

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 referenčními přístroji 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, reprodukovatelnost výsledků, RMSE a týdenní a denní chody pro všechny měřené polutanty (O_3 , CO, NO_x , NO_2 , NO, PM_{10}). Jednotlivé výsledky jsou graficky znázorněny a okomentovány. Práce také diskutuje shody koncentrací naměřených senzory s daty z referenčních přístrojů 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 reference data measured by the Czech hydrometeorological institute during the same period. The data are analyzed 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, reproducibility of results, RMSE, and weekly and daily cycle are calculated for all measured pollutants (O_3 , CO, NO_x , NO_2 , NO, PM_{10}). The results are graphically illustrated and commented. The thesis also discusses the concordance of concentrations measured by the sensors with the data from the reference instruments, and the 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	8
3. Charakteristika a zdroje měřených polutantů.....	9
3.1 Ozon.....	10
3.2 Oxid uhelnatý.....	11
3.3 Oxidy dusíku.....	11
3.4 Atmosférický aerosol.....	12
4. Metodika měření	13
4.1 Popis lokality sběru dat.....	14
4.1.1 Umístění přístrojů.....	14
4.2 Referenční přístroje.....	16
4.3 Nízkorozpočtové měřicí přístroje.....	16
4.3.1 Popis přístroje.....	17
4.3.2 Princip měření	18
4.3.3 Mez detekce	18
5. Zpracování dat.....	20
5.1 Kontrola dat.....	20
5.2 Statistické metody	21
5.2.1 Korelační koeficient.....	21
5.2.2 Regresní závislost.....	21
5.2.3 Normalizovaná střední kvadratická odchylka nRMSE	21
6. Výsledky a diskuze	23
6.1 Dostupnost dat.....	23
6.2 Korelační matice	24
6.3 Průměrné hodnoty.....	27
6.4 nRMSE.....	28
6.5 Regresní závislost	29
6.6 Týdenní chod.....	31
6.7 Denní cykly.....	34
7. Závěr	39
8. Literatura.....	43

1. Úvod

V posledních desetiletích je kvalita ovzduší jedním z nejvíce sledovaných témat ochrany životního prostředí. Důvodů pro monitorování stavu kvality ovzduší je mnoho, ale 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 pro výzkum kvality ovzduší jsou degradace materiálů v důsledku kyselých dešťů, dopad na fungování ekosystémů a změna klimatických podmínek až na globální úrovni (Lim et al., 2010).

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 znečištění patří tepelné elektrárny a průmysl, lokální vytápění pevnými palivy, spalování odpadu a automobilová doprava (Pokorná et al., 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 vypuštěno do prostředí. Tento limit je obvykle udáván jako objemová nebo hmotnostní koncentrace. Druhou sledovanou složkou je imisní limit, což je nejvyšší přípustná úroveň znečištění stanovená zákonem (vyjádřená v jednotkách hmotnosti polutantu na jednotku objemu vzduchu při normální teplotě a tlaku, zákon č. 201/2012 Sb.). 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. 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 testovány nové nízkorozpočtové přístroje na měření imisí, aby mohly být následně rozmístěny po městě. 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 (Kumar et al., 2015). 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) a aerosolových částic (PM_{10}). Data z těchto přístrojů jsou porovnávána s referenčními daty získanými od Českého hydrometeorologického ústavu 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

Zemskou atmosféru lze z hlediska složení rozdělit na 3 složky. První složkou je suchá atmosféra, která je tvořena směsí plynů (Braníš et al. 2009). Procentuálně nejvíce zastoupenými plyny v atmosféře jsou dusík (78,9 %), kyslík (20,95 %) a vzácné plyny. Další významnou složkou jsou oxid uhličitý (0,03 %) a plyny dočasně setrvávající (Coskun, 2011). Druhou složkou je voda ve všech jejích skupenstvích. Třetí a poslední složkou jsou aerosolové částice v rozsáhlém velikostním rozsahu (1 nm až 100 μm) (Hůnová, Janoušková, 2004). Ve všech těchto složkách se vyskytují škodlivé látky, ať už v plynném skupenství, navázané na pevných částicích, nebo rozpuštěné v objemu kapalin. Těmto škodlivým látkám se obecně říká polutanty. Polutanty se z ovzduší následně dostávají do vody i půdy, kde negativně 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. Druhou skupinou jsou sekundární polutanty, které vznikají řadou následných procesů v atmosféře. Příkladem je 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 (Hůnová, Janoušková, 2004). 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 1 a tabulce 2. Způsob, jakým příjemce na kontakt s polutantem reaguje, už závisí na povaze a vlastnostech jednotlivých polutantů.

Tab. 1: 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

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, tj. 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.

Tab. 2: 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 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$

3.1 Ozon

Za normálních podmínek je ozon bezbarvý plyn s jemným typickým zápachem. Ve stratosféře najdeme 90 % ozonu, kde tvoří ozonovou vrstvu chránící Zemi před nebezpečnými složkami UV záření, zbylých 10 % tvoří troposférický ozon (Hůnová, Janoušková, 2004). Je silným oxidačním činidlem napadajícím hlavně dýchací cesty, ale může způsobit i kardiovaskulární onemocnění, a to hlavně v letních měsících (Martuzzi et al., 2006). Neméně důležitý je také vliv ozonu na vegetaci, pro což je v zákonu o ochraně ovzduší uveden imisní limit pro ochranu vegetace spolu s limitem pro ochranu zdraví (Tabulka 2).

V případě znečištění ovzduší je objektem zájmu 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, 1999). Za pomoci ultrafialového záření se oxid dusičitý rozkládá na oxid dusnatý a atomární kyslík (rovnice 1). Tento vysoce reaktivní atomární kyslík reaguje s další molekulou kyslíku za vzniku ozonu (rovnice 2), který následně reaguje s oxidem dusnatým (rovnice 3) a systém se tak stále obnovuje (Hůnová, Janoušková, 2004).

Rovnice vzniku přízemního ozonu (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 (NO_2), které se významně podílí na vzniku troposférického ozonu. 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. První skupinou je 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 možné podle velikosti aerosolu. Legislativně sledovány jsou velikostní frakce PM_{10} (částice o aerodynamickém průměru do 10 μm), $\text{PM}_{2,5}$ (částice < 2,5 μm) a mimo legislativu i PM_1 (částice < 1 μm). Jemnější aerosolové částice 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. Mají také delší dobu setrvání a mohou být v těle transportovány na delší vzdálenosti (Maznová et al., 2009). Co se týká zdrojů aerosolu, tak největší podíl na vypouštění do ostravského ovzduší má spalování uhlí, automobilová doprava, 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 odsiřování strusky (Pokorná et al., 2015). Pro větší aerosol 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

Měření probíhalo v Ostravě v období 1. 6. 2015 – 7. 9. 2015. Referenční data pro tuto práci byla získána ze tří různých stanic ČHMÚ, umístěných na různých stanovištích. Principy stanovení koncentrací referenčními přístroji jsou uvedeny v tabulce 3. Data z nízkorozpočtových sensorů byla poskytnuta Ústavem experimentální medicíny AV ČR v rámci projektu Citi-sense. Šest nízkorozpočtových sensorů bylo umístěno v blízkosti referenčního přístroje v Ostravě-Porubě.

Tab. 3: Principy stanovení koncentrací měřených polutantů v automatizovaných stanicích ČHMÚ v roce 2015 s popisem jednotlivých metod (Souhrnný tabelární přehled ČHMÚ 2015).

Veličina	Metoda analýzy	jednotka	interval	stanice
PM ₁₀	RADIO ¹ [radiometrie – absorpce beta záření]	µg/m ³	1 h	Ostrava-Fifejdy
O ₃	UVABS ² [UV-absorpce]	µg/m ³	1 h	Ostrava-Fifejdy
NO	CHML ³ [chemiluminiscence]	µg/m ³	1 h	Ostrava-Poruba
NO ₂	CHML [chemiluminiscence]	µg/m ³	1 h	Ostrava-Poruba
NO _x	CHML [chemiluminiscence]	µg/m ³	1 h	Ostrava-Poruba
CO	IRABS ⁴ [IR-korelační absorpční spektrometrie]	µg/m ³	8 h	Ostrava-Přívoz

1 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.

