

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Ekologie a ochrana prostředí

Ochrana životního prostředí



Michaela Sinkulová

Porovnání nových nízkorozpočtových senzorů k měření imisí

New low-cost pollutant sensor evaluation

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí závěrečné práce: RNDr. Naděžda Zíková, Ph.D.

V Praze 2017

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí této bakalářské práce RNDr. Naděždě Zíkové, Ph.D. za navržení tohoto tématu ke zpracování, za spoustu času, který věnovala detailnímu rozboru práce v průběhu roku i za její cenné rady, ochotu a motivaci. Také bych ráda poděkovala Českému hydrometeorologickému ústavu a Ústavu experimentální medicíny AV ČR za poskytnutí dat k této práci. V neposlední řadě děkuji své rodině za bezmeznou podporu.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze

Podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá představením a následným srovnáním nízkorozpočtových přístrojů pro měření imisí v ovzduší, které byly použity v rámci projektu Citi-sense v Ostravě. Výsledky měření sensorů, které probíhalo v časovém rozmezí od 1. 6. 2015 až do 7. 9. 2015 jsou porovnávány s daty naměřenými ve stejném časovém období Českým hydrometeorologickým ústavem. Data jsou zpracována tak, aby byla vhodným podkladem pro další výzkum v oblasti nízkorozpočtových přístrojů pro monitorování znečištění ovzduší. Jsou vypočítány základní parametry jako průměrná hodnota, koeficient determinace, rovnice směrnice přímky, týdenní a denní cyklus. Jednotlivé chody jsou graficky znázorněny a okomentovány. Práce také diskutuje shody jednotlivých koncentrací a možnost užití těchto nových přístrojů v monitoringu kvality ovzduší v budoucnosti.

Klíčová slova: Nízkorozpočtové měřicí přístroje, polutanty, metody sledování kvality ovzduší

Abstract

This bachelor thesis deals with the introduction and subsequent comparison of low-cost sensors measuring air pollutants, which were used in the Citi-sense project in Ostrava. The results of the measurements carried out in the period from 1st June 2015 to 7th September 2015, are compared with data measured by the Czech hydrometeorological Institute during the same period of time. The data are designed to provide the basis for further research into low-cost devices monitoring air pollution. Basic parameters such as average values, correlation coefficient, slope of linear regression, weekly and daily cycle are calculated. The results are graphically illustrated and commented. The thesis also discusses the concordance of individual concentrations and use of these new sensors in air quality monitoring in the future.

Key words: Low-cost sensors, pollutants, air pollution monitoring methods

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 7 |
| 2. Cíle práce | 9 |
| 3. Charakteristika a zdroje měřených polutantů | 10 |
| 3.1 Ozon | 11 |
| 3.2 Oxid uhelnatý | 12 |
| 3.3 Oxidy dusíku | 12 |
| 3.4 Atmosférický aerosol | 13 |
| 4. Metodika měření | 14 |
| 4.1 Popis lokality sběru dat | 15 |
| 4.1.1 Umístění přístrojů..... | 16 |
| 4.2 Referenční přístroje..... | 17 |
| 4.3 Nízkorozpočtové měřicí přístroje..... | 18 |
| 4.3.1 Popis přístroje..... | 19 |
| 4.3.2 Kalibrace | 20 |
| 5. Zpracování dat | 21 |
| 5.1 Použitá data | 21 |
| 5.2 Zpracování dat..... | 22 |
| 6. Výsledky a diskuze | 23 |
| 6.1 Průměrné hodnoty | 23 |
| 6.2 Korelační diagram..... | 25 |
| 6.2.1 Ozon | 25 |
| 6.2.2 Oxid uhelnatý | 26 |
| 6.2.3 Oxidy dusíku | 26 |
| 6.2.4 Oxid dusičitý | 27 |
| 6.2.5 Oxid dusnatý | 28 |
| 6.2.6 Hrubý aerosol..... | 28 |
| 6.2.7 Časový vývoj koeficientu determinace | 29 |
| 6.3 Týdenní chod..... | 30 |
| 6.3.1 Ozon | 30 |
| 6.3.2 Oxid uhelnatý | 31 |
| 6.3.3 Oxidy dusíku | 32 |
| 6.3.4 Oxid dusičitý | 32 |
| 6.3.5 Oxid dusnatý | 33 |
| 6.3.6 Hrubý aerosol..... | 34 |

| | | |
|-------|-------------------------|----|
| 6.4 | Denní cykly | 34 |
| 6.4.1 | Ozon | 35 |
| 6.4.2 | Oxid uhelnatý | 35 |
| 6.4.3 | Oxidy dusíku | 36 |
| 6.4.4 | Oxid dusičitý | 37 |
| 6.4.5 | Oxid dusnatý | 37 |
| 6.4.6 | Hrubý aerosol | 38 |
| 7. | Závěr | 39 |
| 8. | Literatura | 41 |

1. Úvod

V posledních desetiletích je kvalita ovzduší jedním z nejvíce sledovaných témat ochrany životního prostředí. Důvodů pro monitorování stavu kvality ovzduší je mnoho, jedním z hlavních aspektů je dopad na lidské zdraví. Nepříznivý stav ovzduší způsobuje mnoho úmrtí, vyšší výskyt rakoviny, zvýšenou nemocnost, kardiovaskulární onemocnění, respirační problémy a v neposlední řadě i snížení reprodukční schopnosti (Lafuente et al., 2016). Dalšími neméně důležitými důvody jsou degradace materiálů v důsledku kyselých dešťů, dopad na fungování ekosystémů a změna klimatických podmínek až na globální úrovni (Lim et al., 2012).

Emise znečišťujících látek v ovzduší v Evropě od roku 1990 výrazně poklesly, ale na druhou stranu koncentrace přízemního ozonu a aerosolů nezaznamenaly žádný razantní úbytek od roku 1997 (Coskun, 2011). Mezi největší zdroje nečistot patří tepelné elektrárny a průmysl, lokální vytápění pevnými palivy, spalování odpadu a automobilová doprava (Pokorná, 2016). Po celém světě jsou zavedeny emisní limity a státy se je snaží dodržovat. Emisní limit je nejvyšší možné množství znečišťující látky, která může být vypuštěna do prostředí. Tento limit je obvykle udáván jako objemová nebo hmotnostní koncentrace. Druhou sledovanou složkou je imisní limit, což je nejvýše přípustná úroveň znečištění stanovená zákonem (vyjádřená v jednotkách hmotnosti na jednotku objemu při normální teplotě a tlaku, zákon č. 201/2012 Sb.). Zákon o ochraně ovzduší (zákon č. 201/2012 Sb.) obsahuje ustanovení, které rozděluje stanovené limity pro znečištění ovzduší do několika kategorií. Vznikly proto tedy společnosti, které sledují kvalitu ovzduší a tedy i dodržování povoleného množství vypuštěných emisí pomocí monitorovací imisní sítě. V České republice je největší společností monitorující kvalitu ovzduší Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Jednou z nejvíce znečištěných oblastí u nás je centrum Moravskoslezského kraje Ostrava. Překračování imisních limitů zvláště v zimních měsících pokračuje v celé České republice (ČHMÚ, 2016). Jedním z primárních problémů stávající imisní sítě je nemožnost pokrýt dostatečně plochu měst a identifikovat tak zásadní zdroje vypouštění emisí.

V rámci projektu Citi-sense byly v létě roku 2015 v Ostravě rozmístěny nové nízkorozpočtové přístroje na měření emisí s myšlenkou rozšíření monitorovací sítě znečištění. Rozmístění většího počtu měřicích přístrojů je výhodné už jen z toho důvodu, že složení venkovního ovzduší je rozdílné v závislosti na lokálních zdrojích emisí a atmosférických podmínkách, které jsou v městském prostředí velmi těžce předvídatelné bez sofistikovaných

modelovacích nástrojů (Kumar et al., 2015). Umístění jen několika málo přístrojů na velkou plochu různých zdrojů emisí je možná dostačující pro legislativu, ale nedokáže pokrýt oblasti, ve kterých může být znečištění mnohem větší než v okolí umístění referenčního přístroje, čili monitoring tzv. hotspots. Rozmístěním většího množství měřicích sensorů se může rozšířit mapování znečištěných městských oblastí a i když jsou přístroje samy o sobě méně přesné než přístroje stávající, jejich velké množství na jednotku plochy může poskytnout pro mapování důležitých zdrojů emisí dostačující data (Kumar et al., 2015).

2. Cíle práce

Cílem této práce je představení a zhodnocení nového typu nízkorozpočtových přístrojů k měření imisí (typ AQMesh), které byly testovány v rámci projektu Citi-sense (www.citi-sense.eu) a kterými byly měřeny koncentrace přízemního ozonu (O_3), oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x), oxidu dusičitého (NO_2), oxidu dusnatého (NO), hrubé frakce atmosférického aerosolu (PM_{10}) a jemné frakce atmosférického aerosolu ($PM_{2,5}$). Data z těchto přístrojů jsou porovnávána s referenčními daty získanými od ČHMÚ naměřenými v tomtéž časovém úseku, který trval od 1. 6. 2015 až do 7. 9. 2015. Jsou hodnoceny jak shody celkových koncentrací jednotlivých měřených polutantů, tak i denní a týdenní chody. Závěrem je také zhodnocení, zda mohou mít tyto přístroje v budoucnu uplatnění při monitoringu městského ovzduší.

3. Charakteristika a zdroje měřených polutantů

Zemská atmosféra se skládá z plynů, pevných částic a vody. Procentuálně nejvíce zastoupenými permanentními a stálými plyny v atmosféře jsou dusík (78,9 %), kyslík (20,95 %) a vzácné plyny. Další významnou složkou jsou oxid uhličitý (0,03 %), vodní pára (0,25 % - 3 %) a plyny dočasně setrvávající. Škodlivé chemické látky v podobě pevných, kapalných nebo plynných forem jsou nazývány polutanty. Místo, kde jsou polutanty aktivní, je ve spodních 3-4 km troposféry. Tyto látky se z ovzduší následně dostávají do vody i půdy, kde působí na celé ekosystémy (Coskun, 2011).

Polutanty jsou řazeny do dvou skupin, kterými jsou polutanty primární a sekundární. Primární polutanty jsou přímo emitovány do ovzduší ze zdrojů. Do této skupiny můžeme zařadit například oxid siřičitý (SO₂), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky, kovy, oxid uhličitý (CO₂) a primární aerosolové částice. Druhou skupinou jsou sekundární polutanty, které vznikají řadou následných procesů v atmosféře. Příkladem je nukleace aerosolových částic, navázání sloučenin na již existující aerosolové částice (Kulmala et al., 2013), nebo vznik přízemního ozonu sledem reakcí s oxidy dusíku (Hůnová, Janoušková, 2004).

Hlavním zájmem ochrany ovzduší je sledování zdrojů emisí, tedy procesů, při kterých jsou látky emitovány do ovzduší. Tyto zdroje se dělí na několik typů. Podle původu se dělí na antropogenní a přirozené. Mezi antropogenní zdroje patří veškeré zdroje spojené s lidskou aktivitou. Je tím myšlena výroba elektřiny a tepla, průmysl, zemědělství a doprava. Jako přirozené zdroje je označována sopečná činnost, bakteriální činnost, resuspenze a denitrifikační procesy v půdě (Hůnová, Janoušková, 2004).

Kromě emisí jsou cíleně sledovány také imise. Rozdíl mezi emisí a imisí je ten, že emise je látka vypouštěná do ovzduší a imise je znečišťující příměs, která z atmosféry přechází do kontaktu s příjemcem. Příjemcem může být jak člověk, tak i budovy, půda a voda. Pro sledování imisí jsou zákonem zavedeny hodnoty imisních limitů pro jednotlivé polutanty, které jsou uvedeny v tabulce č. 1 a tabulce č. 2. Způsob jakým příjemce na kontakt s polutantem reaguje, už závisí na povaze a vlastnostech jednotlivých polutantů. Jak již bylo výše uvedeno, sensory použité pro získání dat v této práci měřily koncentrace přízemního ozonu, oxidu uhelnatého, oxidů dusíku, oxidu dusičitého, oxidu dusnatého, hrubých a jemných aerosolových částic.

Imisní limity pro ochranu zdraví dle zákona č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší

| Znečišťující látka | Doba průměrování | Imisní limit | Maximální počet překročení |
|---------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|
| Oxid siřičitý | 1 hodina | 350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 24 |
| Oxid siřičitý | 24 hodin | 125 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 3 |
| Oxid dusičitý | 1 hodina | 200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 18 |
| Oxid dusičitý | 1 kalendářní rok | 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 0 |
| Oxid uhelnatý | maximální denní osmihodinový průměr ¹⁾ | 10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 0 |
| Benzen | 1 kalendářní rok | 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 0 |
| Částice PM ₁₀ | 24 hodin | 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 35 |
| Částice PM ₁₀ | 1 kalendářní rok | 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 0 |
| Částice PM _{2,5} | 1 kalendářní rok | 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 0 |
| Olovo | 1 kalendářní rok | 0,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 0 |

Tab. č. 1. Zdroj: zákon č. 201/2012 Sb

Poznámka:

¹⁾ Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace se stanoví posouzením osmihodinových klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu. Každý osmihodinový průměr se přiřadí ke dni, ve kterém končí, to jest první výpočet je proveden z hodinových koncentrací během periody 17:00 předešlého dne a 01:00 daného dne. Poslední výpočet pro daný den se provede pro periodu od 16:00 do 24:00 hodin.

