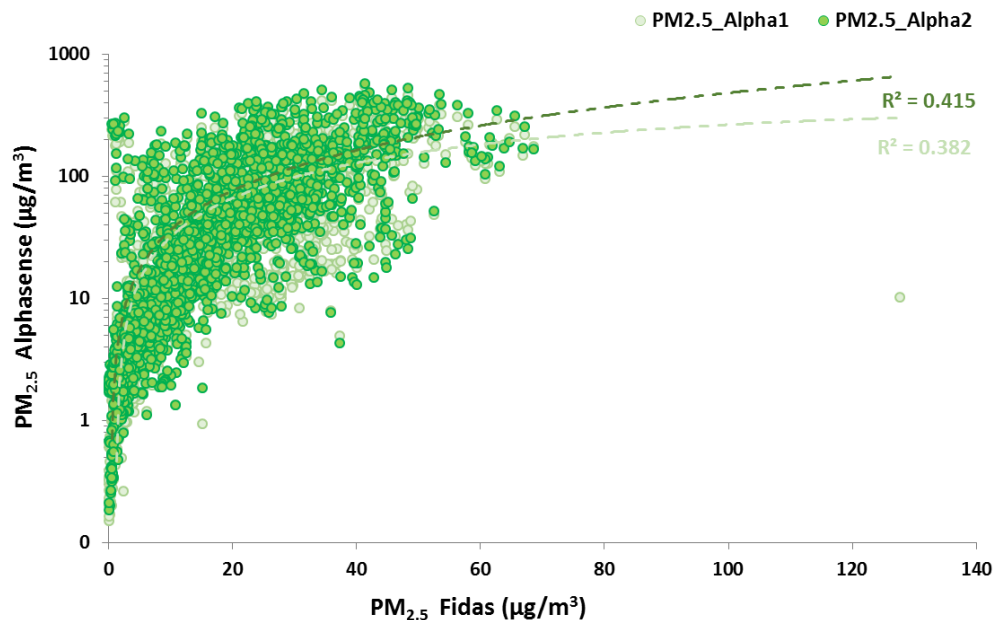
Obr. č. 22. Porovnání hodinových koncentrací částic PM_{2.5} naměřených Alphasense senzory (osa y; PM_{2.5}_Alpha1 a PM_{2.5}_Alpha2) a RM (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM. Osa y je zobrazena v logaritmické škále.



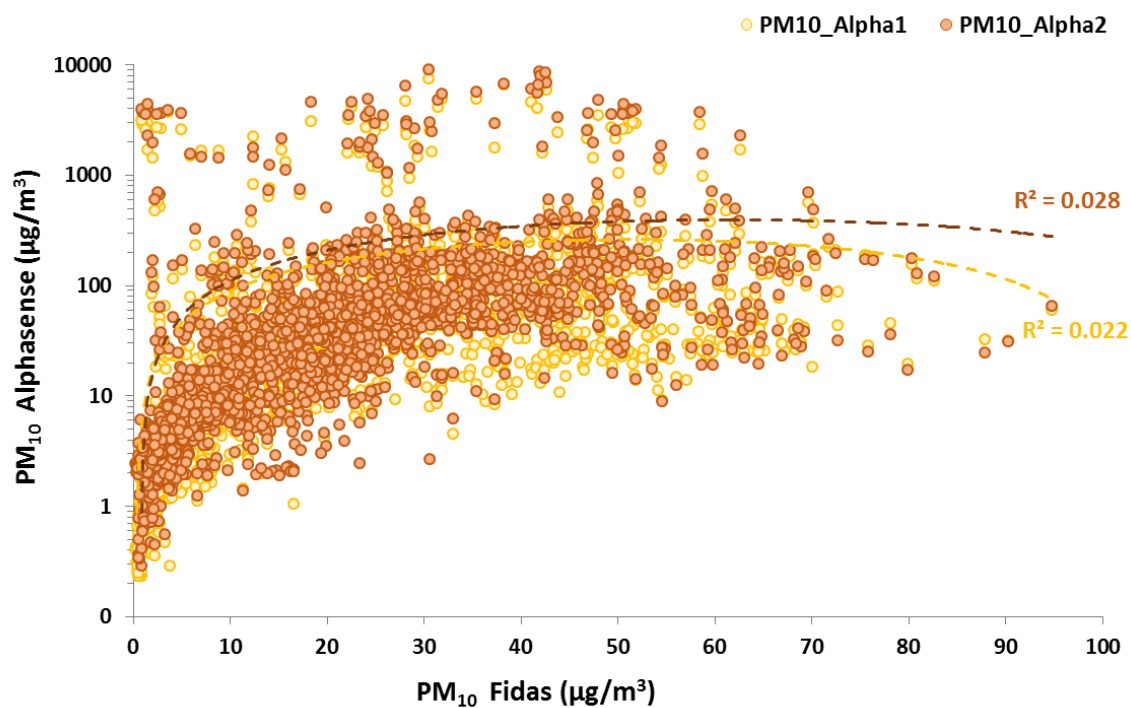
Obr. č. 23. Porovnání hodinových koncentrací částic PM₁₀ naměřených Alphasense senzory (osa y; PM₁₀_Alpha1 a PM₁₀_Alpha2) a RM (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a RM. Osa y je zobrazena v logaritmické škále.