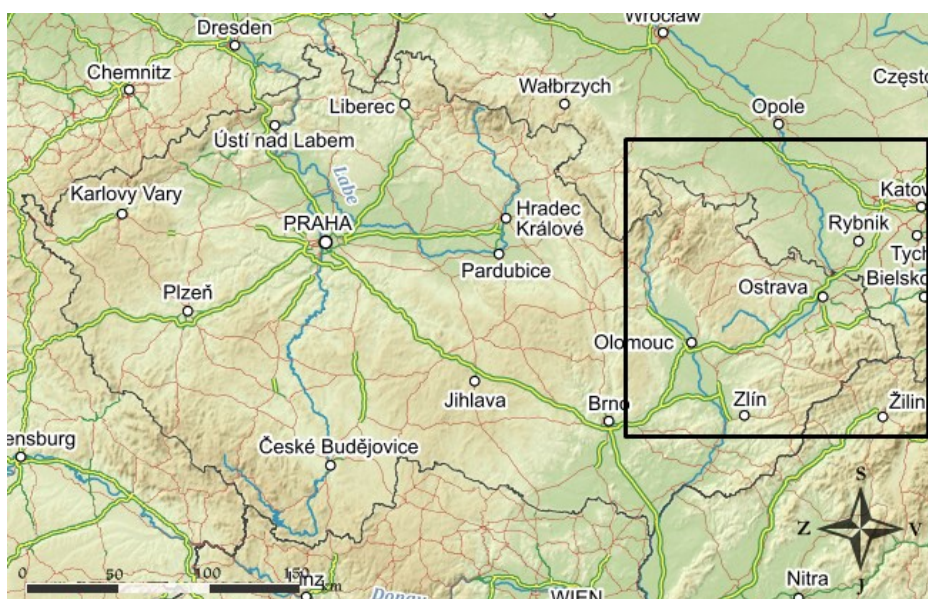
2 UVABS – ultrafialová absorpční fotometrie - O₃: Metoda spočívá v absorpci záření s vlnovou délkou 254 nm ozonem, který je přítomen v analyzovaném vzorku. UV lampou se měří střídavě čistý vzduch a vlastní vzorek v kyvetách.

3 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.

4 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.

4.1 Popis lokality sběru dat

Ostrava je třetí největší město v České republice s plochou 214 km² a počtem obyvatel zhruba 300 tisíc (web Ostrava, 2017). Nachází se na soutoku řek Odry, Opavy, Ostravice a Lučiny. Je centrem 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 byla Ostrava 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 nejhůřší 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. 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 referenčního přístroje, z kterého byly získány data koncentrace oxidů dusíku. Lokality rozmístění stanic ČHMÚ měřících koncentrace dalších polutantů, taktéž vyznačené v obr. 2, se lišily. Důvodem použití dat z více stanic, byla nedostupnost potřebných dat z jediné

stanice pro pokrytí všech polutantů měřených sensory. Proto byly k doplnění vybrány dvě další stanice: stanice Ostrava-Fifejdy, která je od lokality umístění sensorů (Ostrava-Poruba) vzdálena 7,6 km vzdušnou čarou a stanice Ostrava–Přívoz, která je od lokality umístění sensorů v Porubě vzdálena 8,6 km vzdušnou čarou. V tabulce 4 jsou uvedeny jednotlivé lokality umístění přístrojů ČHMÚ včetně označení měřeného polutantu a popisu okolí stanice.



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

Tab. 4: Umístění měřících stanic ČHMÚ v Ostravě s popisem měřených polutantů a lokality (ČHMÚ Přehled stanic)

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

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 momentálně 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 asi 135 000,- Kč) až k € 30,000 (v přepočtu asi 810 000,- 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 stanice, 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 systémů. Také se stávají energeticky nenáročně a úsporné díky zapojení energeticky účinných obvodů a komunikačních zařízení (Wi-Fi, 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).

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 sledovaných látek 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. hot-spots, nebo monitoring při průmyslových haváriích.

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 několikrát tolik (Castell et al., 2016), bez nákladů na pravidelnou údržbu a kalibraci (Cambridge Enterprise, 2015).



Obr.3 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. Standardně měří koncentrace oxidů dusíku, ozonu, okolní teplotu, tlak a vlhkost. Je také možné rozšíření pro měření aerosolových částic PM_{10} , $PM_{2,5}$, oxidu uhelnatého a oxidu siřičitého. Pro aerosoly je možné nastavit také odhad počtu částic. Je 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.

Přístroje mají také určitá omezení, která je vhodné dodržovat v závislosti na funkčnosti sensoru. Jsou vhodné k použití od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, jsou sestavené pro použití ve vnějších podmínkách s venkovním tlakem vzduchu od 750 do 1450 mbar, což je 17 kPa – 145 kPa (za normální tlak je považovaná hodnota 101,325 kPa) a vlhkostí v rozmezí 15–95 % (Manuál AQMesh, 2015). Sensor je dodán již kalibrovaný výrobcem.

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. K tomuto serveru se může dostat člověk na základě přiděleného loginu a data si stáhnout k dalšímu vyhodnocení (Manuál AQMesh, 2015).

4.3.2 Princip měření

Sensory fungují na dvou principech. Metoda použitá pro zjištění koncentrace plynů (ozon, oxidy dusíku, oxid uhelnatý) funguje na principu elektrochemických snímačů, které reagují na cílový plyn. Probíhá absorpce na polovodivém nanomateriálu a měření změny vodivosti. Ze změn vodivosti je na základě předchozí kalibrace určována koncentrace sledovaného plynu. Pro zjištění koncentrace aerosolových částic je použit optický čítač částic. Čerpadlem je veden vzorek plynu s částicemi přes paprsek světla instalovaného optického laseru. Rozptyl světla z laseru je detekován optickým senzorem, který rozptyl na částicích vyhodnocuje a z intenzity rozptýleného světla odvozuje koncentraci aerosolu.

4.3.3 Mez detekce

Jednou z vlastností každého měřicího přístroje je mez detekce. Je to nejnižší možná koncentrace analytu, která může být ve zkoumaném vzorku kvalitativně dokázána. Musí být přítomna dostatečná koncentrace analytu, aby se vytvořil analytický signál, který lze spolehlivě odlišit od „analytického šumu“, který vzniká v nepřítomnosti analytu (Armbruster, Pry, 2008). V případě přejatých dat ze sensorů sice byly ve výstupu zapsány hodnoty, ale byly označeny jako pod limitem detekce čili nebylo možné je použít. Pro použitý přístroj AQMesh jsou meze detekce uvedeny podle měřené veličiny v tabulce 5.

Tab. 5: Meze detekce jednotlivých měřených veličin (AQMesh Parameters)

Měřená veličina	spodní mez detekce	horní mez detekce	Přesnost (Ve standardních testovacích podmínkách)
Teplota	- 20 °C	100 °C	± 2 °C
Relativní vlhkost	0 %	100 %	5 % RH
Tlak	500mb	1500mb	± 5 mb
NO	5 ppb	4 000 ppb	± 5 ppb
NO ₂	10 ppb	4 000 ppb	± 5 ppb
O ₃	5 ppb	1 800 ppb	± 5 ppb
CO	5 ppb	6 000 ppb	± 5 ppb
PM ₁₀	N/A	500 µg/m ³	-
NO _x	10 ppb	8 000 ppb	-

5. Zpracování dat

5.1 Kontrola dat

Data poskytnuta ČHMÚ 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 poskytnuta ČHMÚ a nemohla být tedy porovnána. 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. Stejný problém se vyskytl u sensoru 3, kde data všech polutantů chyběla od 2. 9. 0:00 2015 až do konce měření.

Následujícím krokem byla vyfiltrována veškerá záporná data z přístrojů ČHMÚ, která byla dle dodaného popisu chybná. Dále byla odstraněna data sensorů, které sensor vyhodnotil jako „Below LOD“, tedy pod limitem detekce. Odfiltrováním prošly také hodnoty koncentrace CO pod hranicí detekce, kdy stanice ČHMÚ (Ostrava-Přívoz) udávala konstantně poloviční hodnotu ($58 \mu\text{g}/\text{m}^3$) této hranice ($116 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Dalším krokem bylo odstranění nulových hodnot ze sensorů, protože byly pod mezí detekce a jenom chybně nebyly označeny jako hodnoty pod mezí detekce. Pro jednotlivé sensory byly počty odstraněných dat tak rozsáhlé, že pouze polovina sensorů (sensor 1, sensor 5 a sensor 7) byly schopny poskytnout použitelná data pro všechny měřené polutanty najednou. Byla vypracována tabulka (tabulka 6) s vypočteným procentuálním zastoupením chybných a odstraněných dat. Cílem práce je ohodnotit sensory, které naměřily dostatečné procento dat. Tato hranice byla určena na maximum 50 % odstraněných dat a k vyhodnocení byla použita data, která nepřesáhla tuto hranici. Při chybějících datech nad 50% je vysoká možnost ovlivnění zpracovaných hodnot například časově omezenou epizodou, ve které sensor byl schopný měřit, což nepředstavuje stejná data k porovnání s referenčními.