3.1 Ozon

Za normálních podmínek je ozon neviditelný plyn s jemným typickým zápachem. Ve stratosféře najdeme 90 % ozonu (Owens et al. 2013), kde tvoří ozonovou vrstvu chránící Zemi před nebezpečnými složkami UV záření (Hůnová, Janoušková, 2004), zbylých 10 % tvoří troposférický ozon (Owens et al. 2013). Je silným oxidačním činidlem napadajícím hlavně dýchací cesty, ale může způsobit i bolesti hlavy a pálení očí (Waldhauserová, 2008). Neméně důležitý je také vliv ozonu na vegetaci, pro což je v zákonu o ochraně ovzduší uveden imisní limit pro ochranu vegetace (*Tabulka 2.*) spolu s limitem pro ochranu zdraví (*Tabulka 2.*). V případě znečištění ovzduší nás zajímá troposférický ozon, který je hlavní složkou fotochemického smogu (WHO, 2016). Přízemní ozon vzniká fotochemickými reakcemi s oxidy dusíku a VOC (těkavé organické látky), které jsou emitované automobilovou dopravou,

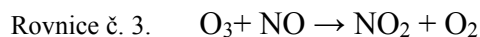
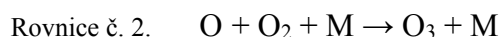
což z něj dělá sekundární polutant (Sillman, 1998). Za pomoci ultrafialového záření se oxid dusičitý rozkládá na oxid dusnatý a atomární kyslík. Tento vysoce reaktivní atomární kyslík reaguje s další molekulou kyslíku za vzniku ozonu, který následně reaguje s oxidem dusnatým a systém se tak stále obnovuje (Hůnová, Janoušková, 2004).

Imisní limity pro troposférický ozon dle zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší

| Účel vyhlášení | Doba průměrování | Imisní limit |
|---------------------|-------------------------------------|---|
| Ochrana zdraví lidí | maximální denní osmihodinový průměr | 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Ochrana vegetace | AOT40 | 6000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ |

Tab. č. 2. Zdroj: zákon č. 201/2012 Sb.

Rovnice vzniku přízemního ozonu



Zdroj: (Hůnová, Janoušková, 2004)

3.2 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý je bezbarvý plyn, bez chuti a bez zápachu, lehčí než vzduch. Vzniká v důsledku nedokonalého spalování uhlovodíků a organických látek v dopravě (Hůnová, Janoušková, 2004) a také metalurgickým a energetickým průmyslem (Pokorná et al., 2016). Převážně v zimním období vzniká v lokálních topeništích. Vdechováním se váže na červené krevní barvivo hemoglobin a blokuje tak navázání kyslíku, což způsobuje nedostatek kyslíku a může vést až ke smrti (Nagao et al., 2014). V normálních koncentracích v ovzduší poměrně brzo oxiduje na oxid uhličitý CO_2 (Hůnová, Janoušková, 2004).

3.3 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku vznikají z antropogenních i přirozených zdrojů. Většina vzniká v motorech automobilových vozidel za vysokých teplot a tlaků během hoření s nadbytkem kyslíku, což je i hlavním zdrojem těchto oxidů. Také jsou vypouštěny jako vedlejší produkt výroby elektrické

energie z elektráren (Hůnová, Janoušková, 2004). Přirozeně vznikají oxidy dusíku i při výbojích blesků spolu s ozonem. Nejběžnější oxidy jsou oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂), které se významně podílí na vzniku troposférického ozonu. Dále do této skupiny můžeme zařadit oxid dusný (N₂O), který je v přízemní vrstvě atmosféry stabilní a rozkládá se až ve stratosféře a dusičnany (NO₃) s velmi krátkou životností (Braniš, Hůnová, 2009). Oxidy dusíku se podílejí v atmosféře na vzniku kyselých dešťů a následné acidifikaci půd a degradaci materiálů (Hůnová, Janoušková, 2004).

3.4 Atmosférický aerosol

Aerosol je soubor pevných nebo kapalných částic v rozsahu 1 nm-100 μm. Aerosoly podle zdrojů můžeme rozlišit na dvě skupiny. Primární aerosol, který je emitován do atmosféry přímo určitým zdrojem, jako je spalování, nebo i práce v povrchových lomech. Druhou skupinou je sekundární aerosol, jenž vzniká chemickými reakcemi složek v atmosféře. Další dělení je podle velikosti aerosolu na jemný a hrubý. Jemnější částice (PM_{2,5}) se usazují hlavně v dýchacích cestách a fungují jako nosiče karcinogenů i mutagenů. Obecně platí, že čím menší velikost částic, tím hlouběji do těla se mohou dostat a mají také delší dobu setrvání a mohou být v těle transportovány na delší vzdálenosti (Maznová et al., 2009). Co se týká zdrojů frakce jemného aerosolu, tak největší podíl na vypouštění do ostravského ovzduší má spalování uhlí, spékárny rud (což je proces při kterém se spékáním koksu, železné rudy, vápence a dalších rud připravuje vsázka do vysoké pece), doprava, výroba železa a v neposlední řadě odsiřování strusky (Pokorná et al., 2015). Pro hrubý aerosol (PM₁₀) jsou zdroje podobné, největší množství ho najdeme v prachu na silnicích a v jejich okolí, dalším ostravským zdrojem je spékárna rud, ale tentokrát při zpracování bez výrazného zvýšení teploty, spalování uhlí a výroba surového železa. (Pokorná et al., 2015).

4. Metodika měření

Data zpracovaná v této práci byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem, tato data jsou označena jako data z referenčních přístrojů. Data z nízkorozpočtových sensorů byla poskytnuta Ústavem experimentální medicíny AC ČR v rámci projektu citi-sense. Měření probíhalo v letních měsících v Ostravě v periodě 1. 6. 2015 – 7. 9. 2015. Data pro tuto práci byla získána ze čtyř různých referenčních přístrojů umístěných na třech různých stanovištích, viz tabulka č. 3. i s popisem jednotlivých metod. Šest nízkorozpočtových sensorů bylo umístěno v blízkosti referenčního přístroje v Ostravě - Porubě.

Principy stanovení v automatizovaných stanicích ČHMÚ v roce 2015 s popisem jednotlivých metod

| Veličina | Metoda analýzy | jednotka | interval | stanice |
|------------------|--|-------------------|----------|-----------------|
| PM ₁₀ | RADIO [radiometrie – absorpce beta záření] | µg/m ³ | 1h | Ostrava-Fifejdy |
| O ₃ | UVABS [UV-absorpce] | µg/m ³ | 1h | Ostrava-Fifejdy |
| NO | CHML [chemiluminiscence] | µg/m ³ | 1h | Ostrava-Poruba |
| NO ₂ | CHML [chemiluminiscence] | µg/m ³ | 1h | Ostrava-Poruba |
| NO _x | CHML [chemiluminiscence] | µg/m ³ | 1h | Ostrava-Poruba |
| CO | IRABS [IR-korelační absorpční spektrometrie] | µg/m ³ | 8h | Ostrava-Přívoz |

Tab. č. 3. Zdroj: ročenka ČHMÚ 2015

RADIO – radiometrie – absorpce beta záření - PM₁₀, PM_{2,5}

Tato metoda funguje na principu absorpce beta záření ve vzorku, který je zachycen na filtračním materiálu. Hmotnost zachycených částic aerosolu je úměrná rozdílu absorpce beta záření mezi exponovaným a neexponovaným filtračním materiálem. Z tohoto rozdílu je odvozena koncentrace aerosolu. (ČHMÚ 2015)

CHML – Chemiluminiscence - NO_x

Při chemiluminiscenci se excitují molekuly dusíku ozonem. Při přechodu z vyšší energetické hladiny zpět do základní dojde k uvolnění energie ve formě chemiluminiscence. Toto záření je detekováno fotonásobičem. (ČHMÚ 2015)

UVABS – ultrafialová absorpční fotometrie - O₃

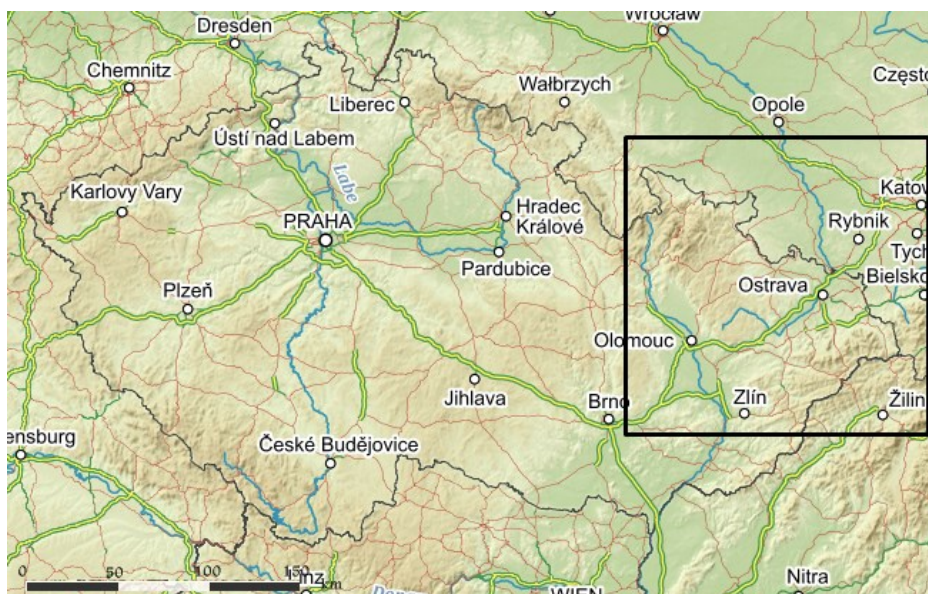
Metoda spočívá v absorpci záření s vlnovou délkou 254 nm ozonem, který je přítomen v analyzovaném vzorku. UV lampou se měří střídavě čistý vzduch a vlastní vzorek v kyvetách. (ČHMÚ 2015)

IRABS - Infračervená-korelační absorpční spektrometrie - CO

Infračervené záření vycházející ze zdroje, prochází dvěma paralelními kyvetami, z nichž jedna obsahuje referenční atmosféru a druhá analyzovaný vzorek venkovního ovzduší. Detekuje se rozdíl intenzit záření, který je úměrný koncentraci oxidu uhelnatého. (ČHMÚ 2015)

4.1 Popis lokality sběru dat

Ostrava je třetí největší město v České republice s plochou 214 km² a počtem obyvatel zhruba 300 tisíc (www.ostrava.cz). Nachází se na soutoku řek Odry, Opavy, Ostravice a Lučiny. Je srdcem Moravskoslezského kraje a leží nedaleko slovenských a polských hranic. Region je ohrazen pohořím Jeseníky ze severozápadu a Beskydami z jihovýchodu. Toto údolí se táhne od jihozápadu až na severovýchod slezské části Polska (obr. 1). Směr proudění vzduchu typicky kopíruje směr údolí, převážně tedy proudí od jihozápadu (Vossler et al., 2015). Z historického hlediska Ostrava byla vybudována jako středisko s těžkým průmyslem, těžbou uhlí a hutěmi. Dnes jsou v Ostravě vybudovány koksovny a na důležitosti nabývá strojírenský a metalurgický průmysl. To vše je důvodem, proč je tomuto městu přiřazen status oblasti s nejhorší kvalitou ovzduší jak v České republice, tak i v centrální Evropě (tzv. hot spot). Hlavními zdroji ve městě je již uvedený těžký průmysl spojený s končící těžbou uhlí, dále spalování fosilních paliv, doprava, lokální topeniště a pravděpodobně i přenos znečištění ze sousední industriální části Polska (Pokorná et al., 2015).



Obr. č. 1. Orografická mapa České republiky, Zdroj: Mapy.cz

4.1.1 Umístění přístrojů

Nízkorozpočtové přístroje (celkem 6) byly umístěny na měřící stanici Ostrava-Poruba viz obr. 2., v blízkosti přístroje, z kterého jsem získala data pro oxidy dusíku. Lokality rozmístění referenčních přístrojů taktéž vyznačené v obr. 2. se lišily. Důvodem použití dat z více přístrojů, byla nedostupnost potřebných dat ze stanice v Ostravě - Porubě pro pokrytí všech polutantů měřených sensory. Byly proto k doplnění vybrány dvě další stanice Českého hydrometeorologického ústavu. Stanice Ostrava - Fifejdy, která je od lokality umístění sensorů (Ostrava - Poruba) vzdálena 7,6 km vzdušnou čarou. Druhou vybranou stanicí byla Ostrava – Přívoz, která je od lokality umístění sensorů v Porubě vzdálena 8,6 km vzdušnou čarou. V tabulce č. 4. jsou uvedeny jednotlivé lokality umístění přístrojů ČHMÚ včetně označení měřeného polutantu a popisu okolní lokality.

Umístění měřicích přístrojů ČHMÚ v Ostravě s popisem měřených polutantů a lokality

| Lokalita | Měřený polutant | Terén | n.m. | Klasifikace |
|-------------------|--|---------------------------------------|-------|-------------|
| Ostrava - Fifejdy | PM ₁₀ + O ₃ | rovina, velmi málo zvlněný terén | 220 m | městská |
| Ostrava - Poruba | NO + NO ₂ + NO _x | horní nebo střední část svahu (do 8%) | 242 m | předměstská |
| Ostrava - Přívoz | CO | rovina, velmi málo zvlněný terén | 207 m | průmyslová |

Tab. č. 4. Zdroj: ISKO(ČHMÚ)



Obr. č. 2. Umístění měřících stanic ČHMÚ (označeno hvězdičkou) a nízkorozpočtových přístrojů (označeno žlutým kruhem). Zdroj: Mapy.cz

4.2 Referenční přístroje

Z historického hlediska byl monitoring kvality ovzduší zaveden ze dvou hlavních důvodů: dozor porušování legislativy a kvůli vědeckým účelům. Momentálně je kvalita ovzduší monitorována specializovanými autoritami (vládní útvary, vědci, zdravotními výzkumnými středisky) používajícími přístroje sledování kvality ovzduší, kterými jsou nákladné optické a chemické analyzéry, fixně umístěné na určitých místech (Castell et al., 2016). Vybudovaná imisní síť měří koncentrace oxidu uhelnatého (CO), oxidu siřičitého (SO₂), oxidu dusičitého (NO₂), ozonu (O₃) a aerosolové částice (PM₁₀, PM_{2,5}) (ČHMÚ, 2017). Přístroje jsou mohutné, těžké a nákladné, s cenami pohybujícími se od € 5000 (v přepočtu 135 100,- Kč) až k € 30,000 (v přepočtu 810 600,- Kč) za jediný přístroj (Castell et al., 2016). Tato pevně umístěná monitorovací zařízení rovněž podléhají přísným rutinním údržbám a kalibracím pro zajištění vysoké kvality údajů a srovnatelnosti mezi jednotlivými stanicemi a regiony (Castell et al., 2016). Velká města s vyšší mírou znečištění ovzduší mají na několika místech umístěny referenční přístroje, které měří koncentrace v reálném čase. Bohužel, z důvodu

nákladnosti měřicích stanic je tato síť velmi řídká. Poskytovaná data jsou sice velmi přesná, ale jen na několika lokalitách, což je uspokojující pro legislativní účely, nikoliv ale pro poskytnutí informací o koncentračních gradientech, mající potenciální význam pro ochranu zdraví. V menších městech je umístění takovýchto stanic příliš nákladné a města proto někdy používají mobilní zařízení mající stejné postupy údržby a kalibrace jako referenční přístroje a které se mohou připevnit například i na vozidla. Používají se na sledování stacionárních zdrojů během určité doby monitoringu v lokacích, které nemohou být pokryty referenčními přístroji (Castell et al., 2016).