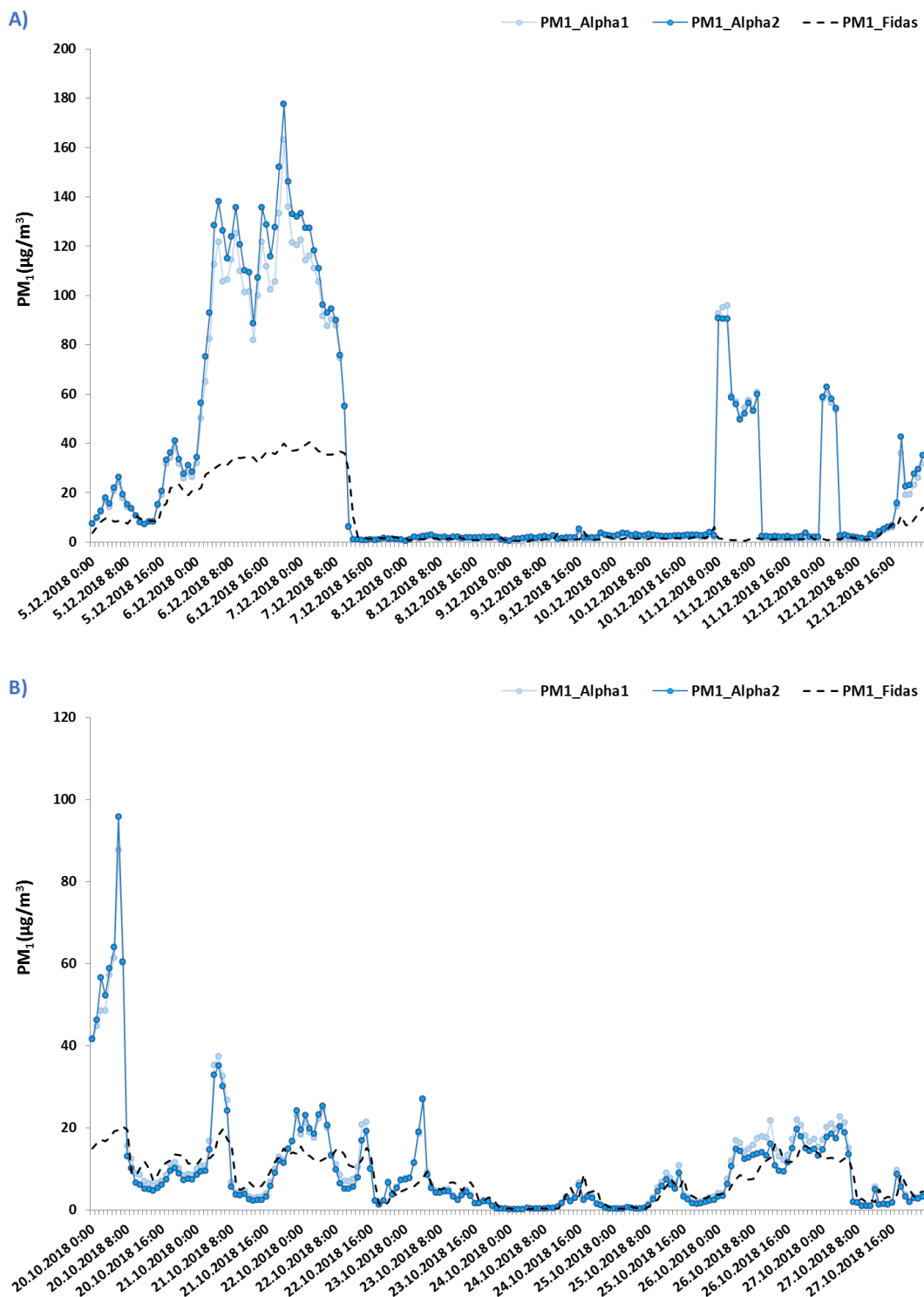
Obr. č. 24. Porovnání hodinových koncentrací částic PM_1 naměřených Alphasense senzory (osa y; PM_{1_Alpha1} a PM_{1_Alpha2}) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a Fidas analyzátořem. Osa y je zobrazena v logaritmické škále.