5.2 Statistické metody

Data k 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. Pro grafické znázornění byly použity histogramy, bodové grafy s regresními přímkami, korelační matice a spojnicové grafy. Byly zpracovány průměrné koncentrace polutantů za celé měřené období, vypočtena střední kvadratická odchylka, korelační matice, regresní závislosti, týdenní chody a denní chody.

5.2.1 Korelační koeficient

K zjištění reprodukovatelnosti dat, která byla naměřena jednotlivými sensory, jsou vypočteny korelační koeficienty R , které definují vzájemný vztah mezi dvěma veličinami (rozsah -1 až 1). V této práci byl použit Pearsonův korelační koeficient, který měří lineární závislost dvou náhodných veličin s dvourozměrným rozdělením. Pokud $R=1$, tak náhodná veličina je přesnou lineární kombinací závislé proměnné, pokud je $R=0$, tak je příslušná korelace nulová, tedy mezi sledovanými veličinami není lineární závislost, a pokud je $R=-1$, tak je příslušná korelace negativní a jde o nepřímou úměru (Meloun, Militký, 2004). K statistickému testování korelačního koeficientu byl použit párový t-test.

5.2.2 Regresní závislost

Regresní závislost 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 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.

5.2.3 Normalizovaná střední kvadratická odchylka nRMSE

Pro zjištění přesnosti porovnávaných přístrojů se používá střední kvadratické odchylky RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}, \quad (4)$$

kde $X_{obs,i}$ je hodnota koncentrace v určitém čase z referenčního přístroje, $X_{model,i}$ a n je počet všech měřených, resp. porovnávaných hodnot.

V případě této práce byla použita normalizovaná střední kvadratická odchylka nRMSE, která je bezrozměrnou variantou RMSE:

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\overline{X_{obs}}}, \quad (5)$$

kde je vypočtená RMSE dělena $\overline{X_{obs}}$, což je průměrná hodnota koncentrace daného polutantu měřená referenčním přístrojem. Výhodou nRMSE je, že funguje pro porovnání dvou zcela různých měření (v tomto případě různých polutantů).

6. Výsledky a diskuze

6.1 Dostupnost dat

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 6, 4 z 6 sensorů byly problémové při měření koncentrace oxidu dusičitého. Počet chybějících dat pohybující se kolem 50 % a více poukazuje na problém sensorů pro výše zmíněný polutant v daném prostředí. Vysoké množství chybějících dat se objevilo i u měření NO (2 sensory s chybovostí nad 80%), sensor 14 poskytl dokonce pouze 3 % použitelných dat pro oxid dusnatý. V menší míře chybějících dat (2 sensory s chybnými daty kolem 70%) se pohybovaly sensory při měření koncentrací NO_x a ozonu. Nejmenší míru chybějících vykazovalo měření koncentrace oxidu uhelnatého (průměrně 9 % chybějících dat pro všechny sensory) a měření aerosolových částic PM₁₀ (průměrně 4 % chybějících dat).

Tab. 6: *Vypočtené procentuální zastoupení chybějících dat. Červeně označené hodnoty jsou nad 50 % chybějících dat, tj. data, která nebyla pro další vyhodnocení použita.*

	% odstraněných dat					
	NO	NO ₂	NO _x	CO	O ₃	PM ₁₀
Sensor 1	22	49	37	9	33	0
Sensor 3	5	91	73	9	73	5
Sensor 5	10	49	14	11	15	21
Sensor 7	10	48	33	9	2	0
Sensor 9	89	1	19	8	69	0
Sensor 14	97	30	71	9	20	0
Průměr	39	45	41	9	35	4
ČHMÚ	6	6	6	17	5	2

6.2 Korelační matice

Níže jsou uvedeny korelační matice pro každý polutant zvlášť, ve kterých je sestaven jak korelační koeficient, tak i příslušná p-hodnota. Každý sensor byl porovnán se skupinou všech ostatních sensorů jednotlivě. Pokud se R bude blížit k číslu 1, tak to znamená, že data ze sensorů spolu dobře korelují a podávají tak souhlasné výsledky. Pokud se hodnota R bude blížit spíše k číslu 0, znamená to nízkou korelaci dat a sensory prakticky neposkytují stejné informace ve stejných podmínkách a data tudíž nemohou být hodnocena jako reprodukovatelná.

Tabulka 7 uvádí shodu měřených dat přízemního ozonu jen u několika sensorů. V porovnávané řadě korelačního koeficientu sensoru 3 ($\bar{R} = 0,1$) a sensoru 9 ($\bar{R} = 0,3$) jsou hodnoty $< 0,5$, což značí nízkou shodu dat těchto sensorů s daty ostatních sensorů. P-hodnota sensoru 7 poukazuje taktéž na data, u kterých korelace není statisticky významná a křivka koncentrací se bude více lišit od ostatních sensorů. Bez dvou problémovějších sensorů (sensor 3, sensor 9), jejichž minimální shoda se dá vysvětlit i nízkým počtem poskytnutých dat ke zpracování (tabulka 6), poskytují ostatní sensory data velmi podobná ($\overline{R_{O_3}} = 0,7$).

Tab. 7: Matice korelačního koeficientu R a p-hodnota pro ozon

Korelační koeficient R O ₃							p-hodnota O ₃						
	s1	s3	s5	s7	s9	s14		s1	s3	s5	s7	s9	s14
s1	1	-0,11	0,67	0,84	0,32	0,73	s1	x	0,08	0	0	0	0
s3	-0,11	1	0,2	0,06	0,04	0,2	s3	0,08	x	0	0,2	0,4	0
s5	0,67	0,2	1	0,64	0,23	0,63	s5	0	0	x	0	0	0
s7	0,84	0,06	0,64	1	0,39	0,74	s7	0	0,2	0	x	0	0
s9	0,32	0,04	0,23	0,39	1	0,45	s9	0	0,7	0	0	x	0
s14	0,73	0,2	0,63	0,74	0,45	1	s14	0	0	0	0	0	x

V tabulce 8 hodnota R oxidu uhelnatého neklesá pod 0,8 u žádného sensoru, což naznačuje velmi vysokou korelaci v měření dat mezi sensory. Též p-hodnota nepřesahuje zvolených 5 %, což potvrzuje kladný korelační výsledek. Z těchto hodnot lze vyvodit závěr, že všechny sensory poskytují stejná data s minimálními rozdíly a zároveň průměrná hodnota korelačního koeficientu dosáhla nejvyšší úrovně ($\overline{R_{CO}} = 0,9$).

Tab. 8: Matice korelačního koeficientu R a p -hodnota pro oxid uhelnatý

Korelační koeficient R CO							p-hodnota CO						
	s1	s3	s5	s7	s9	s14		s1	s3	s5	s7	s9	s14
s1	1	0,96	0,86	0,99	0,92	0,99	s1	x	0	0	0	0	0
s3	0,96	1	0,88	0,97	0,94	0,98	s3	0	x	0	0	0	0
s5	0,86	0,88	1	0,87	0,84	0,86	s5	0	0	x	0	0	0
s7	0,99	0,97	0,87	1	0,92	0,98	s7	0	0	0	x	0	0
s9	0,92	0,94	0,84	0,92	1	0,93	s9	0	0	0	0	x	0
s14	0,99	0,98	0,86	0,98	0,93	1	s14	0	0	0	0	0	x

Hodnoty korelačního koeficientu oxidů dusíku v tabulce 9 jsou ve velkém rozptylu, což značí, že sensory vykazují rozdílné hodnoty. Sensor 9 ($\bar{R} = 0,3$) a sensor 14 ($\bar{R} = 0,2$) vykazují nejnižší korelace s ostatními sensory. P-hodnota u porovnání sensoru 14 a sensoru 5 s hodnotou 0,8 říká, že tato korelace je statisticky nevýznamná. Průměrně si sensory oproti korelaci oxidu uhelnatého nevedou tak dobře, ale mají mezi sebou stále ještě poměrně dobrou shodu dat ($\overline{R_{NOx}} = 0,5$).