4.3 Nízkorozpočtové měřicí přístroje

Nízkorozpočtové přístroje jsou v posledních letech stále populárnější a rychle se vyvíjející skupina senzorů, protože stávající monitorovací zařízení nejsou schopna dostatečně detailně pokrýt větší území (Gao et al., 2015). Přenosné nízkorozpočtové přístroje mohou zaplnit tuto mezeru ve sledovací síti atmosférických polutantů s užitím mnohem menších nákladů, než jsou vynaloženy za jeden konvenční přístroj. Díky neustálému technologickému vývoji je možné maximálně odlehčit přístroje, které se tak stávají lehce přenosné díky použití mikro-eletrických-mechanických systémů. Také se stávají energeticky nenáročně a úsporné díky zapojení extrémně energeticky účinných obvodů a komunikačních zařízení (WiFi, bluetooth) (Kumar et al., 2015). Navíc se tak díky těmto vylepšením stávají až tak dostupné a jednoduché na ovládání, že vznikají i projekty, které do měření zapojují veřejnost pomocí mobilních zařízení (např. projekt Citi-sense). Na druhou stranu se nízká cena samozřejmě odrazí na kvalitě poskytnutých dat. Míra posouzení užitečnosti takových dat je pak cílem této práce. Další výzvou je maximální možná doba provozu sensoru. Pohybuje se od půl roku do 2 let, kdy je už akutně nutná výměna baterie (Kumar et al., 2015).

Komerčně dostupné nízkonákladové přístroje fungují z velké části na dvou principech. Jedním způsobem jsou elektrochemické interakce mezi snímacím materiálem a polutantem. Principem je absorpce na polovodivém nanomateriálu a měření změny vodivosti na základě uvolňování elektronů polutantu a zařazení do vlastní mřížky materiálu (Kumar et al., 2015). Tato metoda je používána pro plynné polutanty. Druhým způsobem je absorpce světla ve viditelném záření (380–760 nm), nebo měření rozptylu světla na částicích, což je užívaná metoda pro aerosolové částice za použití algoritmů, které vyhodnocují jak velikosti a koncentraci částic, tak mohou analyzovat i jejich složení (Castell et al., 2016).

Následná analýza dat ze sítě nízkonákladových přístrojů zkoumá nejen městské zdroje polutantů, následné změny v atmosféře, ale také transportní mechanismy. Tato malá, levná a přenosná zařízení mohou výrazně zlepšit schopnost charakterizovat koncentrace polutantů s vysokým prostorovým a časovým rozlišením, zvláště když mohou být tato zařízení rozmístěna na velké ploše současně a poskytnout tak reprezentativní informace pro města a přilehlé oblasti, které jsou moc rozsáhlé na zhodnocení jen pomocí několika stávajících přístrojů (Kumar et al., 2015). Další možným využitím je detekování míst s enormními koncentracemi tzv. hotspots.

Pro získání dat, která jsou zpracována v této práci, bylo použito 6 přístrojů typu AQMesh. Cena přímo takového přístroje se pohybuje v přepočtu kolem 90 až 150 tisíc Kč, což je stále relativně málo v porovnání s cenou referenčního přístroje, který stojí až 8x tolik (Castell et al., 2016) a to bez nákladů na pravidelnou údržbu a kalibraci (University of Cambridge enterprise, 2015).



Obrázek č. 1. Vlevo: Přístroj AQMesh. Vpravo: Způsob umístění přístroje.

Zdroj: <http://www.aqmesh.com/>

4.3.1 Popis přístroje

Sensor AQMesh, má mnoho možných nastavitelných funkcí a režimů měření polutantů, pro aerosoly je možné nastavit měření v různém rozsahu velikostí částic. Je také vybaven bezdrátovým komunikačním systémem zajištěným SIM kartou, automatickým GPS lokátorem, voděodolným krytem, lithiovými dobíjecími bateriemi s dlouhou životností a možností připojení na externí zdroj napětí. Zvládne měřit zároveň se sledovanou látkou i okolní teplotu, tlak, vlhkost a hluk. Přístroje mají také určitá omezení, která je vhodné dodržovat v závislosti na funkčnosti sensoru. Jsou vhodné k použití od -20 °C do 40°C. Jsou sestavené pro použití ve vnějších podmínkách s venkovním tlakem vzduchu od 750-1450 mbar,

což je 17 kPa – 145 kPa (pro představu, za normální tlak je používána hodnota 101,325 kPa) a vlhkostí v rozmezí 15- 5 % (Manuál AQMesh).

Princip fungování přenosu dat je jednoduchý. Signál z měřicího přístroje musí být přenesen přes GPRS na cloud server, protože přímo ze sensoru se data stáhnout nedají. Surová data ze sensorů jsou matematicky zpracována na zabezpečeném cloud serveru, který zohlední okolní faktory prostředí. K tomuto serveru se může dostat člověk na základě přiděleného loginu a data si stáhnout k dalšímu vyhodnocení. Vše tedy funguje bezdrátově (Manuál AQMesh).

4.3.2 Kalibrace

Každý sensor, ať už nízkorozpočtový, nebo porovnávaný referenční, musí být opakovaně kalibrován. Zejména je častější kalibrace doporučena v prvních 30 dnech, než se sensor adaptuje na okolní prostředí. Kalibrace nízkorozpočtových sensorů je odlišná od standardních analytických metod, což způsobuje chybu v přesnosti kolem $\pm 10\%$ pro většinu polutantů (Kumar et al., 2015). Kalibrací je myšleno nastavení výstupního signálu sensoru tak, aby odpovídal úrovni kalibračního plynu. Kalibrace provádí vždy osoba, která má k této činnosti oprávnění v intervalu doporučeným výrobcem. Kalibrace se provádí dvěma kroky. Prvním krokem bývá „zero check“, v českém jazyce se používá termín „nulová hranice“, což znamená, že se přístrojem prožene vzduch s nulovou koncentrací měřeného polutantu nebo syntetický vzduch, nebo okolní vzduch považovaný za čistý. Druhým krokem je „span check“ což je vystavení kalibračnímu plynu o známé koncentraci měřené látky (Kumar et al., 2015).

5. Zpracování dat

5.1 Použitá data

Data poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem a data získaná ze sensorů, byla v obou případech měřena s hodinovým krokem po dobu 99 dní (1. 6. 2015 – 7. 9. 2015). Před samotným zpracováním dat bylo nutné vyfiltrovat chybná data, která následně nebyla použita při vyhodnocování. Bylo nutné odstranění dat sensorů frakce jemného aerosolu ($PM_{2,5}$), která nebyla měřena ČHMÚ a nemohla být tedy porovnána a použita k vyhodnocení. Také se vyskytl problém chybějících dat pro PM_{10} u sensoru 5, kde data kompletně chyběla od data 13. 8. 20:00 2015 až do konce měření, tedy do 7. 9. 23:00 2015. Následujícím krokem byla vyfiltrována veškerá záporná data z přístrojů jak ČHMÚ, tak i sensorů, protože koncentrace nemůže být nižší než nula. Dále byl odstraněn úsek dat sensorů z důvodu chybějících dat z ČHMÚ k porovnání v rozsahu 15. 6. 0:00 2015 hod až 18. 6. 23:00 2015. Dalším krokem bylo odstranění nulových hodnot, protože této hodnoty je nemožné dosáhnout ve venkovním prostředí, tudíž nulové hodnoty byly vyhodnoceny jako chybné. Zvláštním odfiltrováním prošly hodnoty koncentrací CO pod hranicí detekce, kdy přístroj ČHMÚ (Ostrava-Přívoz) udával konstantně poloviční hodnotu ($58 \mu\text{g}/\text{m}^3$) této hranice ($116 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Jen pro zajímavost uvedu, že sensory v tomto případě udávaly průměrně hodnotu $117,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro jednotlivé sensory byly počty odstraněných dat tak rozsáhlé, že pouze jeden sensor (sensor 5) byl schopen poskytnout použitelná data pro všechny měřené polutanty najednou. Když byl počet odstraněných hodnot procentuálně nad 50 %, data byla vyhodnocena jako nedostatečná a byla použita data z jiných sensorů, kde chyba nebyla tak vysoká k pokrytí hodnot pro všechny polutanty. Byla vypracována tabulka (tab. č. 5.) s vypočteným procentuálním zastoupením chybných dat.

Vypočtené procentuální zastoupení odstraněných dat

| | % odstraněných dat | | | | | |
|------------|--------------------|-----|-----|----|----|------|
| | NO | NO2 | Nox | CO | O3 | PM10 |
| Sensor 1 | 19 | 53 | 39 | 10 | 30 | 0 |
| Sensor 3 | 5 | 93 | 77 | 10 | 62 | 0 |
| Sensor 5 | 8 | 48 | 18 | 12 | 13 | 29 |
| Sensor 7 | 7 | 50 | 37 | 10 | 5 | 0 |
| Sensor 9 | 81 | 5 | 23 | 10 | 66 | 0 |
| Sensor 14 | 97 | 28 | 75 | 11 | 16 | 0 |
| Průměr (%) | 36 | 46 | 45 | 10 | 32 | 5 |
| ČHMÚ | 19 | 10 | 9 | 9 | 8 | 5 |

Tab. č. 5.

Červeně označené hodnoty jsou nad 50 % chybných dat, což poukazuje na značnou nepřesnost přístrojů. Oranžově označená hodnota už se blíží hranici 50 % chybných dat.

5.2 Zpracování dat

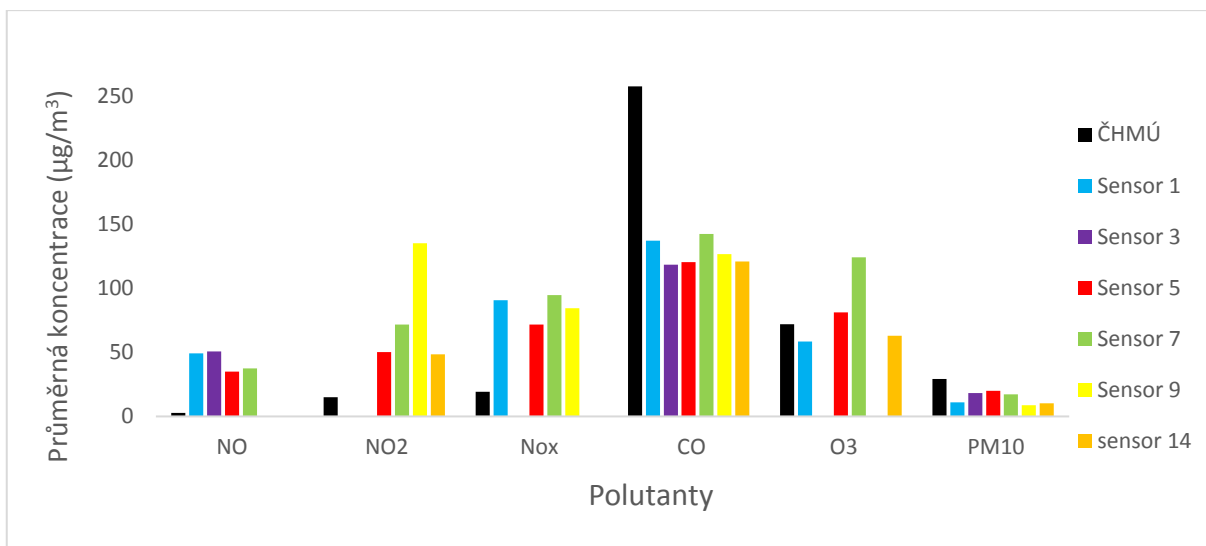
Data v této práci byla dodána v programu Microsoft Excel, ve kterém byla také zpracována. Zpracování bylo prováděno pro veškerá hodinová data naměřená v rozmezí 1. 6. 2015 až 7. 9. 2015 kromě vyjmutých 3 dní (15. 6. 2015-18. 6. 2015) z důvodu výpadku všech referenčních přístrojů. Možným důvodem je pravidelná údržba a kalibrace v tomto časovém rozmezí, která u referenčních přístrojů mohla proběhnout. Pro grafické znázornění byly použity histogramy, bodové grafy s regresními přímkami a spojnicové grafy. Byly zpracovány celkové průměrné koncentrace polutantů za celé měřené období, týdenní chody, denní chody a změny koeficientu determinace v intervalu sudých týdnů.