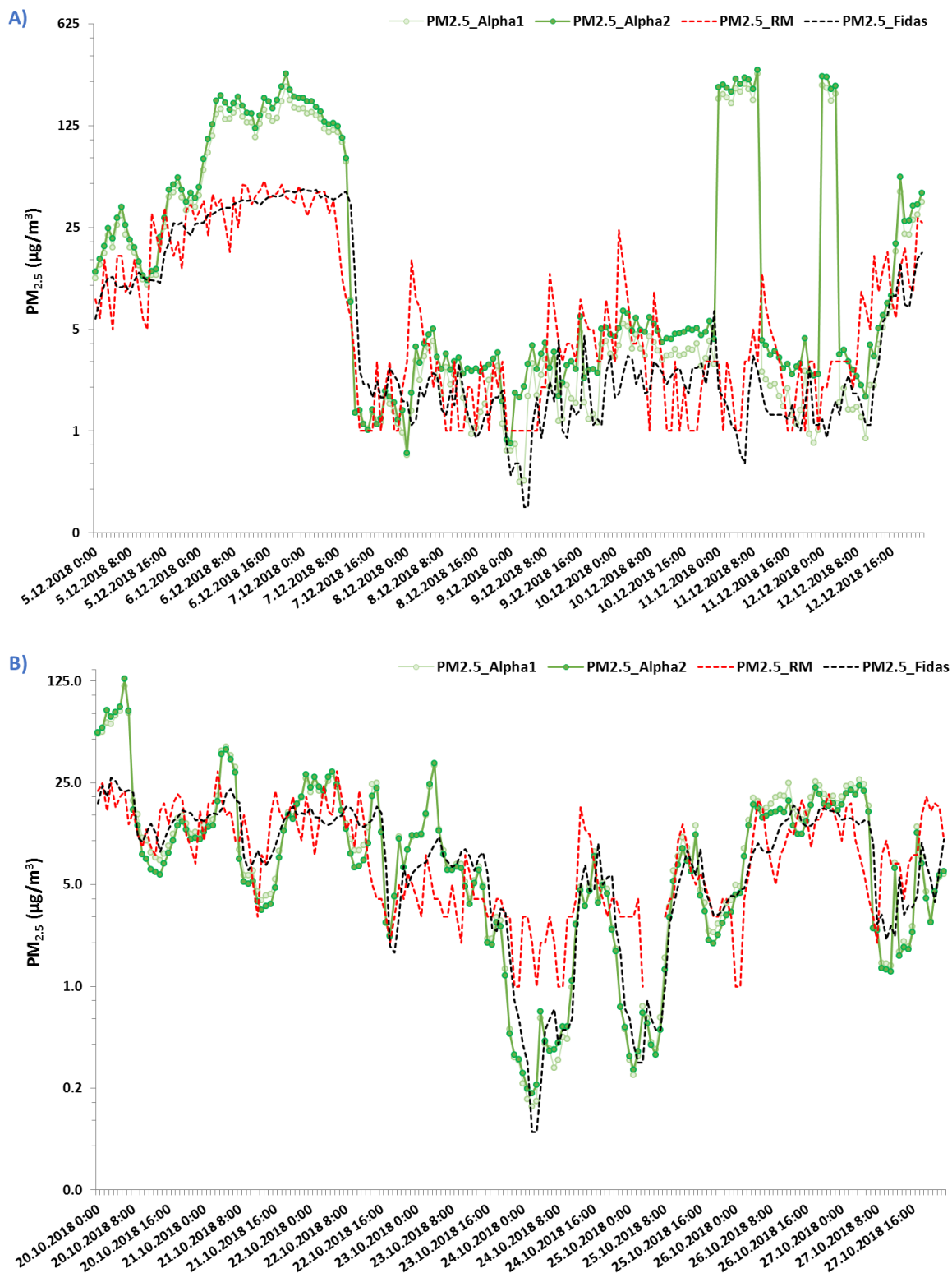
Obr. č. 25. Porovnání hodinových koncentrací částic $PM_{2.5}$ naměřených Alphasense senzory (osa y; $PM_{2.5_Alpha1}$ a $PM_{2.5_Alpha2}$) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (osa x). R^2 = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a Fidas analyzátořem. Osa y je zobrazena v logaritmické škále.