Tab. 9: Matice korelačního koeficientu R a p -hodnota pro oxidy dusíku

Korelační koeficient R NO _x							p-hodnota NO _x						
	s1	s3	s5	s7	s9	s14		s1	s3	s5	s7	s9	s14
s1	1	0,51	0,68	0,96	0,32	0,23	s1	x	0	0	0	0	0
s3	0,51	1	0,22	0,43	0,38	0,22	s3	0	x	0	0	0	0
s5	0,68	0,22	1	0,72	0,18	-0,01	s5	0	0	x	0	0	0,8
s7	0,96	0,43	0,72	1	0,27	0,18	s7	0	0	0	x	0	0
s9	0,32	0,38	0,18	0,27	1	0,43	s9	0	0	0	0	x	0
s14	0,23	0,22	-0,01	0,18	0,43	1	s14	0	0	0,8	0	0	x

Korelační matice oxidu dusičitého v tabulce 10 poukazují na statisticky nevýznamnou korelaci sensoru 5 a sensoru 3. Oba sensory ale vykazují s ostatními přístroji významnou shodu dat. Celkově sensory mezi sebou dobře korelují ($\overline{R_{NO2}}=0,6$).

Tab. 10: Matice korelačního koeficientu R a p -hodnota pro oxid dusičitý

Korelační koeficient R NO ₂							p-hodnota NO ₂						
	s1	s3	s5	s7	s9	s14		s1	s3	s5	s7	s9	s14
s1	1	0,54	0,75	0,97	0,54	0,61	s1	x	0	0	0	0	0
s3	0,54	1	0,18	0,52	0,52	0,60	s3	0	x	0,09	0	0	0
s5	0,75	0,18	1	0,75	0,48	0,53	s5	0	0,09	x	0	0	0
s7	0,97	0,52	0,75	1	0,51	0,58	s7	0	0	0	x	0	0
s9	0,54	0,52	0,48	0,51	1	0,65	s9	0	0	0	0	x	0
s14	0,61	0,60	0,53	0,58	0,65	1	s14	0	0	0	0	0	x

Data oxidu dusnatého ze sensoru dle tabulky 11 velmi dobře korelují mezi sebou. Nízkou korelaci vykazuje sensor 9, který měl velmi nízké procento poskytnutých dat, což pravděpodobně ovlivnilo jeho shodu s ostatními sensory. Průměrně se spolu sensory velmi dobře shodují ($\overline{R_{NO}}=0,8$).

Tab. 11: Matice korelačního koeficientu R a p -hodnota pro oxid dusnatý

Korelační koeficient R NO							p-hodnota NO						
	s1	s3	s5	s7	s9	s14		s1	s3	s5	s7	s9	s14
s1	1	0,63	0,77	0,84	0,23	0,47	s1	x	0	0	0	0	0
s3	0,63	1	0,71	0,82	0,21	0,36	s3	0	x	0	0	0	0
s5	0,77	0,71	1	0,88	0,26	0,25	s5	0	0	x	0	0	0
s7	0,84	0,82	0,88	1	0,23	0,48	s7	0	0	0	x	0	0
s9	0,23	0,21	0,26	0,23	1	0,81	s9	0	0	0	0	x	0
s14	0,47	0,36	0,25	0,48	0,81	1	s14	0	0	0	0	0	x

Korelační koeficienty aerosolových částic PM_{10} v tabulce 12 jsou ve všech případech nad hodnotou 0,8, což vypovídá o vysoké korelaci dat mezi všemi sensory ($\overline{R_{PM_{10}}}=0,9$).

Tab. 12: Matice korelačního koeficientu R a p -hodnota pro aerosolové částice PM_{10}

Korelační koeficient R PM_{10}							p-hodnota PM_{10}						
	s1	s3	s5	s7	s9	s14		s1	s3	s5	s7	s9	s14
s1	1	0,91	0,92	0,91	0,87	0,92	s1	x	0	0	0	0	0
s3	0,91	1	0,92	0,91	0,87	0,9	s3	0	x	0	0	0	0
s5	0,92	0,92	1	0,92	0,82	0,88	s5	0	0	x	0	0	0
s7	0,91	0,91	0,92	1	0,85	0,89	s7	0	0	0	x	0	0
s9	0,87	0,87	0,82	0,85	1	0,86	s9	0	0	0	0	x	0
s14	0,92	0,9	0,88	0,89	0,86	1	s14	0	0	0	0	0	x

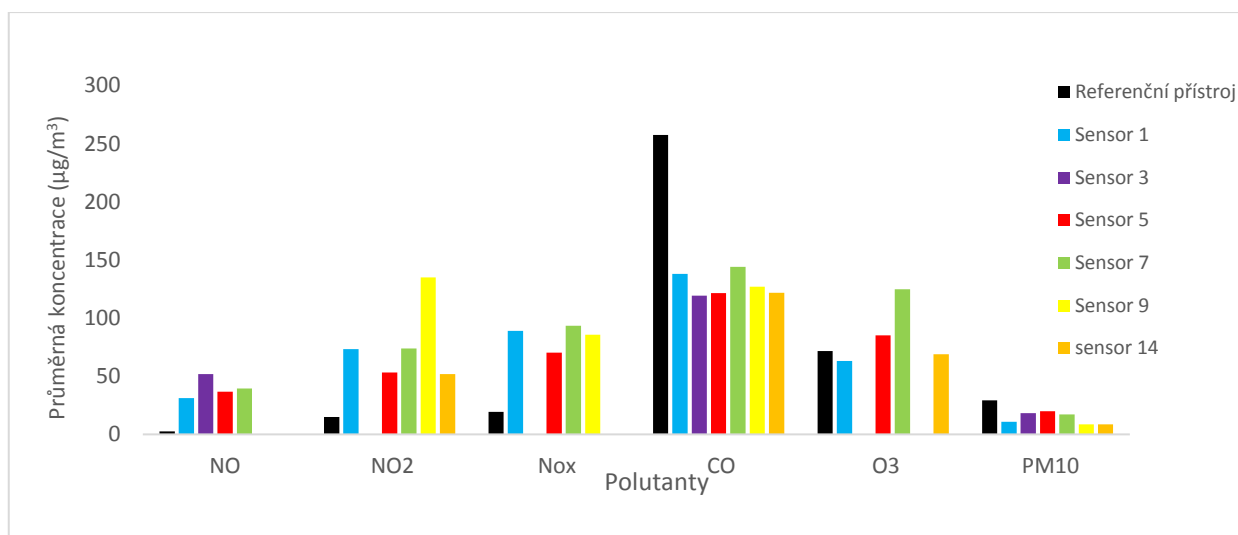
Dvou nejlepších výsledků v reprodukovatelnosti měření tedy dosáhli oxid uhelnatý a aerosolové částice PM_{10} . Všechny polutanty ale dosáhly průměrem hodnoty $R>0,5$.