6. Výsledky a diskuze

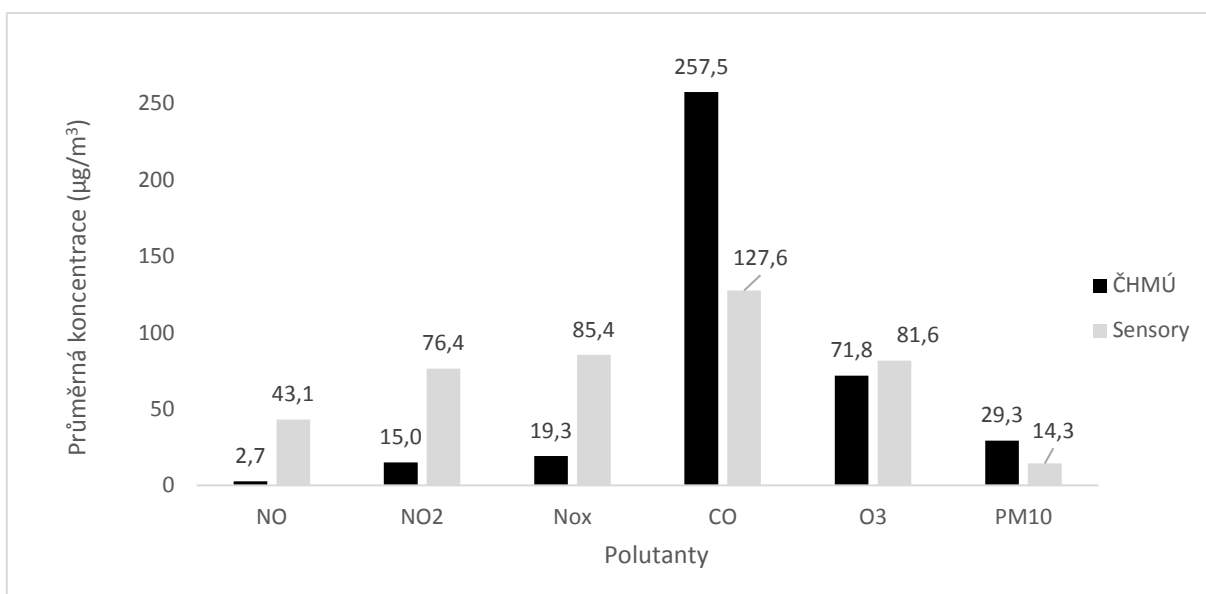
Jedná se o unikátní měření nízkonákladovými sensory typu AQMesh v České republice a první porovnání s referenčními měřicími přístroji ČHMÚ. Stále jsou ve výstupních datech měření významné nedostatky, které poukazují na nespolehlivost přístrojů v určitých ohledech. Jak je znázorněno v tabulce 5., 4 ze 6 sensorů selhávaly pro měření koncentrace oxidu dusičitého NO₂. Počet odstraněných dat pohybující se kolem 50 % a více, poukazuje na problémovost sensorů pro výše zmíněný polutant. Vysoká chybovost dat se objevila i u měření NO (2 sensory s chybovostí nad 80%), dokonce sensor 14 poskytl pouze 3% použitelných dat pro oxid dusnatý. V menší míře problémovosti poskytnutých dat (2 sensory s chybnými daty nad 70%) se pohybovaly sensory při měření koncentrací NO_x. Ještě přijatelněji dopadlo měření ozonu (2 sensory s chybnými daty kolem 60 %). Nejlépe dopadla měření oxidu uhelnatého (průměrně 10 % chybných dat pro všechny sensory) a frakce hrubého aerosolu (průměrně 5 % chybných dat).

6.1 Průměrné hodnoty

Průměrné koncentrace za celé období měření jsou zpracovány pro všechny polutanty ze všech šesti sensorů spolu s daty z referenčních přístrojů. Jak je znázorněno v grafu č. 1., sensory měřily ve třech případech vyšší koncentrace než referenční přístroje a to pro skupiny oxidů dusíku, NO a NO₂. Z grafu č. 2., kde je uvedena průměrná hodnota koncentrace ze všech sensorů dohromady je pak možné odvodit, že sensory měří pro oxidy dusíku průměrně o 77 % vyšší hodnotu koncentrace než referenční přístroj, pro oxid dusnatý se jedná o rozdíl až 94 % a pro oxid dusičitý je koncentrace měřená senzorem vyšší o 80 %. Referenční přístroje pro měření těchto oxidů byly rozmístěny na stejné lokalitě spolu se sensory v lokalitě Ostrava – Poruba, což znamená, že nemůže být brána v potaz rozdílnost hodnot v závislosti na umístění v jiné lokalitě. Dalším polutantem, pro který dva sensory udávaly vyšší průměrnou hodnotu koncentrace je přízemní ozon. Pokud zprůměrujeme hodnoty uvedené v grafu č. 1. pro tento polutant, rozdíl v měření koncentrace už není tak markantní jako u oxidů dusíku (o 12 % vyšší průměrná koncentrace). Pro oxid uhelnatý (CO) a hrubý aerosol (PM₁₀) byly naopak průměrné měřené koncentrace sensory nižší než naměřené referenčními přístroji. Pro oxid uhelnatý sensory měřily o zhruba 50 % nižší koncentrace, a pro hrubý aerosol o 49 %. Takováto rozdílnost v měření může být vysvětlena za prvé nepřesností sensorů, která je předmětem této práce, za druhé rozdílem lokalit umístění přístrojů.



Graf č. 1. Znárodnění rozdílů průměrných koncentrací za celé období 1. 6. 2015 – 7. 9. 2015 mezi referenčními přístroji a jednotlivými sensory. V prázdných místech sensory nebyly schopny poskytnout nad 50 % použitelných dat a byly proto pro jednotlivé polutanty vyřazeny.



Graf č. 2. Znárodnění rozdílů koncentrací za celé období 1. 6. 2015 – 7. 9. 2015 mezi přístroji ČHMÚ a průměrem hodnot sensorů.

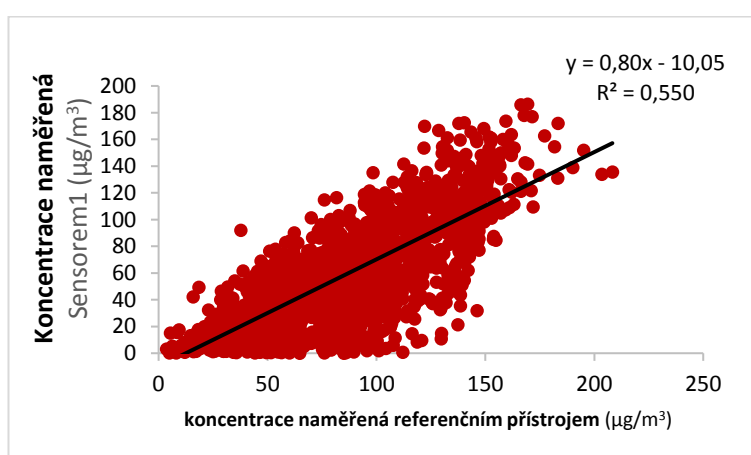
6.2 Korelační diagram

Korelační diagram pracuje s dvěma proměnnými. Na ose X jsou uvedeny koncentrace naměřené referenčními přístroji a na ose Y jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřené sensory. Závislost obou proměnných je vyjádřena regresní přímkou s rovnicí směrnice dané přímkou a svislého posunu, a koeficientem determinace. Koeficient determinace se označuje R^2 a určuje, kolik procent celkové variability dat se dá vysvětlit regresním modelem. Čím více se koeficient blíží k číslu 1, tím lépe model popisuje daná data.

Pro grafické znázornění bodovými grafy byly vybrány sensory, které poskytly reprezentativní data s dostupností alespoň 50 % bezchybných dat a zároveň hodnotu koeficientu determinace nejvíce se blíží k 1. Grafy budou komentovány v posloupnosti O₃, CO, NO_x, NO₂, NO a PM₁₀ spolu s označením sensoru, který byl vybrán pro grafické znázornění. Dle shrnutí grafů, jsou data pro ozon a hrubý aerosol nejlépe korelována a v podkapitole Časový vývoj koeficientu determinace je proto okomentován i vývoj koeficientu determinace v čase.

6.2.1 Ozon

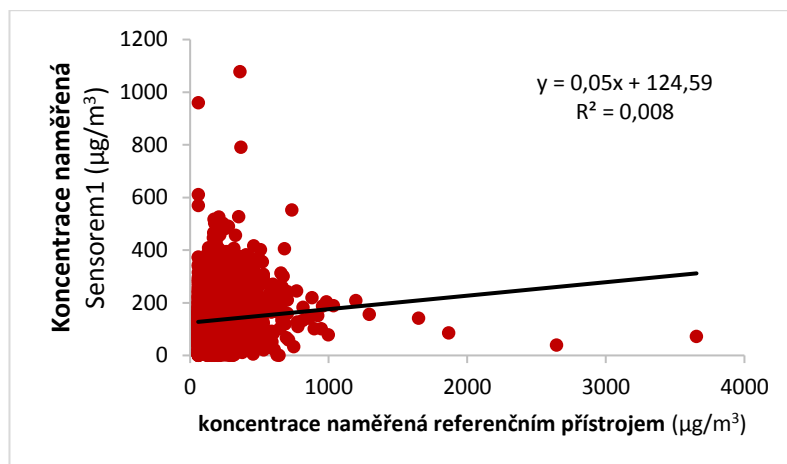
Graf č. 3. znázorňuje závislost hodnot O₃ naměřených sensorem 1 na hodnotách naměřených referenčním přístrojem. V porovnání s ostatními grafy bylo dosaženo nejpříhodnější hodnoty koeficientu determinace ($R^2 = 0,550$). Žádoucí by byla hodnota blíží se číslu 1 co nejvíce, což by poukazovalo na vynikající přesnost poskytnutých dat. Celkové porovnání závislostí ostatních polutantů dopadlo pro přízemní ozon velmi dobře, sensory se drží v blízkosti měřených dat referenčního přístroje a nesehávají v měření tolik jako pro jiné polutanty.



Graf č. 3. Bodový graf znázorňující závislost naměřených koncentrací ozonu ze sensoru 1 na koncentracích naměřených referenčním přístrojem.

6.2.2 Oxid uhelnatý

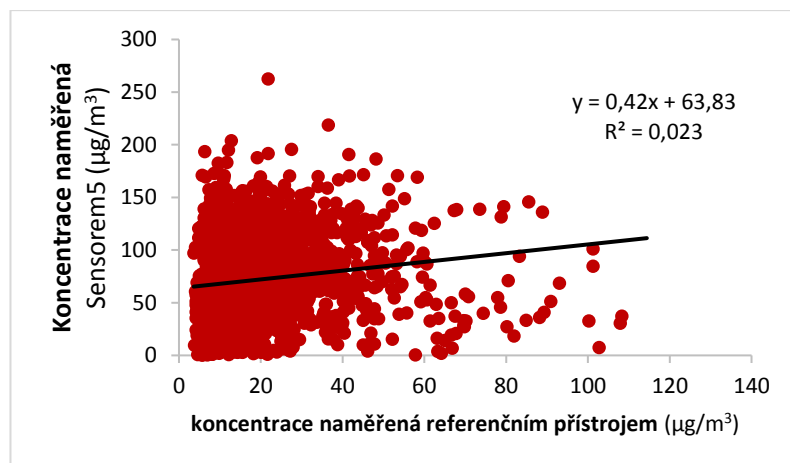
Na grafu č. 4. je znázorněn nejhorší výsledek korelačních diagramů. Data se z daleka neblíží datům z referenčního přístroje a hodnota koeficientu determinace $R^2 = 0,008$ vypovídá o velice nepřesném měření. Sensor měřil 20 x nižší koncentrace než přístroj referenční. Data by mohla být přívětivější, kdyby byl sensor umístěn na stejné lokalitě jako referenční přístroj pro měření CO. Koncentrace oxidu uhelnatého je velmi závislá na okolních zdrojích (lokální topeniště, doprava) a to může být jedním z důvodů neúspěšnosti měření tohoto polutantu.



Graf č. 4. Bodový graf znázorňující závislost naměřených koncentrací oxidu uhelnatého ze sensoru 1 na koncentracích naměřených referenčním přístrojem.

6.2.3 Oxidy dusíku

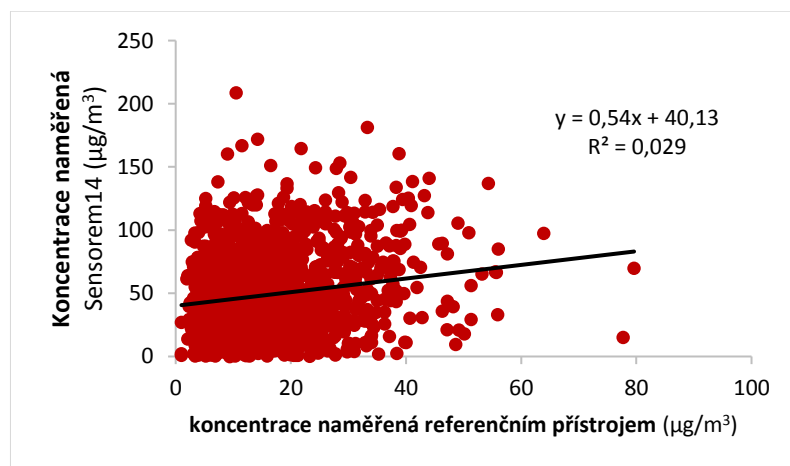
Porovnání znázorněné na grafu č. 5. poukazuje na další nepřesné měření sensory. Z toho, co jsme už zjistili i z průměrných celkových koncentrací, by se dal odvodit závěr, že sensory celkově selhaly při monitoringu koncentrací veškerých oxidů dusíku, už jen proto, že byly umístěny spolu s referenčními na stejné lokaci a není důvod, proč by se naměřené koncentrace měly markantně lišit od referenčních dat. Přesto je hodnota koeficientu determinace velmi vzdálena od hodnoty poukazující na slibné měření koncentrace ($R^2 = 1$).