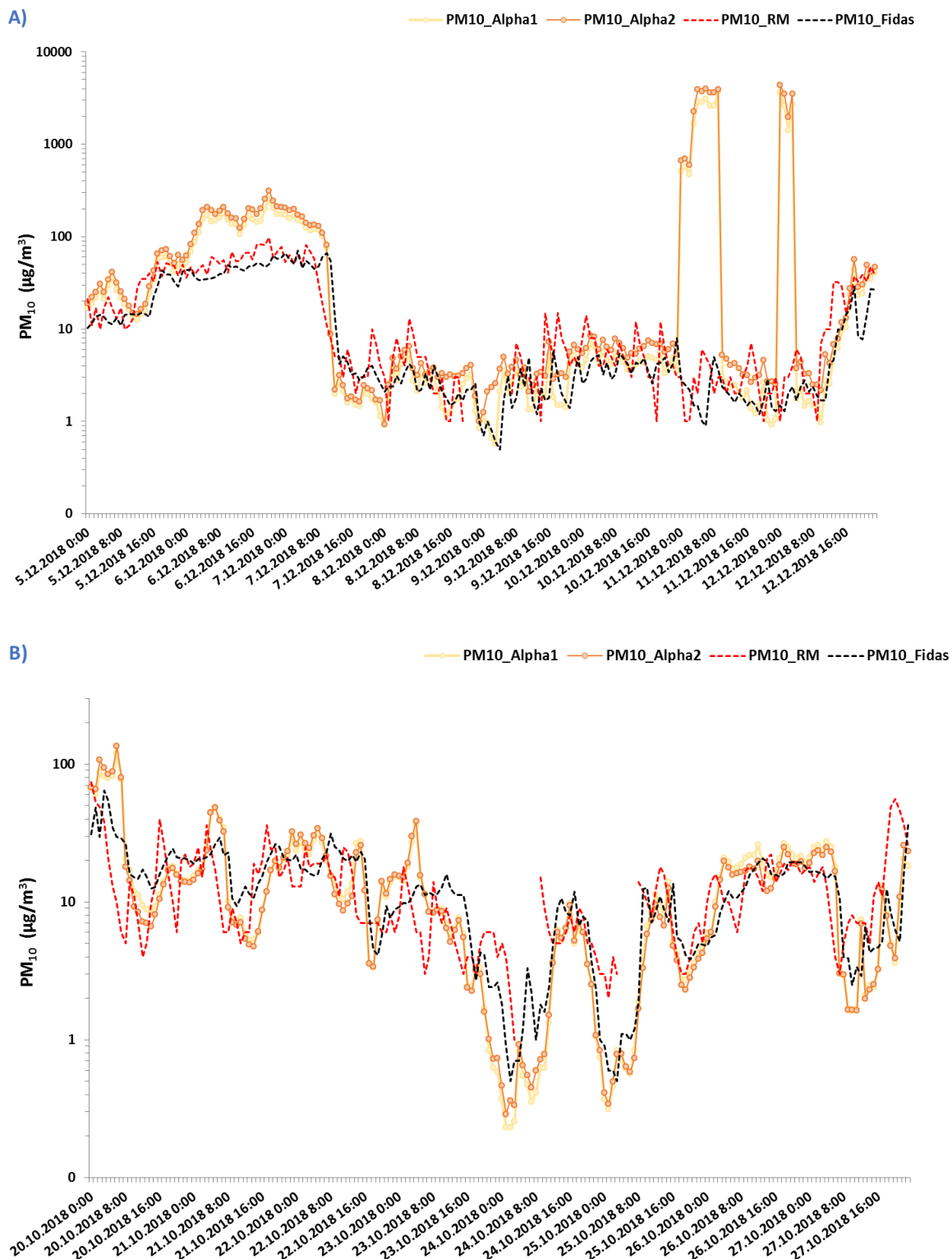
Obr. č. 26. Porovnání hodinových koncentrací částic PM₁₀ naměřených Alphasense senzory (osa y; PM₁₀_Alpha1 a PM₁₀_Alpha2) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (osa x). R² = koeficient determinance vycházející z nelineární rovnice vztahu mezi hodnotami naměřenými senzory a Fidas analyzátořem. Osa y je zobrazena v logaritmické škále.