6.3 Průměrné hodnoty

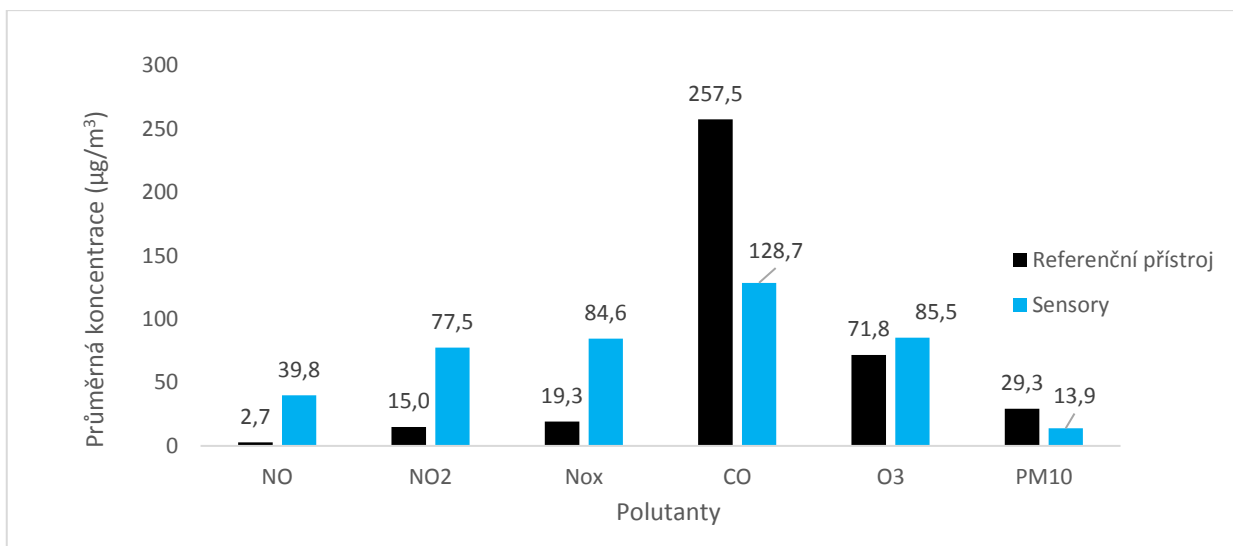
Průměrné koncentrace za celé období měření jsou zpracovány pro všechny polutanty ze všech šesti sensorů spolu s daty z referenčních přístrojů. Jak je znázorněno v grafu 1, sensory měřily ve třech případech vyšší koncentrace než referenční přístroje, a to pro skupiny oxidů dusíku, NO a NO₂. Z grafu 2, 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 sensorem vyšší o 80 %. Referenční přístroje pro měření těchto oxidů byly umístěny na stejné lokalitě spolu se sensory na stanici 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 měřené koncentrace).

Pro oxid uhelnatý (CO) a aerosolové částice (PM₁₀) byly naopak průměrné měřené koncentrace sensory nižší než naměřené referenčními přístroji. Pro oxid uhelnatý sensory měřily o zhruba 50 % nižší koncentrace, a pro aerosolové částice o 49 %. Takováto rozdílnost v měření může být vysvětlena za prvé nepřesností sensorů, za druhé rozdílem lokalit umístění přístrojů.



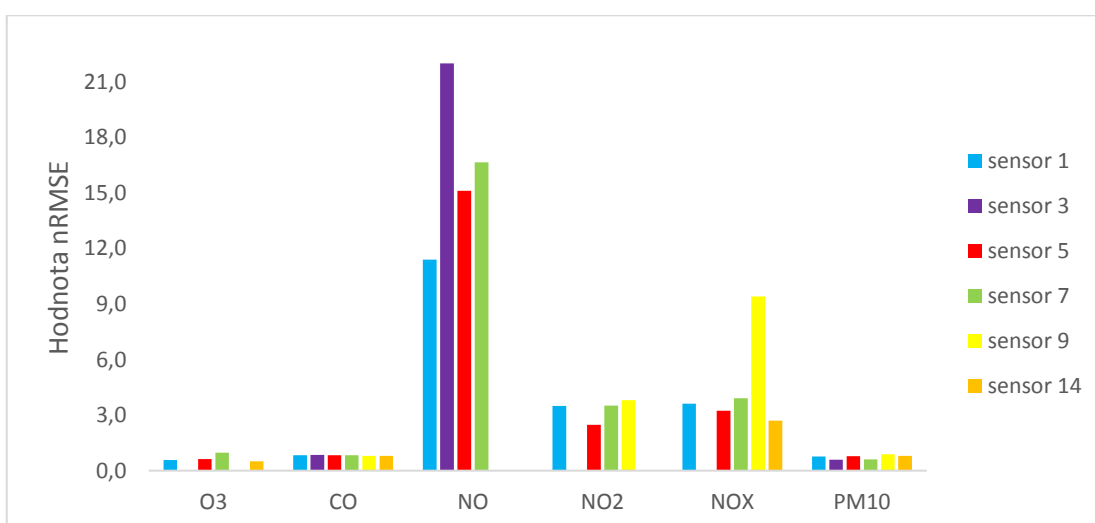
Graf 1: Průměrné koncentrace posuzovaných polutantů za celé období 1. 6. 2015 – 7. 9. 2015, měřených referenčními přístroji a jednotlivými sensory



Graf 2: Znárodnění rozdilu koncentrací za celú období 1. 6. 2015 – 7. 9. 2015 mezi přístroji ČHMÚ a průměrem hodnot sensorů.

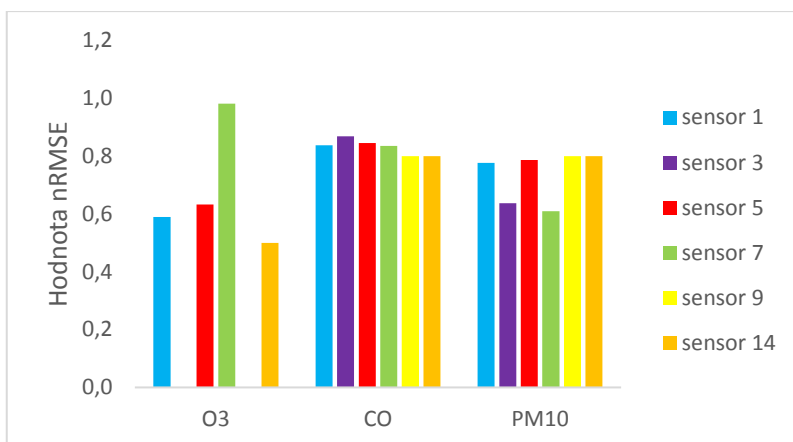
6.4 nRMSE

V grafu 3 je vypočtena nRMSE pro jednotlivé sensory a jednotlivé polutanty. Z důvodu vysoké odlišnosti hodnot oxidu dusnatého jsou dále pro lepší srovnatelnost uvedeny dva grafy s polutanty rozdělenými na dvě skupiny, podle hodnot nRMSE. První skupinou polutantů (graf 4) jsou přízemní ozon, oxid uhelnatý a aerosolové částice PM₁₀, jejichž hodnoty nRMSE se pohybují v rozmezí desetín od hodnoty 0,5 do 1. Druhou skupinou polutantů jsou oxidy dusíku, oxid dusičitý a oxid dusnatý (graf 5), které se již pohybují v rozmezí hodnot od 3 do 22.

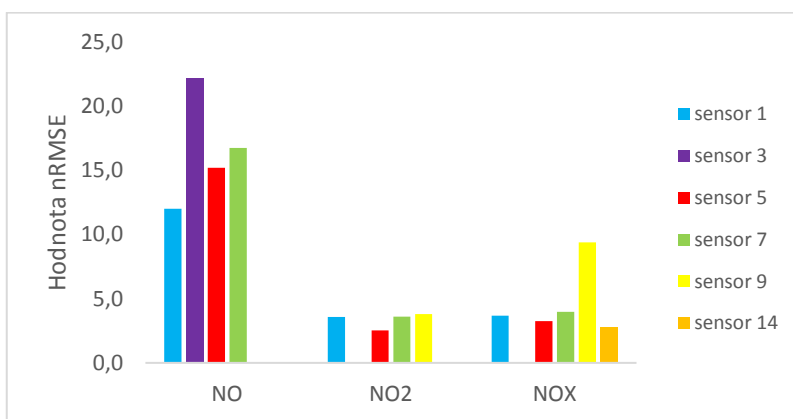


Graf 3: Grafické znázornění nRMSE pro jednotlivé polutanty a sensory.

Z grafů je zřejmé, že sensory jsou přesnější pro první skupinu polutantů, kde je nRMSE průměrně 0,8, zatímco u oxidů dusíku je průměrná hodnota nRMSE 7,9. Viditelně nejvyšší nRMSE je u oxidu dusnatého, kde dosahuje maximální hodnoty 22,1 a průměrně 16,5.



Graf 4: Grafické znázornění nRMSE bez oxidů dusíku.



Graf 5: Grafické znázornění nRMSE oxidu dusnatého, oxidu dusičitého a oxidů dusíku.

6.5 Regresní závislost

Pro zjištění shody mezi jednotlivými sensory spolu s referenčním přístrojem byly vypracovány grafy regresní závislosti, z kterých byla vypracována tabulka 13 a tabulka 14, ve kterých jsou uvedeny hodnoty korelačních koeficientů a rovnic směrnice přímky. Na ose X byla vynesena data referenční a na ose Y data ze sensorů.