Graf č. 5. Bodový graf znázorňující závislost naměřených koncentrací oxidů dusíku ze sensoru 5 na koncentracích naměřených referenčním přístrojem.

6.2.4 Oxid dusičitý

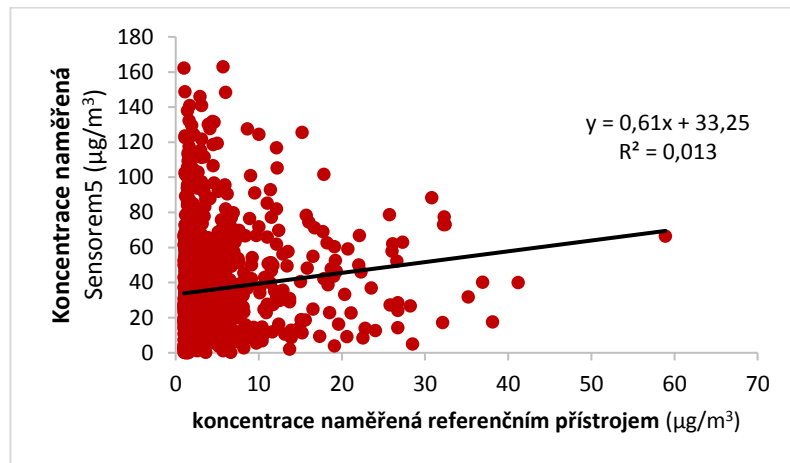
Data pro oxid dusičitý byla problémová ze všech sensorů již při výběru dat pro zpracování. Tři ze šesti sensorů poskytli více než 50 % chybných dat a spolu s dalším senzorem s blízkým se 50 % (48 % chybných dat), poukazují na velké selhání sensorů při měření tohoto polutantu. Z grafu č. 6. a jeho koeficientu determinace $R^2 = 0,029$ můžeme potvrdit nedostatečnou přesnost měření NO_2 oproti referenčnímu přístroji.



Graf č. 6. Bodový graf znázorňující závislost naměřených koncentrací oxidu dusičitého ze sensoru 14 na koncentracích naměřených referenčním přístrojem.

6.2.5 Oxid dusnatý

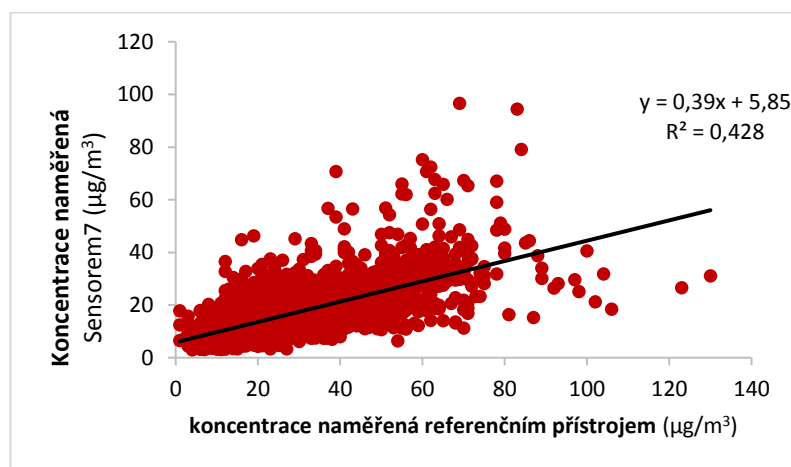
Graf č. 7. zobrazuje koeficientu determinace $R^2 = 0,013$, která se nejvíce blíží nule z diagramů oxidů dusíku a poukazuje na selhání sensoru pro měření NO. Sensory udávaly i 14x vyšší koncentrace, než byly naměřeny referenčním přístrojem.



Graf č. 7. Bodový graf znázorňující závislost naměřených koncentrací oxidu dusnatého ze sensoru 5 na koncentracích naměřených referenčním přístrojem.

6.2.6 Hrubý aerosol

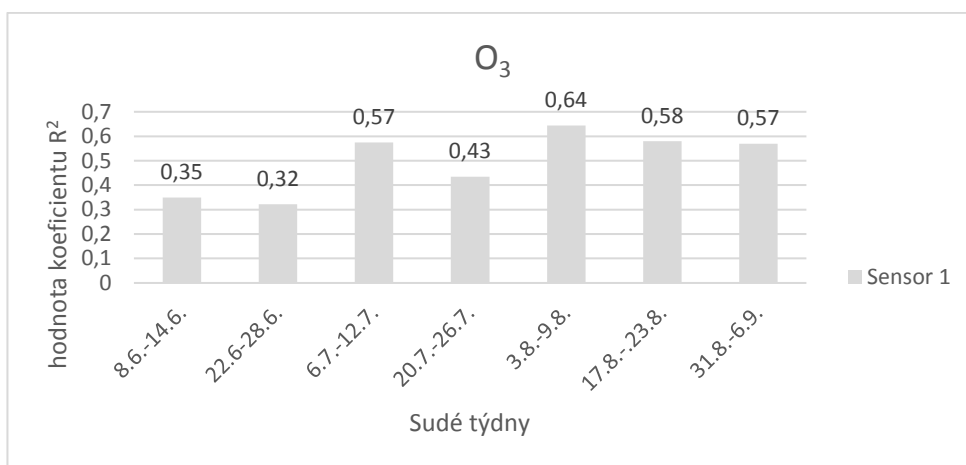
Bodový graf č. 8. zobrazuje již mnohem přesnější data sensoru v závislosti na referenčním přístroji. Stále data nejsou tak příhodná, aby byl výsledek jednoznačně poukazující na přesnost sensoru, ale koeficientu determinace $R^2 = 0,428$ řadí sensor na místo druhého nejpresnějšího sensoru v rámci této práce.



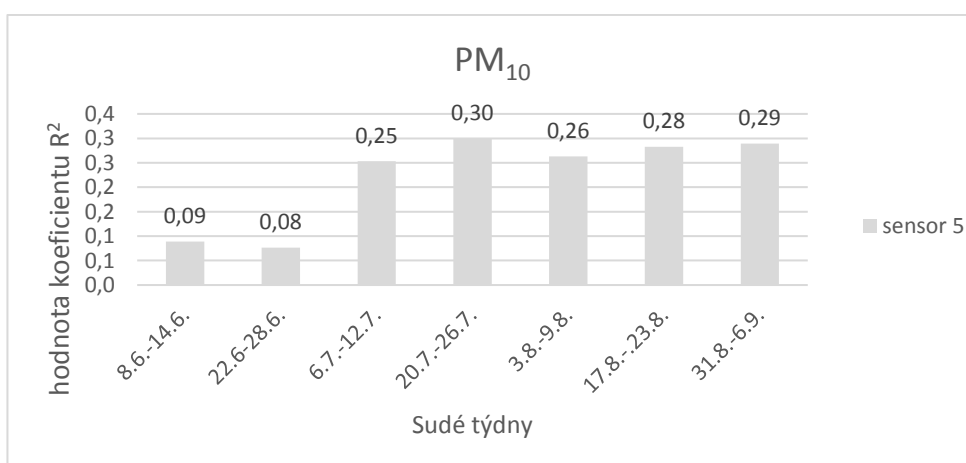
Graf č. 8. Bodový graf znázorňující závislost naměřených koncentrací hrubého aerosolu ze sensoru 7 na koncentracích naměřených referenčním přístrojem.

6.2.7 Časový vývoj koeficientu determinace

Pro toto grafické znázornění byla použita perioda sudých týdnů z důvodu chybějícího úseku dat v období od 14. 6. 2015 – 19. 6. 2015, kdy by bylo nemožné použít chybějící data a perioda by nebyla kompletní. Pokud se podíváme na změny v hodnotě R^2 v průběhu měření u sensorů, které považujeme za úspěšnější při poskytování naměřených dat (ozon, PM_{10}), na grafu č. 9. pro přízemní ozon a na grafu č. 10. pro hrubé aerosolové částice zjistíme, že pro ozon a pro frakci hrubého aerosolu hodnota koeficientu determinace roste s časem a později se stává konstantní. To je spojeno hlavně s postupnou adaptací sensoru na okolní podmínky. Z počátku si přístroj musí zvyknout na průměrnou vlhkost, teplotu a okolní tlak během periody měření. S postupem času tak přístroj získává i vyšší přesnost.



Graf č. 9. Průběh hladiny spolehlivosti v periodě sudých týdnů periody měření pro přízemní ozon



Graf č. 10. Průběh hladiny spolehlivosti v periodě sudých týdnů periody měření pro hrubou frakci aerosolu

V tabulce č. 6. jsou uvedeny, pro porovnání mezi sensory samotnými, hodnoty koeficientu determinace. Pokud se blíže podíváme například na hodnoty koeficientu u sensorů měřících oxid uhelnatý, zjistíme, že všechny sensory jsou velmi nepřesné a koeficient determinace se blíží spíše k nule než k jedničce. Hodnoty koeficientu se u oxidů dusíku a oxidu dusnatého mění o desetinné místo, které s ohledem na ostatní výsledky může být zanedbatelné. Na druhou stranu u ozonu se hodnota koeficientu drží blízko 0,6. Jednotlivé změny jsou závislé na jiných koncentracích v okolí sensorů, které nebyly umístěny v blízkosti referenčního přístroje měřícího koncentrace ozonu. To samé se dá říci i o hodnotách koeficientu determinace u hrubého aerosolu. Odlišnosti v naměřených koncentracích jsou hůře porovnatelné z důvodu různého umístění referenčních přístrojů a sensorů.

| | Koeficient determinace | | | | | |
|-----------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | O3 | CO | NOx | NO2 | NO | PM10 |
| sensor 1 | 0,550 | 0,008 | 0,003 | - | 0,021 | 0,372 |
| sensor 3 | - | 0,004 | - | - | 0,003 | 0,297 |
| sensor 5 | 0,511 | 0,004 | 0,024 | 0,024 | 0,013 | 0,366 |
| sensor 7 | 0,665 | 0,007 | 0,013 | - | 0,003 | 0,428 |
| sensor 9 | - | 0,005 | 0,001 | 0,015 | - | 0,256 |
| sensor 14 | 0,630 | 0,006 | - | 0,029 | - | 0,401 |

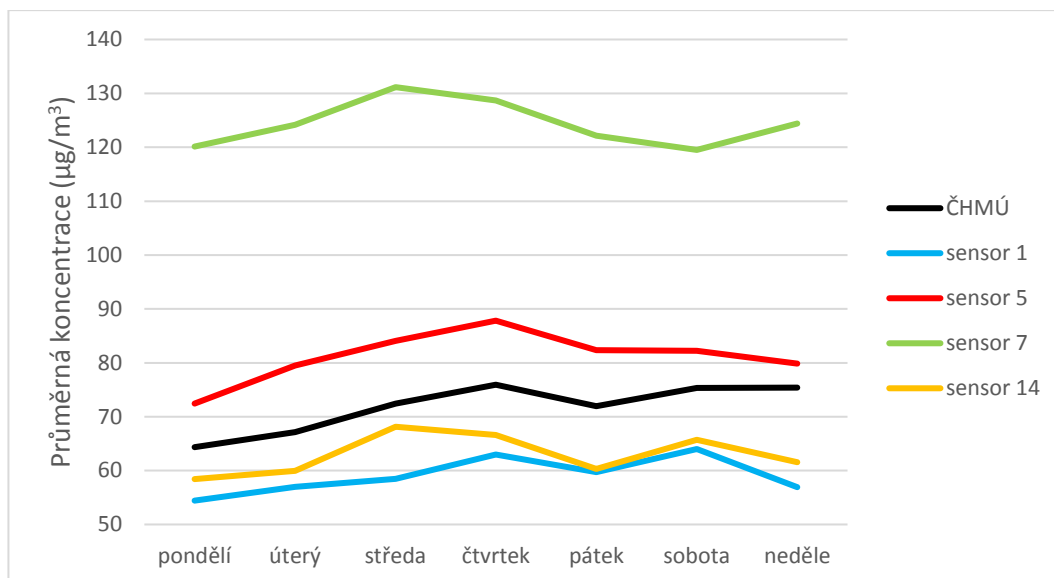
Tab. č. 6. Souhrn koeficientu determinace pro všechny sensory v závislosti na referenčních přístrojích pro hodnoty nad 50 % použitelných dat.

6.3 Týdenní chod

K porovnání týdenních chodů jsou vypracovány grafy ze všech sensorů a hodnot, které měli nad 50% správných dat. Předpokládáme, že chod jednotlivých polutantů se bude v závislosti na fungování jejich zdrojů během týdne měnit, například snížením emisí oxidů dusíku kolem víkendu a opětovného zvýšení v pátek a přes týden.