Obr. č. 27. Průběh hodinových koncentrací částic PM₁ naměřených Alphasense senzory (Alpha1, Alpha2; osa y; plné čáry) a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (osa y; přerušované čáry) **A)** v zimním období od 5.12. do 12.12. 2018, **B)** v podzimním období od 20.10. do 27.10. 2018.



Obr. č. 28. Průběh hodinových koncentrací částic $PM_{2.5}$ naměřených Alphasense senzory (Alpha1, Alpha2; osa y; plné čáry), RM a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (osa y; přerušované čáry) **A)** v zimním období od 5.12. do 12.12. 2018, **B)** v podzimním období od 20.10. do 27.10. 2018. Osy y jsou zobrazeny v logaritmické škále.

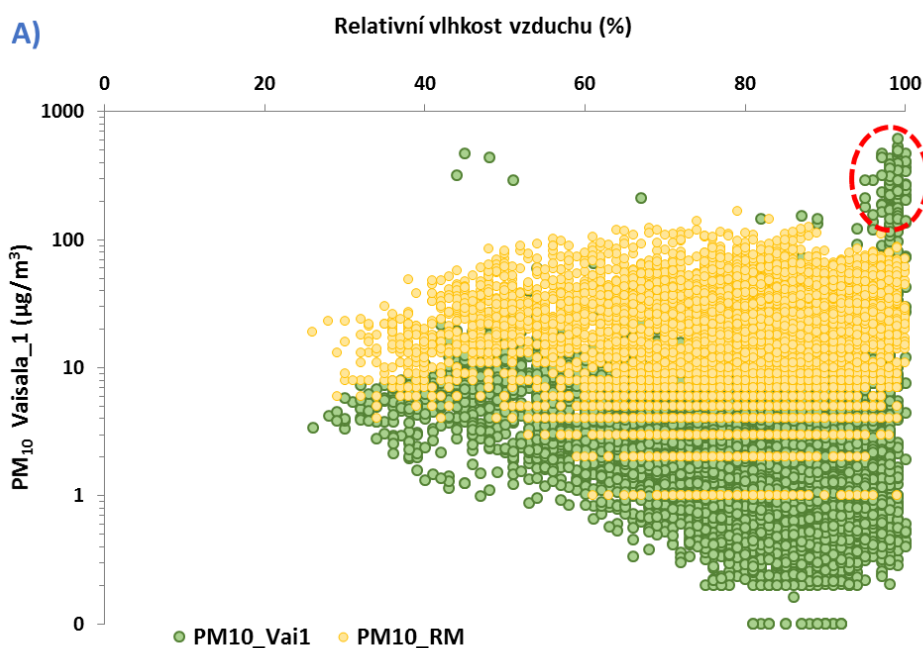


Obr. č. 29. Průběh hodinových koncentrací částic PM₁₀ naměřených Alphasense senzory (Alpha1, Alpha2; osa y; plné čáry), RM a nereferenčním analyzátořem Fidas200 (osa y; přerušované čáry) **A)** v zimním období od 5.12. do 12.12. 2018, **B)** v podzimním období od 20.10. do 27.10. 2018. Osy y jsou zobrazeny v logaritmické škále.