Pokud se blíže podíváme například na hodnoty koeficientu determinace z tabulky 13 u sensorů měřících oxid uhelnatý a oxid dusnatý, zjistíme, že všechny sensory jsou velmi nepřesné a koeficient determinace se blíží k nule. Hodnoty koeficientu se u oxidů dusíku a oxidu dusičitého mění o desetinné místo, které s ohledem na ostatní výsledky může být

zanedbatelné a sensory mohou být označeny jako nepřesné pro tyto polutanty. U přízemního ozonu se hodnota koeficientu drží blízko $R^2=0,6$, což značí v porovnání s ostatními výsledky nejpřesnější měření z celého souboru. V porovnání s koeficienty determinantu oxidů dusíku nebo oxidu uhelnatého, jsou koeficienty determinace u aerosolových částic PM_{10} mnohem vyšší (průměrná hodnota $R^2= 0,3$). K mírně lepšímu výsledku měření aerosolových částic PM_{10} došel i Castell et al. 2016 při testování přístrojů AQMesh, které byly také umístěny v blízkosti frekventované dopravní cesty ($R < 0,4$).

Rozdíly v přesnostech jsou z velké části závislé na jiných koncentracích v okolí sensorů a v okolí referenčních přístrojů, které nebyly umístěny na stejné lokalitě (O_3 , CO, PM_{10}). Podle shodného umístění sensorů a referenčního přístroje by měly mít nejpřesnější výsledky měření koncentrace oxidů dusíku, oxidu dusičitého a oxidu dusnatého. Nicméně je tomu právě naopak. Koeficient determinace pro tyto polutanty dosahuje nejnižších hodnot z celé měřené skupiny.

Tab. 13: Souhrn koeficientu determinace pro jednotlivé sensory a polutanty.

	Koeficient determinace					
	O_3	CO	NO_x	NO_2	NO	PM_{10}
sensor 1	0,54	0,01	0,00	0,04	0,01	0,37
sensor 3	x	0,00	x	x	0,00	0,29
sensor 5	0,53	0,01	0,03	0,02	0,01	0,36
sensor 7	0,67	0,01	0,01	0,05	0,00	0,42
sensor 9	x	0,01	0,00	0,02	x	0,25
sensor 14	0,62	0,01	x	0,03	x	0,34

V tabulce 14 jsou uvedeny jednotlivé rovnice směrnic přímky sensorů v závislosti na referenčním přístroji. Největší rozdíl v koncentracích naměřených sensory a referenčními daty je u oxidu uhelnatého, kde sensory měřily o více než 95 % nižší koncentrace než referenční přístroj a téměř konstantně ukazovaly hodnotu kolem $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nezávisle na tom co měřil referenční přístroj. Tento rozdíl je u všech sensorů podobný, takže všechny sensory podhodnocují měřené koncentrace CO podobně. V tabulce se také objevují dvě záporné hodnoty směrnic přímky (sensor 9 - NO_2 a sensor 3 - NO), což spolu s $R^2=0$ znamená, že data jsou lineárně nezávislá. Z rovnice přímky NO_x je zřejmé, že sensory poskytovaly nesourodá data. Každý sensor samostatně ukazoval jinak odlišná data od dat referenčních. Také rovnice přímky u NO_2 říká, že sensory měřily variabilní data lišící se sensor od sensoru. Rovnice přímky NO říká, že sensory z velké části ukazovaly hodnoty kolem $30\text{-}35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Z rovnice přímky aerosolových částic PM_{10} můžeme říci, že polovina sensorů měří o zhruba 70 % nižší hodnoty a druhá polovina o 60 % nižší hodnoty koncentrací s velmi nízkou variabilitou

mezi jednotlivými sensory v trojici. Rovnice přímky sensorů měřících koncentrace přízemního ozonu, měřily jen zhruba o 13 % nižší koncentrace. Jeden sensor pouze o 1 %.

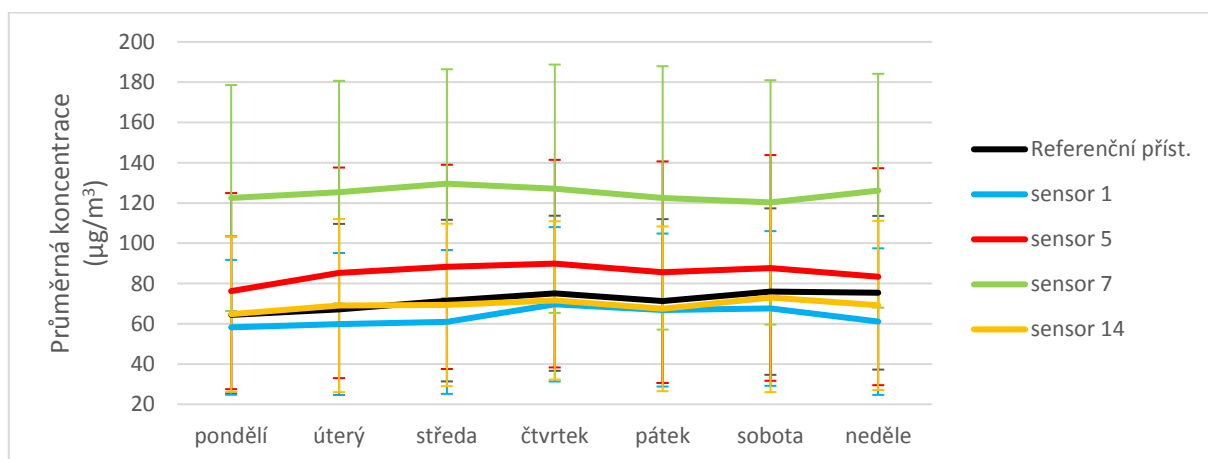
Tab. 14: Souhrn rovnice přímky pro jednotlivé sensory a polutanty.

	rovnice přímky					
	O ₃	CO	NO _x	NO ₂	NO	PM ₁₀
sensor1	$0,77x + 4,79$	$0,04x + 129,96$	$0,21x + 85,64$	$0,92x + 58,24$	$0,47x + 29,98$	$0,27x + 2,86$
sensor 3	x	$0,03x + 112,43$	x	x	$- 0,56x + 53,85$	$0,40x + 6,26$
sensor 5	$0,99x + 11,32$	$0,04x + 114,65$	$0,43x + 63,06$	$0,40x + 46,91$	$0,60x + 35,10$	$0,39x + 8,88$
sensor 7	$1,22x + 36,64$	$0,04x + 136,59$	$0,44x + 84,73$	$0,95x + 57,95$	$0,34x + 38,58$	$0,38x + 5,90$
sensor 9	x	$0,04x + 122,75$	$0,08x + 83,24$	$- 0,84x + 148,06$	x	$0,17x + 3,46$
sensor 14	$0,87x - 0,91$	$0,04x + 115,35$	x	$0,51x + 44,12$	x	$0,22x + 2,43$

6.6 Týdenní chod

K porovnání týdenních chodů jsou vypracovány grafy ze všech sensorů, které měly nad 50 % dostupných dat. Předpokládáme, že chod jednotlivých polutantů se bude v závislosti na fungování jejich zdrojů během týdne měnit.