6.3.1 Ozon

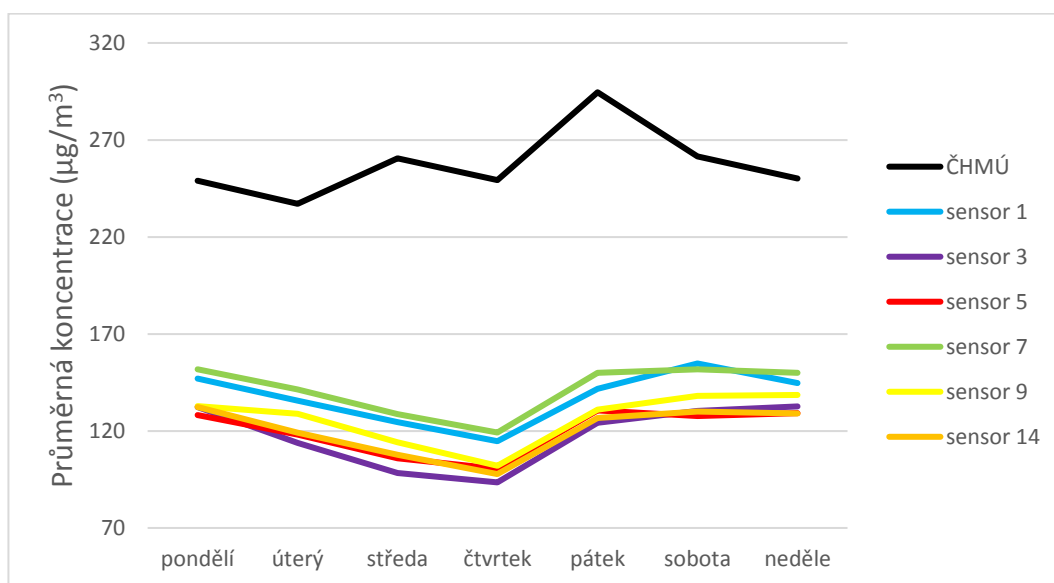
Graf č. 11. znázorňuje týdenní chod přízemního ozonu. Podle znázornění na grafu č. 1. již předpokládáme, že 2 sensory naměřily koncentrace vyšší a dva sensory nižší. Hodnota průměrných koncentrací roste v týdnu s poklesem v pátek. Růst i pokles se dá vysvětlit rovnicí vzniku a propadu troposférického ozonu, která byla uvedena v kapitole ozon (3.2.). Ozon reaguje s volným atomem kyslíku poskytnutým oxidem dusičitým, který vzniká při automobilové dopravě, která je intenzivnější během pracovního týdne.



Graf č. 11. Průběh průměrné koncentrace ozonu během týdne.

6.3.2 Oxid uhelnatý

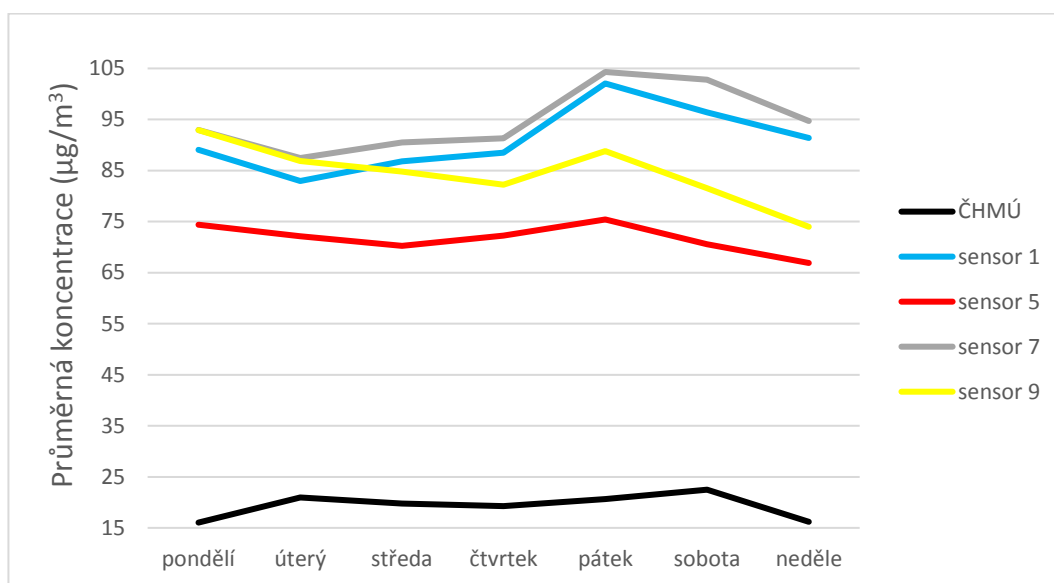
Na grafu č. 12. lze vidět podobný průběh průměrných koncentrací naměřených sensory a referenčním přístrojem během týdne, nicméně rozdíl v měřených koncentracích je celkem vysoký. Křivka stoupá v pátek, kdy je předpokládána vyšší hustota dopravy, kdy na víkend lidé hromadně opouští město. Sensory tuto křivku kopírují a žádný z nich nevykazuje výrazný výkyv, jak můžeme vidět na grafech jiných polutantů. Až na nepřesnost, která by se dala vyřešit výpočtem a aplikací korekčního faktoru sensory slušně obstály při monitoringu oxidu uhelnatého.



Graf č. 12. Průběh průměrné koncentrace oxidu uhelnatého během týdne.

6.3.3 Oxidy dusíku

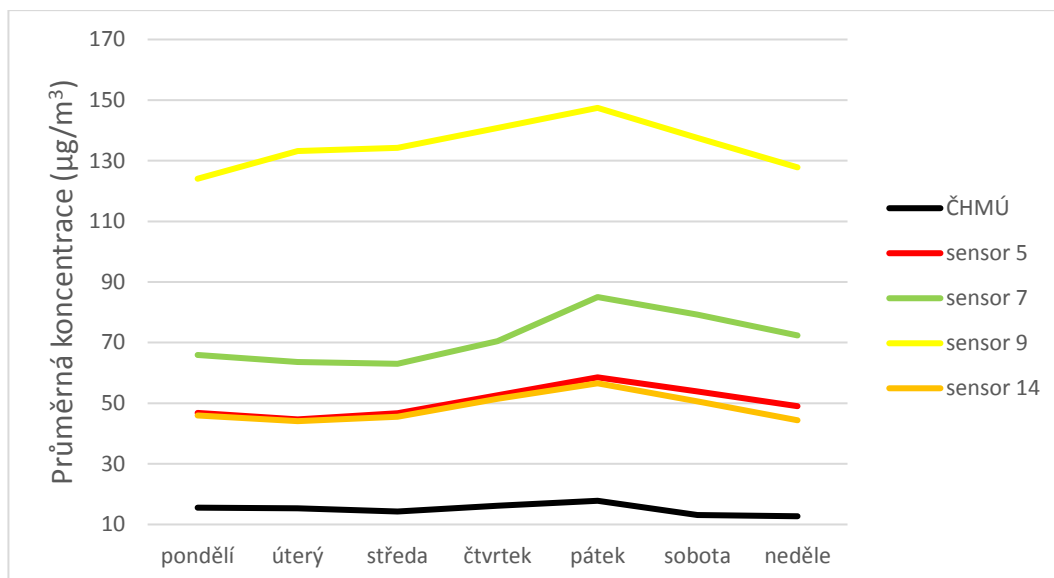
Průběh průměrné koncentrace oxidů dusíku na grafu č. 13. Začátkem týdne a v pátek je v ovzduší více oxidů dusíku z důvodu nárůstu automobilové dopravy. Hodnoty koncentrací klesají kolem víkendu, kdy doprava není tak intenzivní. Sensory tento pokles s menšími nepřesnostmi zaznamenaly. Referenční přístroj zaznamenal vzrůst začátkem týdne, kdy sensory zaznamenávaly spíše pokles koncentrace s postupným zvýšením až během týdne.



Graf č. 13. Průběh průměrné koncentrace oxidů dusíku během týdne.

6.3.4 Oxid dusičitý

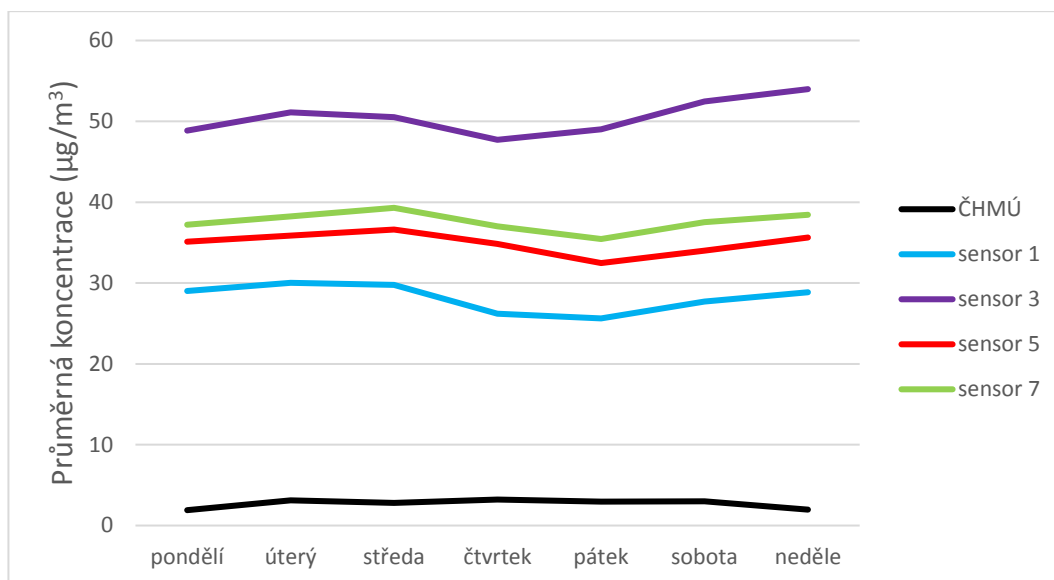
Znázornění grafu č. 14. poukazuje na podobný průběh během týdne jako pro oxidy dusíku s nárůstem automobilové dopravy během pátku, jak již bylo uvedeno výše. Referenční přístroj naměřil nárůst koncentrace v páteční den a sensory tento nárůst taktéž úspěšně zaznamenaly. Sensor 9 naměřil koncentraci mnohokrát vyšší, což je zaznamenáno i při grafickém znázornění denního cyklu oxidu dusičitého. Nicméně sensor 9 zaznamenal zvýšení koncentrace tak jako ostatní sensory během pátečního dne.



Graf č. 14. Průběh průměrné koncentrace oxidu dusičitého během týdne.

6.3.5 Oxid dusnatý

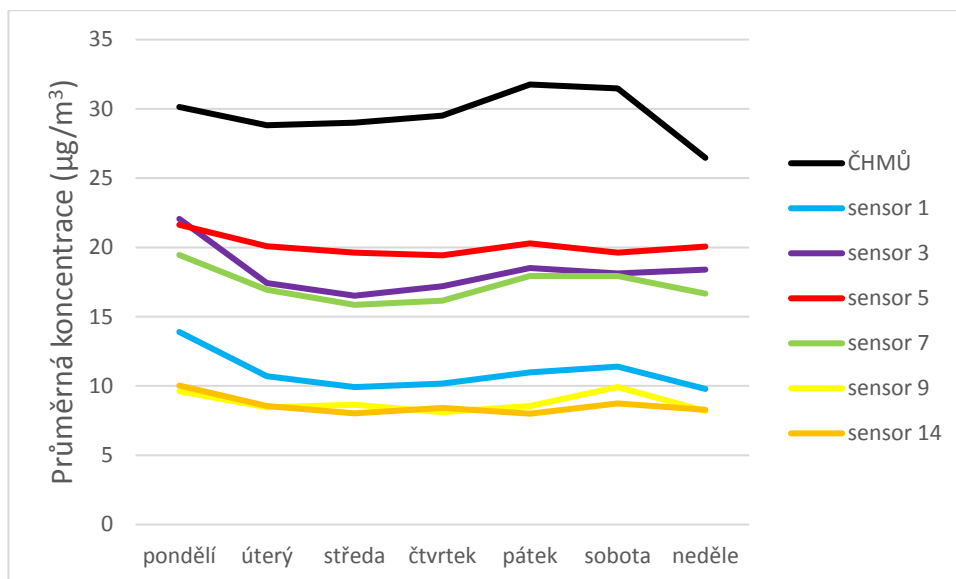
Křivky oxidu dusnatého podle grafu č. 15. nezaznamenaly markantní výkyvy v průměrných koncentracích během týdne. Pozorujeme lehký nárůst během začátku týdne, což znázorňují jak křivky sensorů. Tak i referenčního přístroje. Sensory ale uvádí vyšší koncentrace koncem týdne na rozdíl od referenčního přístroje, který zaznamenal pokles.



Graf č. 15. Průběh průměrné koncentrace oxidu dusnatého během týdne.

6.3.6 Hrubý aerosol

Jak je znázorněno na grafu č. 16., sensory měřily mnohem nižší koncentrace hrubého aerosolu s nárůstem během začátku týdne a poklesem ke konci. Kromě konstantního vypouštění aerosolů při průmyslovém provozu, jsou aerosoly vířeny i při automobilové dopravě, která koncem týdne klesá. Sensory se rozdělily do dvou skupin po třech, které měřily podobné koncentrace. Rozdílnost koncentrací těchto dvou skupin může být vysvětlena umístěním sensorů blíže k sobě a umístěním jedné trojice blíže k dopravní cestě.



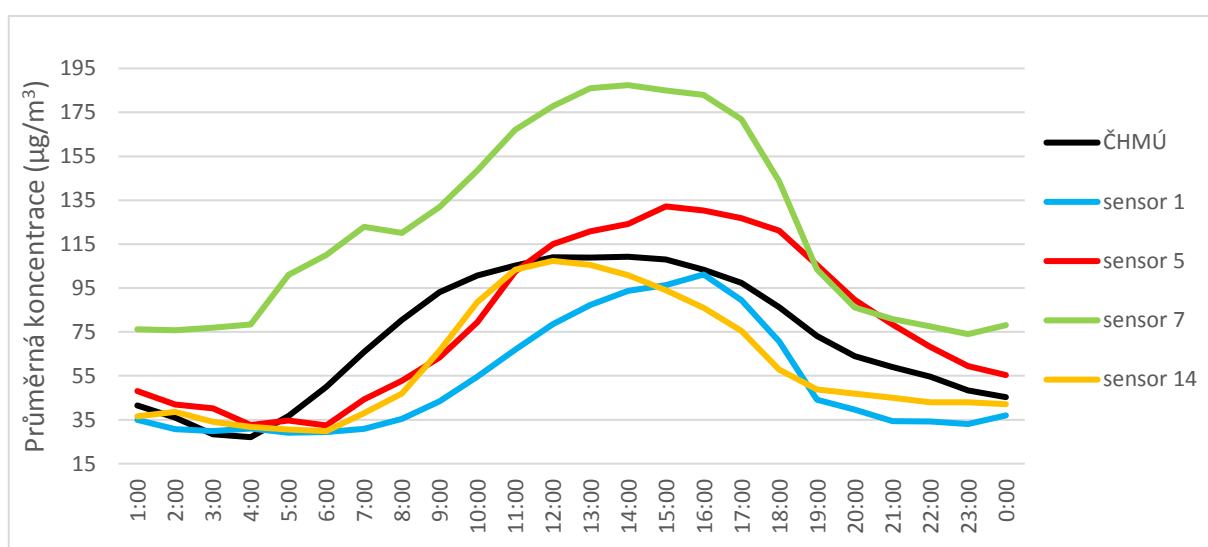
Graf č. 16. Průběh průměrné koncentrace hrubého aerosolu během týdne.