2.1.3.4 Shrnutí výsledků

Přestože Alphasense prachoměry OPC-N2 dosáhly asi nejlepších výsledků v porovnání naměřených hodnot mezi sebou v páru (hodnocení souměření), v porovnání s referenčními a nereferenčními metodami už dopadly hůře. Obecně Alphasense senzory výrazně nadhodnocovaly reálné měření. Nicméně co se týče korelací dat s RM a Fidas200, celkem uspokojivých výsledků dosahovaly Alphasense senzory v případě PM_{10} a $PM_{2.5}$, naopak nejhorších výsledků bylo v tomto smyslu dosaženo u koncentrací částic PM_{10} .

Efekt sezóny v případě Alphasense prachoměrů nebyl posuzován vzhledem ke krátkému testovacímu období pouze v chladnější polovině roku (od poloviny 09/2018 do začátku 01/2019). Extrémní odchylky u PM_{10} (hodnoty $> 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) byly podobně jako i u jiných prachoměrů pravděpodobně způsobeny kondenzací vodních kapek uvnitř měřicí komory ve dnech s maximální vlhkostí vzduchu (**Obr. č. 30**).



Obr. č. 30. Porovnání hodinových koncentrací PM_{10} naměřených senzorem Vaisala_1 (osa y; zelené body) a RM (osa y; žluté body) s průměrnou hodinovou relativní vlhkostí vzduchu naměřenou RM (osa x). Koncentrace částic je uvedena v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, relativní vlhkost vzduchu v %, deficit rosného bodu je ve $^{\circ}\text{C}$. Červenou přerušovanou čarou jsou vyznačeny podezřelé (odlehle) hodnoty koncentrací PM_{10} dosažené při maximální vlhkosti vzduchu za kondenzačních podmínek.

3 ZÁVĚR

Přestože technologický vývoj i popularita malých senzorů v oblasti monitoringu ovzduší neustále rostou, zkušenosti s jejich měřením stále nepřesvědčují o vhodnosti senzorů pro hodnocení kvality ovzduší a případných zdravotních dopadů na veřejnost ve smyslu právních předpisů (Zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012, Sb., a vyhláška MŽP č. 330/2012, Sb; Evropské směrnice 2008/50/ES a 2015/1480/ES). Z výsledků testovacího měření ČHMÚ, podobně jako z výsledků jiných zahraničních organizací (US EPA [14,15], JRC EC [1,6,16], NILU, WHO [17], WMO [2]), obecně vyplývá, že senzory jsou zatíženy nejen sníženou citlivostí měření (vyplývající ze samotné podstaty miniaturizace technologie), ale i výraznou interferencí s meteorologickými podmínkami a jinými spolureagujícími látkami, která často výrazně ovlivňuje kvalitu měření. Mimoto se u mnohých výrobců malých senzorů vyskytují nezanedbatelné odchylky v měření mezi různými kusy stejného typu čidla. V neposlední řadě je důležité zvážit i poměr ceny čidla a jeho životnosti. Přestože je pořizovací cena senzorů velmi výhodná (v porovnání s jinými referenčními analyzátory), průměrná doba životnosti většiny senzorů aplikovaných pro venkovní měření je 1 rok (maximální životnost uváděná některými výrobci je až 3 roky).

Na druhou stranu má senzorová technologie svůj potenciál pro využití, a to zejména jako doplňkové (experimentální) měření trendů a změn koncentrací polutantů v těžko dostupných či doposud nepokrytých místech. Pro efektivní využití senzorů k těmto účelům je ovšem důležité dodržovat určité metodické postupy pro eliminaci výskytů náhodných chyb v měření. Před samotnou aplikací senzorů k danému měření je nutné ověřit kvalitu čidel aplikací v jednom místě, a to nejlépe v místě s výskytem referenčního měření [6,16], po dobu alespoň 3 měsíců. Jedině díky tomuto kroku je možné včas podchytit jak případné vadné kusy čidel (z porovnání souměření mezi sebou), tak určité odchylky a chyby v měření čidel (v porovnání s RM), které by měly být zahrnuty do průběžných kontrol a celkového hodnocení měření. Tento krok otestování souměření čidel (mezi s sebou i s RM) by měl být opakován periodicky i po určitém období, kdy již senzory měřily v zájmových místech, aby byly podchyceny i případné sezónní změny odchylek v měření.