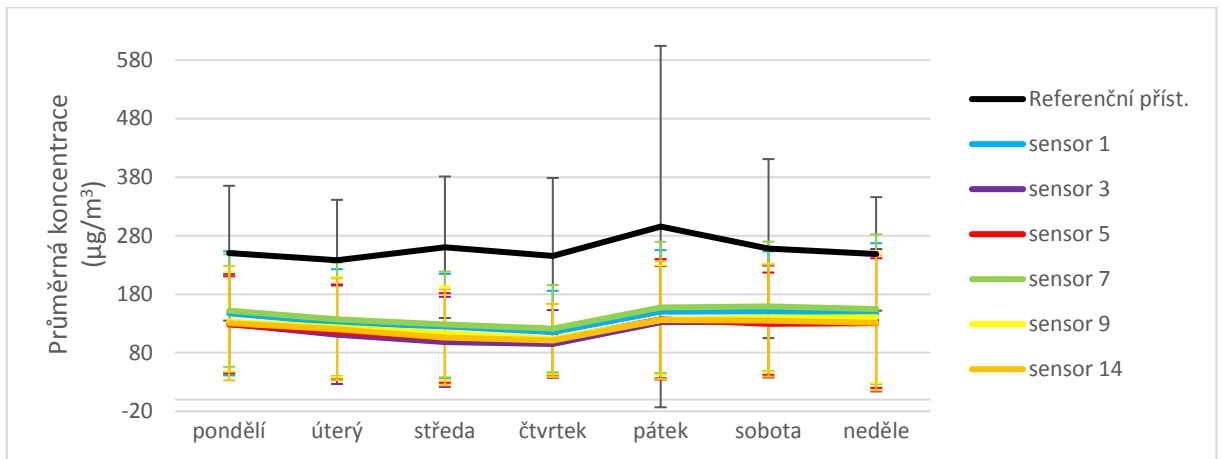
Graf 6 znázorňuje týdenní chod přízemního ozonu. Hodnota průměrných koncentrací roste v týdně s mírným poklesem v pátek. Růst i pokles se dá vysvětlit rovnicemi vzniku a propadu troposférického ozonu (1, 2, 3), která byla uvedena v kapitole ozon (3.2.). Ozon reaguje spolu s oxidem dusnatým, který vzniká při automobilové dopravě, která je intenzivnější během pracovního týdne. Můžeme si všimnout, že sensor 7 výrazně nadhodnocoval koncentrační data, zatímco ostatní sensory poskytly data velmi podobná referenčnímu přístroji.



Graf 6: Průběh průměrné koncentrace ozonu během týdne.

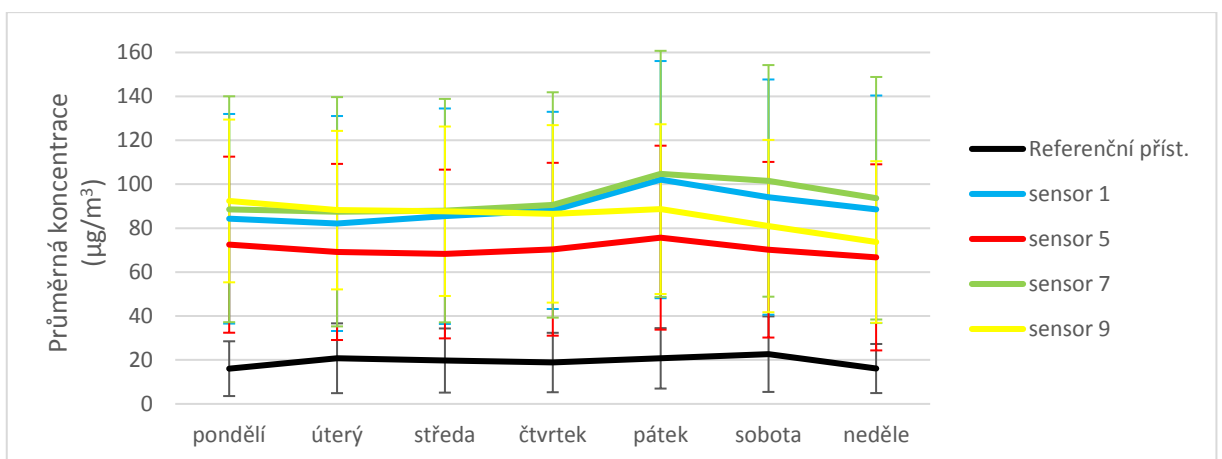
Na grafu 7 lze vidět podobný průběh průměrných týdenních koncentrací naměřených sensory a referenčním přístrojem během týdne, nicméně rozdíl v měřených koncentracích je

velmi vysoký. Křivka stoupá v pátek, kdy je předpokládána vyšší hustota dopravy, z důvodu výjezdu obyvatel mimo město. Sensory tuto křivku kopírují a žádný z nich nevykazuje výrazně odlišný průběh. Až na nesprávnou hodnotu koncentrace, sensory vykazují velice podobnou hodnotu směrodatné odchylky referenčnímu přístroji.



Graf 7: Průběh průměrné koncentrace oxidu uhelnatého během týdne.

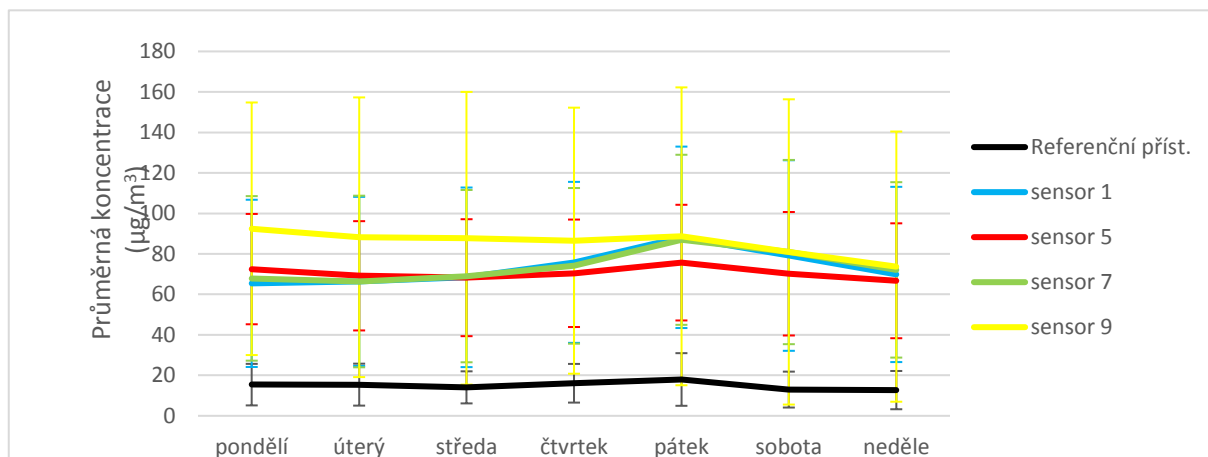
Průběh průměrné koncentrace oxidů dusíku na grafu 8 znázorňuje, že sensory výrazně nadhodnocují reálné koncentrace. Hodnoty koncentrací jen mírně klesají kolem víkendu, kdy doprava není tak intenzivní. Sensory tento pokles zaznamenaly, ale také zaznamenaly nárůst koncentrace v pátek, což se neshoduje s referenčními daty. Také je výraznější rozdíl mezi směrodatnou odchylkou sensorů a referenčního přístroje, kdy referenční přístroj vykazuje mnohem nižší hodnoty odchylky, zatímco sensory zaznamenaly data s větší variabilitou.



Graf 8: Průběh průměrné koncentrace oxidů dusíku během týdne.

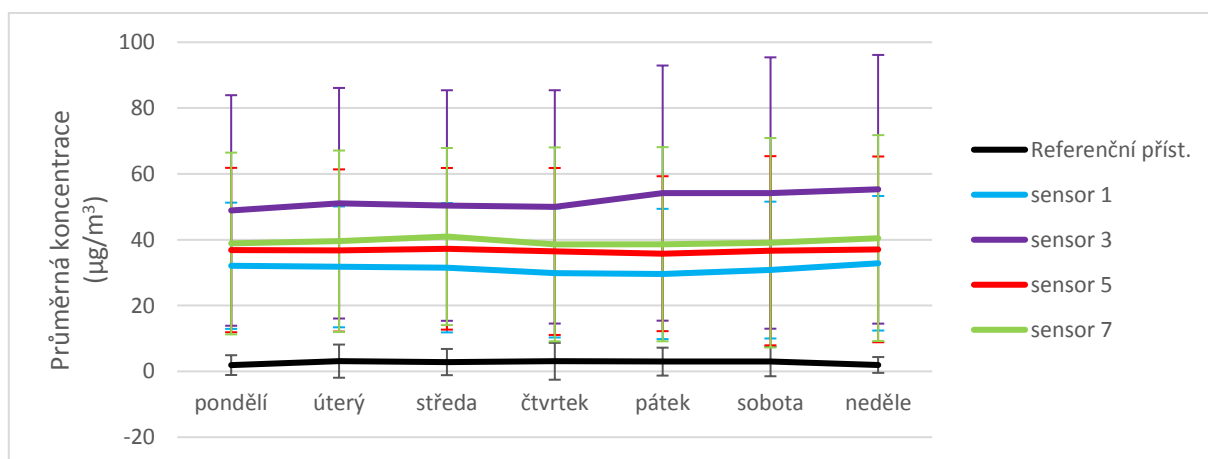
Graf 9 poukazuje na podobný průběh týdenního chodu NO_2 během týdne jako pro oxidy dusíku, s nárůstem automobilové dopravy během pátku. Referenční přístroj naměřil nárůst koncentrace v páteční den a sensory tento nárůst taktéž úspěšně zaznamenaly. Opět ale sensory

výrazně nadhodnotily reálnou měřenou koncentraci referenčním přístrojem a zároveň zaznamenaly vyšší variabilitu dat.