6.4 Denní cykly

Pro zhodnocení denních cyklů jsou v grafech znázorněny všechny sensory s více než 50 % použitelných dat a průměrné koncentrace polutantů. Jednotlivé polutanty mají různé denní chody: koncentrace ozonu roste během dne a dosahuje maxima kolem poledne, kdy je množství dopadajícího slunečního záření nejvyšší, koncentrace oxidu uhelnatého roste v ranních hodinách a později v odpoledních hodinách, denní křivka oxidů dusíku roste během rána a taktéž v odpoledních hodinách. Pokud se podíváme na křivky jednotlivých polutantů, můžeme vyvodit závěr, že se objevují úzké vztahy mezi koncentracemi ozonu a oxidů dusíku (He et al., 2017). Pomocí grafického znázornění níže porovnáme, zda sensory kopírují křivky denních chodů z referenčních přístrojů.

6.4.1 Ozon

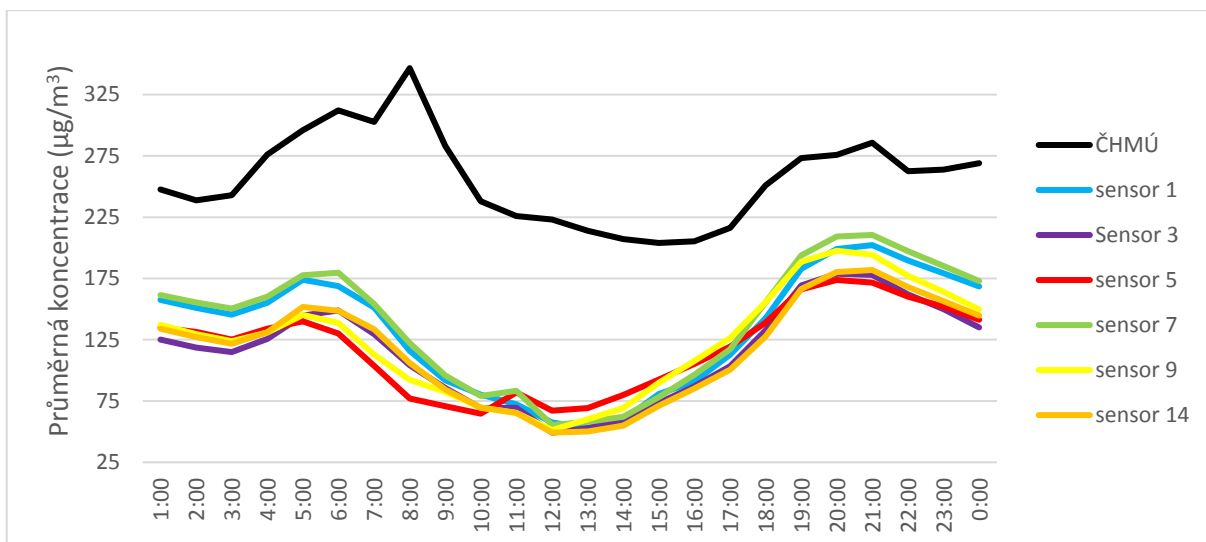
Denní cyklus ozonu je znázorněn grafem č. 17., kde referenční přístroj ČHMÚ naměřil typický průběh koncentrace přízemního ozonu během dne. Koncentrace ozonu roste v závislosti na příkonu dopadajícího záření, s maximem kolem poledne, kdy je nejvyšší množství dopadajícího záření na zemský povrch, což vede i ke vzniku troposférického ozonu (viz rovnice 1.-3. v kapitole ozon 3.2.). Sensory dobře kopírují křivku referenčního přístroje (sensor 14 se hodnotami i maximem velmi blíží), ale s jistým časovým zpožděním s maximem v 14:00-15:00 hodin.



Graf č. 17. Průběh průměrné koncentrace během dne pro ozon.

6.4.2 Oxid uhelnatý

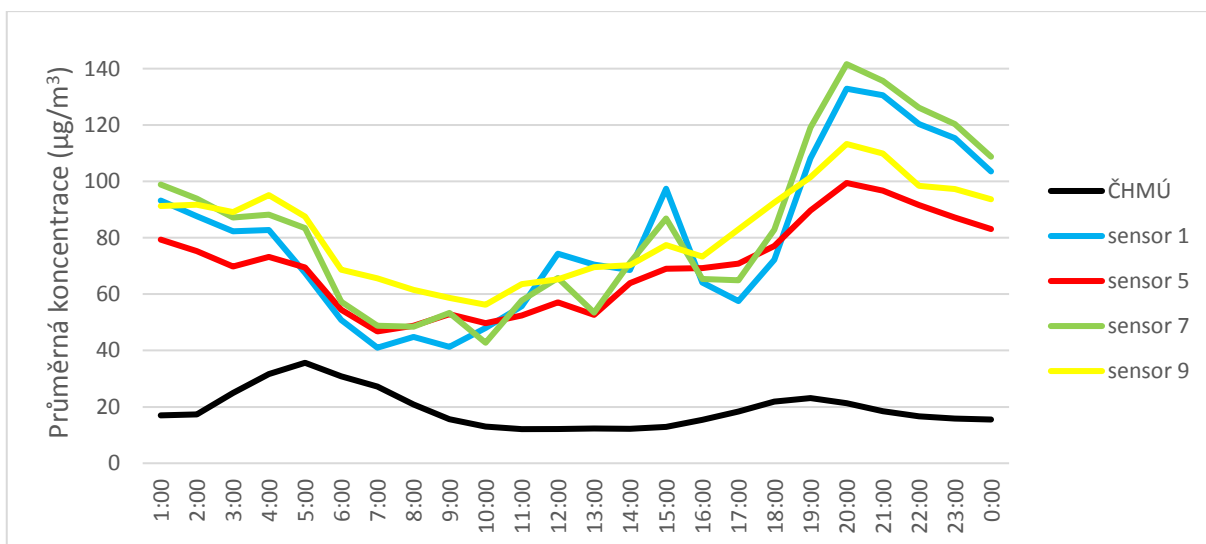
Průběh koncentrace oxidu uhelnatého měřené sensory na grafu č. 18., kopíruje křivku denního průběhu z referenčního přístroje ČHMÚ. Zvýšení koncentrací od 5:00 ráno a od 16:00 hod odpoledne odpovídá době přepravy automobilovou dopravou obyvatel do práce a z práce. Koncentrace naměřené sensory je ale nižší i když byly sensory umístěny v bezprostřední blízkosti dálnice D1. Data všech sensorů se ale jeví s minimálním rozdílem, a navrženým řešením pro korekci dat by bylo použití korekčního faktoru.



Graf č. 18. Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxid uhelnatý.

6.4.3 Oxidy dusíku

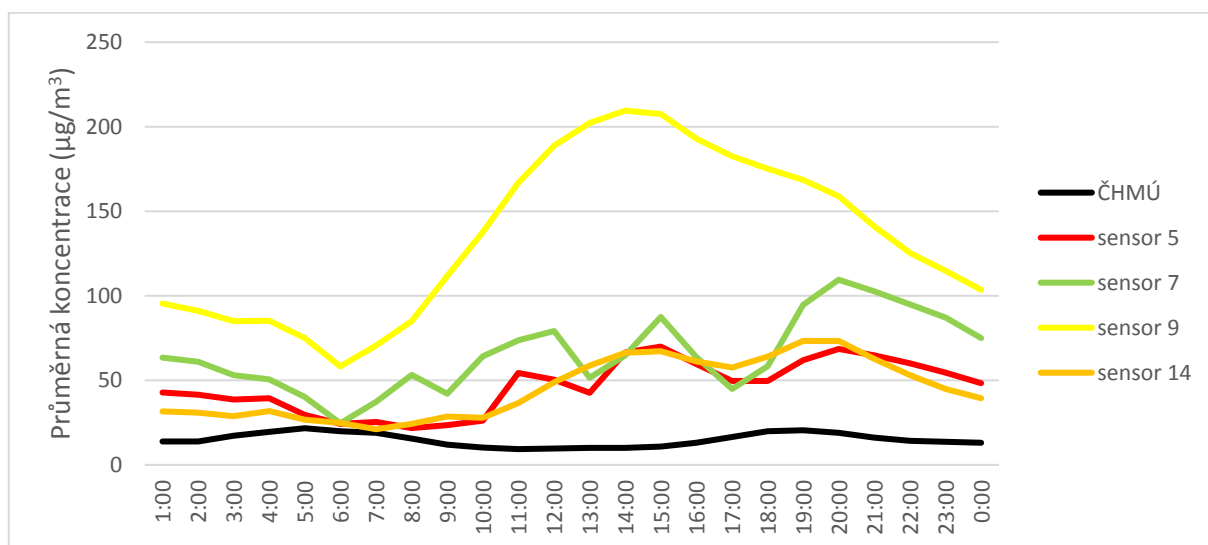
Znárodnění průběhu koncentrací sensorů a referenčního přístroje na grafu č. 19. je rozdílné. Sensory měřily koncentrace s výraznějšími výkyvy oxidů dusíku oproti referenčnímu přístroji, který zaznamenal pouze jemné zvýšení v ranních a odpoledních hodinách. Změny v koncentracích oxidů dusíku jsou spjaty s automobilovou dopravou a denním chodem koncentrace přízemního ozonu.



Graf č. 19. Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxidy dusíku.

6.4.4 Oxid dusičitý

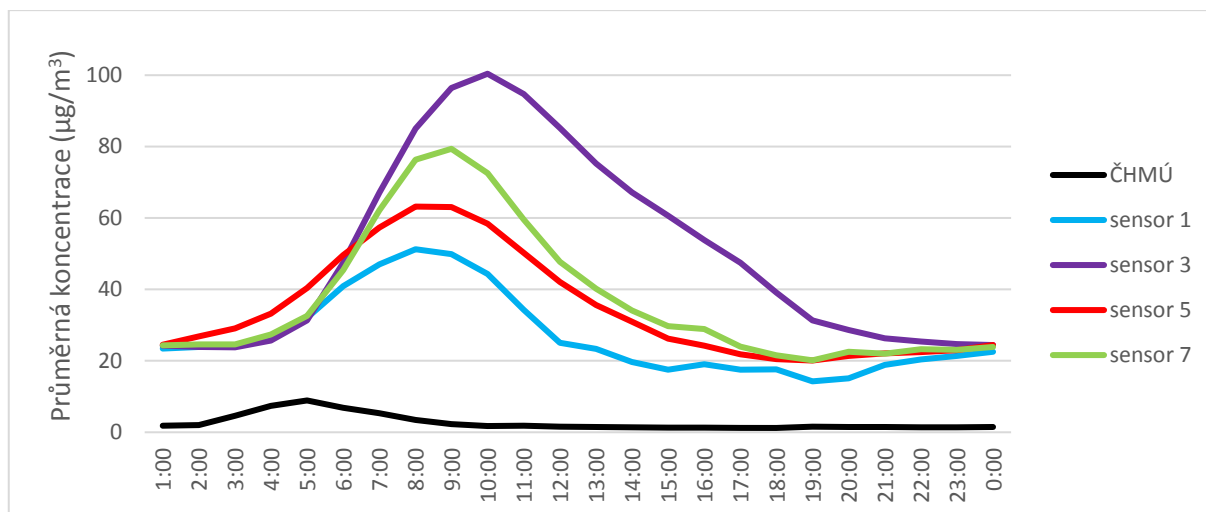
Zvýšení koncentrace oxidu dusičitého na grafu č. 20., je spojena kromě zvýšené dopravy také s reakcemi vzniku přízemního ozonu. Ten reaguje s oxidem dusnatým (rovnice č. 3.), který se z atmosféry odebírá, za vzniku právě oxidu dusičitého, jehož koncentrace roste ve chvílích, kdy koncentrace ozonu je nízká. Sensor č. 9. zaznamenal od 8 hod ráno z neznámého důvodu rapidní růst koncentrace a jelikož ostatní sensory takovou změnu nezaznamenaly, je měření vyhodnoceno jako chybné.



Graf č. 20. Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxid dusičitý.