Další možnost, jak se vyrovnat s nižší kvalitou dat ve srovnání s referenčními metodami, je využití matematicko-statistických postupů pro zpracování velkých objemů dat – vytěžování dat (data mining), zpracování dat vágní povahy, fuzzy postupy apod.

Vzhledem k technickému vývoji senzorů lze však i přes výše uvedené problémy říci, že tyto senzory představují významný potenciál do budoucna, neboť řada jmenovaných nedostatků může být dalším vývojem odstraněna nebo minimalizována.

V současné době mohou být malé senzory dobrým řešením pro dočasné a specificky zaměřené projekty s dostatečným důrazem na kontrolu, zpracování a interpretaci naměřených dat před jejich publikací široké veřejnosti. Mohou být rovněž využity jako doplněk stávající monitorovací sítě, pro screeningové odhalování případných problémových oblastí (hotspotů) a detekci trendů vývoje.

Za stávající úrovně stavu vývoje techniky malých senzorů a při současné úrovni poznání platí následující zásadní závěry:

- **Data získávaná z malých senzorů nepředstavují rovnocennou alternativu zavedených postupů v monitoringu kvality ovzduší.**
- **Nelze je využívat pro vyhodnocování plnění požadavků vyplývajících z environmentální legislativy ani jako podkladů pro rozhodnutí, která by zasahovala do života občanů a případně omezovala jejich práva, jakož i v případech, kdy by taková rozhodnutí měla za následek výrazné ekonomické náklady nebo ztráty.**

4 Příloha č. 1 – Technická specifikace referenčních monitorů (RM) používaných ve státní imisní monitorovací síti

Pro kontrolu kvality měření malých senzorů bylo využito porovnání s měřením referenčních analyzátorů (RM) užívaných v automatické imisní monitorovací síti ČHMÚ (AIM).

Pro měření koncentrací SO₂ jsou v monitorovací síti užívány analyzátory T100 (od firmy Teledyne API, Kalifornie, USA), jejichž princip měření je založen na metodě UV fluorescence. Minimální rozsah měření je zde mezi 0 – 50 ppb, maximální rozsah měření 0 – 20 ppb. Nejnižší detekční limit je 0.4 ppb.

Imise NO₂ jsou měřeny analyzátory T200 (od firmy Teledyne API, Kalifornie, USA), založenými na chemoluminiscenčním principu měření. Minimální / maximální rozsah měření a spodní detekční limit je zde stejný jako u analyzátoru pro SO₂.

Koncentrace O₃ v ovzduší jsou měřeny UV absorpčními analyzátory T400 (od firmy Teledyne API, Kalifornie, USA), s minimálním rozsahem měření 0 – 100 ppb, maximálním rozsahem měření 0 – 10 ppm. Spodní limit detekce je zde < 0.4 ppb [18].

Znečištění prachovými částicemi (PM_{2.5} a PM₁₀) je měřeno analyzátory MP101M (od firmy Environnement SA, Envea, FR) na bázi radiometrie – absorpce beta záření. Rozsah měření je uváděn až do 10 000 µg/m³, spodní limit detekce je 0.5 µg/m³ (24 hodinový průměr) [19].

Všechny výše zmíněné analyzátory jsou v síti pravidelně kontrolovány a kalibrovány dle metodiky dané národní legislativou a mezinárodními standardy (ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories).

5 Příloha č. 2 – Technická specifikace Palas Fidas200 analyzátorů

Optický analyzátor Fidas200 (Palas, DE) je čítač částic na bázi spektrometru, který je schopen detekovat částice o velikosti od 180 nm do 18 µm a zároveň je schopen vypočítat imisní hodnoty koncentrací frakcí PM₁, PM_{2.5} a PM₁₀ (dle evropský norem EN 14907 a EN 12341). Výrobce uváděné rozmezí měření počtu částic je 1 – 20000 částic/cm³, rozmezí koncentrace 0 – 1500 µg/m³. Volitelný počet kanálů velikostí částic pro stanovení jejich počtu je až 64 kanálů. Průtok vzorku je 5 L/min, časové rozlišení vzorkování 1 minuta. Provozní teploty analyzátoru jsou uvedeny od 0 do 50°C, proto je obsluhovací a měřicí část umístěna uvnitř temperovaného AIM kontejneru [20].

O relevantnosti měření nereferenčním analyzátozem Fidas200 vypovídají vyhovující výsledky porovnání s RM v případě $PM_{2.5}$ a PM_{10} (**Tab. č. 12**). Pro ultrajemné částice PM_1 v Evropě není momentálně dostupné certifikované referenční měření pro porovnání.

Tab. č. 12. Korelace hodinových koncentrací $PM_{2.5}$ a PM_{10} naměřených prachoměrem Palas Fidas200 (Fidas) a RM.

Proměnná	$PM_{2.5_RM}$	PM_{10_RM}
$PM_{2.5_Fidas}$	0.77	0.77
PM_{10_Fidas}	0.79	0.85

6 Použitá literatura

- [1] Gerboles M, Spinelle L, Borowiak A. Measuring air pollution with low-cost sensors. 2017.
- [2] Lewis AC, Von Schneidemesser E, Peltier RE. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. WMO-No.121. World Meteorological Organisation; 2018.
- [3] Kumar P, Morawska L, Martani C, Biskos G, Neophytou M, Di Sabatino S, et al. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ Int* 2015;75:199–205. doi:10.1016/j.envint.2014.11.019.
- [4] McKercher GR, Salmond JA, Vanos JK. Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors. *Environ Pollut* 2017;223:102–10.
- [5] Castell N, Dauge FR, Schneider P, Vogt M, Lerner U, Fishbain B, et al. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environ Int* 2017;99:293–302. doi:10.1016/j.envint.2016.12.007.
- [6] Spinelle L, Gerboles M, Villani MG, Aleixandre M, Bonavitacola F. Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors Actuators, B Chem* 2015;215:249–57. doi:10.1016/j.snb.2015.03.031.
- [7] Bauerová P, Novák Z, Rychlík Š, Keder J. Small air quality sensors: In vivo testing of electrochemical Cairpol sensors in comparison to reference measurement. *Air Pollut XXVI, WIT Trans Ecol Environ* 2018;230:243–54. doi:doi:10.2495/AIR180321.
- [8] Zoest VM Van. Outlier Detection in Urban Air Quality Sensor Networks 2018.
- [9] Jiao W, Hagler G, Williams R, Sharpe R, Brown R, Garver D, et al. Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: Evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States. *Atmos Meas Tech* 2016;9:5281–92. doi:10.5194/amt-9-5281-2016.
- [10] Notario A, Bravo I, Adame JA, Díaz-de-Mera Y, Aranda A, Rodríguez A, et al. Behaviour and variability of local and regional oxidant levels (OX = O₃+ NO₂) measured in a polluted area in central-southern of Iberian Peninsula. *Environ Sci Pollut Res* 2013;20:188–200. doi:10.1007/s11356-012-0974-1.
- [11] Cairpol 2018. <http://cairpol.com/en/home/> (accessed December 18, 2018).
- [12] Yong Z, Haoxin Z. Digital universal particle concentration sensor PMS7003 2016.
- [13] Alphasense. Alphasense User Manual OPC-N2 Optical Particle Counter Alphasense

User Manual OPC-N2 Optical Particle Counter 2015:1–15.

- [14] Williams R, Kilaru V, Snyder E, Kaufman A, Dye T, Rutter A, et al. Air Sensor Guidebook. US EPA: 2014. doi:EPA/600/R-14/159.
- [15] Polidori A, Papapostolou V, Zhang H. Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors: Laboratory Setup and Testing Protocol. 2016.
- [16] Spinelle L, Gerboles M, Villani MG, Aleixandre M, Bonavitacola F. Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂. Sensors Actuators, B Chem 2017;238:706–15. doi:10.1016/j.snb.2016.07.036.
- [17] Clements AL, Griswold WG, RS A, Johnston JE, Herting MM, Thorson J, et al. Low-Cost Air Quality Monitoring Tools: From Research to Practice (A Workshop Summary). Sensors 2017;17:2478. doi:10.3390/s17112478.
- [18] Teledyne. Teledyne API 2018. <http://www.teledyne-api.com/> (accessed March 5, 2018).
- [19] Environment SA 2018. <http://www.environnement-sa.com/> (accessed January 14, 2019).
- [20] Palas. Palas, Fidas200 2018. <https://www.palas.de/en/product/fidas200> (accessed November 20, 2018).