6.4.5 Oxid dusnatý

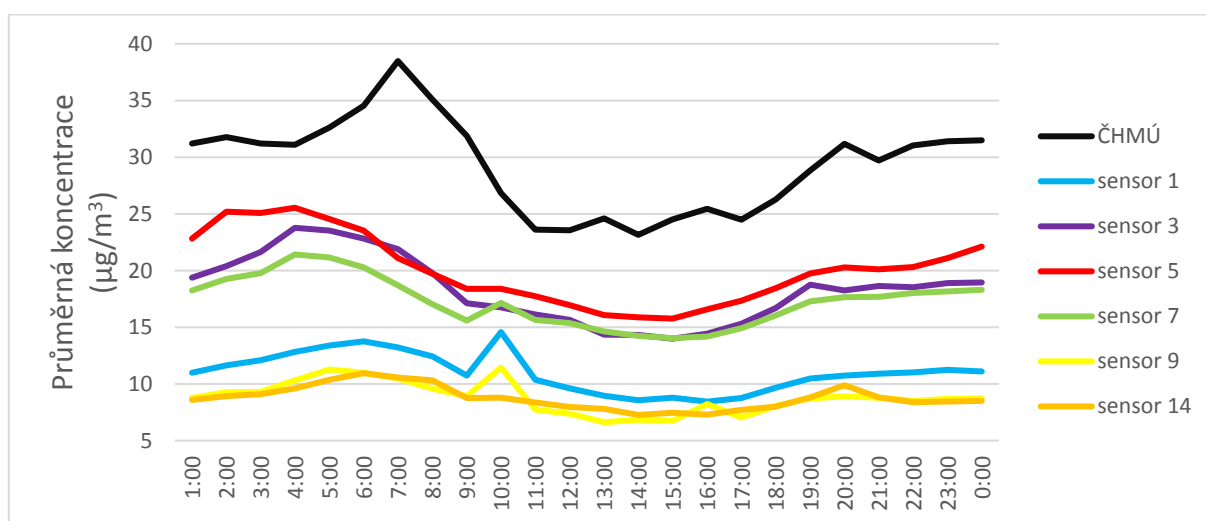
Na grafu č. 21. je znázorněno zvýšení koncentrace oxidu dusnatého. Referenční přístroj zaznamenal lehký vzrůst v ranních hodinách, přičemž sensory tento růst zaznamenaly s mnohem větším rozdílem. Vzrůst koncentrace tohoto oxidu lze spojit s ranní automobilovou dopravou, přičemž v odpoledních hodinách je oxid dusnatý odebírán z atmosféry reakcí s ozonem, jehož koncentrace přes den roste a v maximu ozonu kolem poledne křivka klesá, jak reaguje s oxidem dusnatým za vzniku oxidu dusičitého.



Graf č. 21. Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxid dusnatý.

6.4.6 Hrubý aerosol

Graf č. 22. znázorňuje průběh koncentrace hrubého aerosolu během dne. Prach se víří v závislosti na pohybu automobilových vozidel od 5:00 hodiny ráno, kdy se přepravují obyvatelé do zaměstnání a také v odpoledních hodinách, kdy je cesta obyvatel opačná. Sensory se podle grafického znázornění dají rozdělit do dvou trojic, které kopírují, ač s nižšími naměřenými koncentracemi, křivku měřenou referenčním přístrojem. V každé trojici uvádějí podobné koncentrace a žádný nevykazuje zřetelné oddělení od křivky referenčního přístroje. Důvodem pro rozdělení na dvě trojice vykazující podobné hodnoty by mohlo být umístění přístrojů jedné skupiny blíže a druhé dále od komunikace. Hrubý aerosol je těžký a rychleji tak klesá po zviření, což by znamenalo, že méně částic se dostane k druhé skupině dále umístěných sensorů. Rozdíl mezi koncentracemi s referenčním přístrojem může být vysvětlen rozdílnou lokalitou umístění přístrojů a tedy jinými okolními podmínkami.



Graf č. 22. Průběh průměrné koncentrace během dne pro frakci hrubého aerosolu.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala představením nových měřicích sensorů typu AQ-Mesh pro monitorování kvality ovzduší a především porovnáním výstupních dat z těchto přístrojů s daty z referenčních přístrojů poskytnutými ČHMÚ ve stejném období. Cílem bylo zhodnotit, jak sensory reálně pracují v terénu, což bylo graficky znázorněno grafy pro různé časové úseky a okomentovat odlišnosti dat od výstupu z referenčních přístrojů.

Na základě zpracování dat bylo zjištěno, že přístroje, ač prezentované výrobcem jako velmi přesné, nedosahovaly avizovaných výsledků. Sensory z velké části měli problémy při poskytování spolehlivých dat pro oxidy dusíku celkově (NO_x) i pro oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂). Data pro tyto polutanty se vyznačovala nejvyšší problémovostí s průměrně 36 % chybných dat pro NO, 46 % chybných dat pro NO₂ a 45 % chybných dat pro NO_x. Za poskytnutými chybnými daty oxidů dusíku, se umístilo i měření koncentrací přízemního ozonu s průměrně 32 % poskytnutých chybných dat. Průměrný počet chybných dat pro CO nepřesáhl 10 %. Pro frakci hrubého aerosolu PM₁₀, data byla téměř kompletní, bez nutnosti úpravy a data ze všech sensorů byla použitelná pro vyhodnocení. Pouze 5 % chybějících dat z důvodu výpadku přístroje.

Problémy s poskytnutím nepoužitelných dat u ozonu ale byly vykompenzovány přesností dat $R^2 = 0,55$, což byla nejvyšší dosažená přesnost měření pro všechny porovnávané sensory. Sensory také zvládly úspěšně měření koncentrací frakce aerosolových částic s druhou nejvyšší přesností modelu $R^2 = 0,43$. Pro ostatní polutanty modely korelačních diagramů nedopadly podle očekávání a výsledky se nedají nazvat reprezentativními.

Při posouzení týdenních cyklů sensory až na malé výjimky, úspěšně kopírovaly křivky z referenčních přístrojů. Touto výjimkou bylo měření oxidu dusnatého, kdy sensory měřily nárůst koncentrace během víkendu, zatímco referenční přístroj měřil opačný průběh. Výkyvy v koncentracích během týdne odpovídaly těm z referenčních přístrojů jen s rozdílem uvedených hodnot koncentrací. Problém by mohl být vyřešen aplikací korekčních faktorů pro jednotlivé polutanty.

Pokud zhodnotíme výstup denních cyklů, tak sensory si nevedly vůbec špatně. Problémem byla spíše rozdílná hodnota dat ze sensorů (u oxidu uhelnatého až o polovinu nižší hodnoty koncentrací), ale znázorněné křivky až na malé výjimky kopírovaly data poskytnuta

referenčním přístrojem, což by mohlo být eliminováno řádnou kalibrací a aplikováním korekčních faktorů stejně jak bylo navrženo výše.

Z výše uvedených výsledků plyne závěr, že přístroje by byly vhodné pro měření polutantů ve městech po řádné aplikaci korekčních faktorů a řádné kalibrace. Mimo jiné data pro frakci jemného aerosolu ($PM_{2,5}$) bohužel nebyla ČHMÚ poskytnuta, ale výsledky pro frakci hrubého aerosolu poukazují na možnost podobné kvality monitoringu i této frakce. Jak již bylo řečeno výše, kde byla obecně popsána problematika nízkorozpočtových přístrojů, nejde tolik o kvalitu poskytnutých dat, ale o větší pokrytí plochy a určení problematických zdrojů, kdy data nemusí být tak přesná jako z referenčních přístrojů. Výrobce přístrojů AQMesh nabízí možnost výběru kombinace měření polutantů dle přání klienta. Pokud by se sensor zaměřil více na monitorování potřebných polutantů v závislosti na okolních zdrojích, mohla by se na úkor odstraněných snímačů a jejich příslušenství zvýšit přesnost měření pro žádoucí polutanty.

Data poskytnutá pro tuto práci mají mnoho dalších možných způsobů podrobnějšího zpracování do budoucna. Mimo jiné například závislost poskytnutých dat na okolních podmínkách (vlhkost, teplota, rychlost větru), které byly poskytnuty spolu s daty koncentrací. Výpočet a aplikace korekčních faktorů pro jednotlivé polutanty. Také příhodnější umístění sensorů spolu s referenčními přístroji by bylo zajímavé pro zpracování a porovnání se stávajícími daty.

8. Literatura

201/2012 Sb. Zákon ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší ve znění zákona č. 64/2014 Sb. a zákona č. 87/2014 Sb.

Al Barakeh Zaher, Philippe Breuil, Nathalie Redon, Christophe Pijolat, Nadine Locoge, Jean-Paul Viricelle *Development of a normalized multi-sensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection* Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 241, 31 March 2017, Pages 1235-1243

Armenta S., M. de la Guardia *Comprehensive Analytical Chemistry*, Volume 73, 2016, Pages 27-44

Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen et al. *Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project*. Lancet 383, Pages 785-795.

Braniš Martin, Iva Hůnová (za kolektiv autorů) *Atmosféra a klima Atmosféra a klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší* Rok vydání: 2009 Nakladatelství Karolinum Počet stran: 352 ISBN: 978-80-246-1598-1

Castell Nuria, Franck R. Dauge, Philipp Schneider, Matthias Vogt, Uri Lerner, Barak Fishbain, David Broday, Alena Bartonova *Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?* Environment International, 2016 Pages 293-302

Coskun Mucahit *Fundamental pollutants in the European Union (EU) countries and their effects on Turkey* Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 19, 2011, Pages 467-473

Degraeuwe Bart, Thunis Philippe, Clappier Alain, Weiss Martin, Lefebvre Wouter, Janssen Stijn, Stijn Vranckx *Atmospheric Environment*, Volume 126, February 2016, Pages 218-224

Gao Meiling, Junji Cao, Edmund Seto *A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM2.5 in Xi'an, China* Environmental Pollution, Volume 199, April 2015, Pages 56-65

He Hong-di, Zhong-xia Qiao, Wei Pan, Wei-Zhen Lu, *Multiscale multifractal properties between ground-level ozone and its precursors in rural area in Hong Kong* Journal of Environmental Management Volume 196, 11 March 2017, Pages 270–277

Hůnová Iva, Svatava Janoušková, *Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší*, Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum, Praha 2004

Krupa Sagar V., William J. Manning *Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation*, Environmental Pollution, Available online 25 June 2003. Pages 101-137

- Kulmala Markku, Jenni Kontkanen, Heikki Junninen, *Direct Observations of Atmospheric Aerosol Nucleation Science* 339 (2013); Page 943
- Kumar Prashant, Morawska Lidia, Martani Claudio, Biskos George, Neophytou Marina, Silvana Di Sabatino, Margaret Bell, Leslie Norford, Rex Britter *The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities Environment International* 75 (2015) Pages 199-205
- Lim, S.S. on behalf of the GBD 2010 Comparative Risk Assessment Group, *A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. Lancet* 380, Pages 2224–2260.
- Maznová Jana, Hůnová Iva, Ondřej Vlček, Helena Hnilicová *Zlepšení metod hodnocení znečištění ovzduší částicemi PM₁₀ na území České republiky Český hydrometeorologický ústav, Praha, ochrana ovzduší*, 2/2009
- Nagao Saori , Kazuaki Taguchi, Hiromi Sakai, Ryota Tanaka, Hirohisa Horinouchi, Hiroshi Watanabe *Carbon monoxide-bound hemoglobin-vesicles for the treatment of bleomycin-induced pulmonary fibrosis Biomaterials* Volume 35, Issue 24, August 2014, Pages 6553–6562
- Plaisance, H., Piechocki-Minguy, A., Garcia-Fouque, S., Galloo, J.C., 2004. *Influence of meteorological factors on the NO₂ measurements by passive diffusion tube. Atmos. Environ.* 38, Pages 573–580.
- Pokorná P., J. Hovorka, M. Klán, P.K. Hopke *Source apportionment of size resolved particulate matter at a European air pollution hot spot Science of The Total Environment*, Volume 502, 1 January 2015, Pages 172-183
- Pokorná Petra, Hovorka Jan, Philip K. Hopke *Elemental composition and source identification of very fine aerosol particles in a European air pollution hot-spot Atmospheric Pollution Research* 7 (2016), Pages 671-679
- Lafuente Rafael , Núria García-Blàquez, Bénédicte Jacquemin, Miguel Angel Checa, *Outdoor air pollution and sperm quality* Volume 106, Issue 4, 15 September 2016, Pages 880–896
- Rivera Claudia, Wolfgang Stremme, Hugo Barrera, Martina M. Friedrich, Michel Grutter, Jose Garcia-Yee, Ricardo Torres-Jardon, Luis Gerardo Ruiz-Suarez *Spatial distribution and transport patterns of NO₂ in the Tijuana - San Diego area Atmospheric Pollution Research*, Volume 6, Issue 2, March 2015, Pages 230-238
- Sillman Sanford *The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments Atmospheric Environment* Volume 33, Issue 12, 1 June 1999, Pages 1821-1845

Vossler Teri, Cernikovský Libor, Novák Jiri, Plachá Helena, Krejčí Blanka, Nikolová Irina, Chalupnicková Eva, Williams Ronald *An investigation of local and regional sources of fine particulate matter in Ostrava, the Czech Republic* Atmospheric Pollution Research, Volume 6, Issue 3, May 2015, Pages 454-463

Waldhauserová Pavla *Když ozon škodí, aneb je v našich horách zdravo?* Publikováno: Vesmír 87, 840, 2008/12

Elektronické zdroje:

Cambridge Enterprise, University of Cambridge, *AQMesh: new sensors offer a clearer picture of urban air quality* [Cit. 25. 2. 2017] dostupné na

<https://www.enterprise.cam.ac.uk/case-studies/breathe-deep-new-sensors-offer-a-clearer-picture-of-urban-air-quality/>

Environmental Instruments Ltd *Operating manual mk2 & mk3 pods* [Cit. 23. 3. 2017] dostupné na <http://www.aqmesh.com/support/resources/>

Rozloha Ostravy [Cit. 28. 12. 2016] dostupné na <https://www.ostrava.cz/cs/o-meste>

Obyvatelstvo Ostravy, Lukša Lukáš [Cit. 15. 1. 2017] dostupné na

<https://www.ostrava.cz/cs/urad/hledam-informace/aktualni-informace/pocet-obyvatel-ve-spravnim-obvodu-statutarniho-mesta-ostravy>

WHO 2016, *Ambient (outdoor) air quality and health* [Cit. 27. 3. 2017] dostupné na <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>

ČHMÚ 2017 *Aktuální přehled dat z automatizovaných stanic* [Cit. 10. 2. 2017] dostupné na

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/actual_hour_data_CZ.html

ČHMÚ *přehled stanic* [Cit. 28. 3. 2017] dostupné na

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2015_enh/pdf/PrehledStanic.pdf

Česká národní banka *Kurz pro přepočítání EUR na Kč 1 EUR= 27,020 Kč* [Cit. 11. 3. 2017] dostupné na www.cnb.cz