Graf 9: Průběh průměrné koncentrace oxidu dusičitého během týdne.

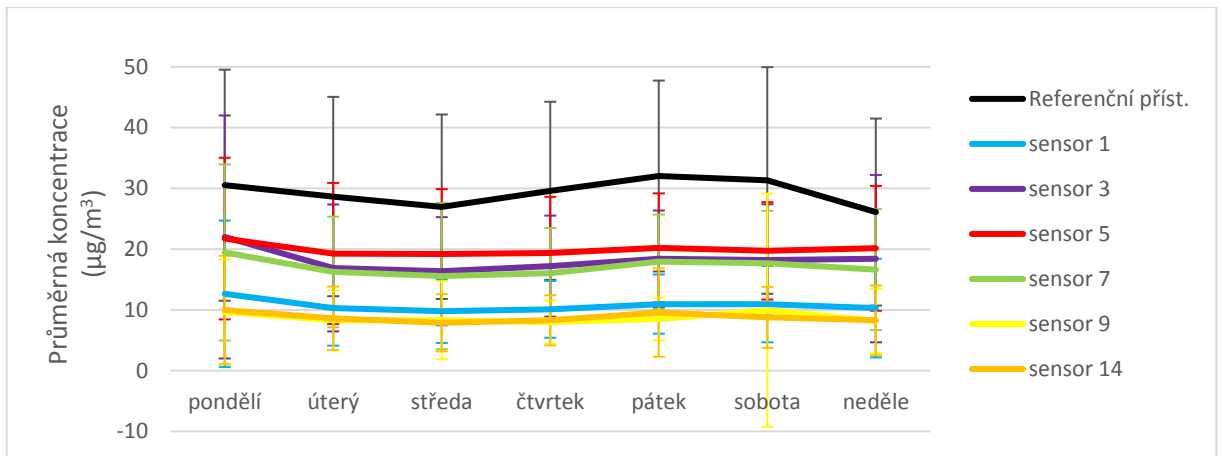
Křivky oxidu dusnatého podle grafu 10 nezaznamenaly markantní výkyvy v průměrných koncentracích během týdne. Sensory ale uvádí vyšší koncentrace stejně, jako tomu bylo u oxidů dusíku a oxidu dusičitého. Sensory se stejně jako u dvou předešlých grafů (NO_x , NO_2) neshodují v hodnotách směrodatné odchylky, takže kromě vyšších koncentrací měřily i více rozmanitá data během jednotlivých dní.



Graf 10: Průběh průměrné koncentrace oxidu dusnatého během týdne.

Jak je znázorněno na grafu 11, sensory celkově podhodnocovaly reálnou koncentraci aerosolu PM_{10} . Sensory zaznamenaly pokles během začátku týdne a konstantní hodnotou ke konci týdne, načež referenční přístroj zaznamenal nárůst od poloviny týdne a výraznější pokles na konci. Kromě konstantního vypouštění aerosolů při průmyslovém provozu, jsou aerosoly produkovány a vířeny i při automobilové dopravě, která koncem týdne klesá. Sensory se rozdělily do dvou skupin po třech, které měřily podobné koncentrace. Je možné, že přístroje

pochází např. z různých kalibračních skupin, ale důvod tohoto rozdílu není možné z dostupných dat zjistit. Sensor 9 provází výraznější nejistota znázorněna větší hodnotou směrodatné odchylky v páteční den.

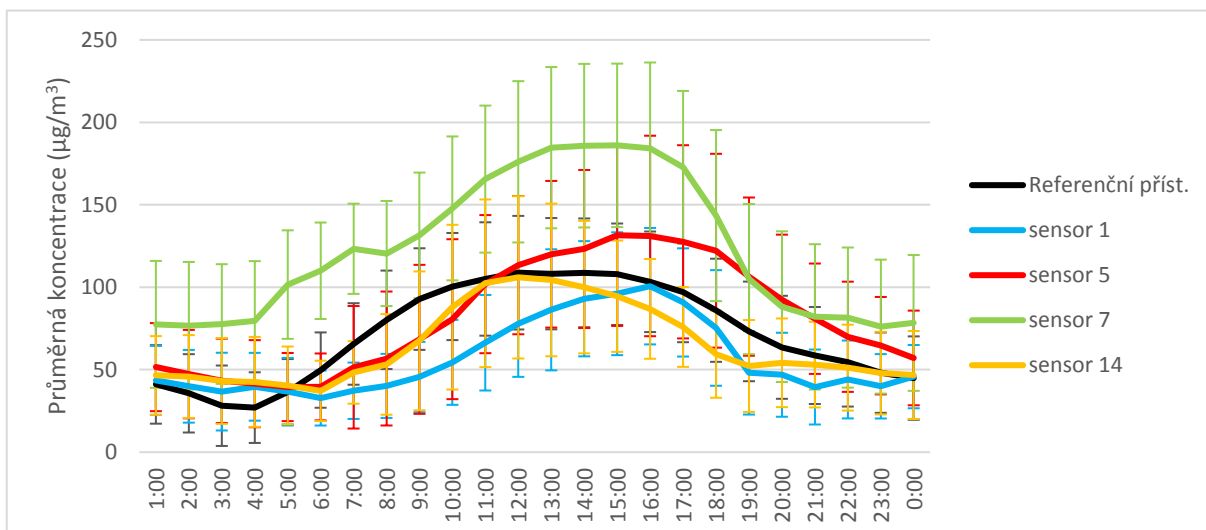


Graf 11: Průběh průměrné koncentrace aerosolových částic PM₁₀ během týdne.

6.7 Denní cykly

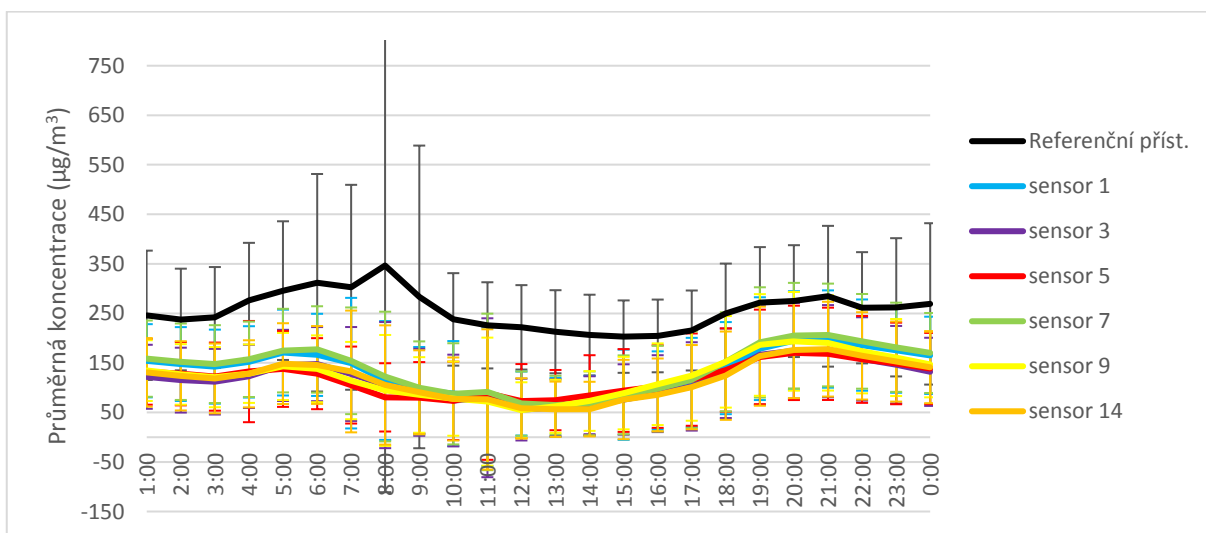
Pro zhodnocení denních cyklů jsou v grafech znázorněny průměrné koncentrace polutantů s hodinovým krokem. Jednotlivé polutanty mají různé denní chody: koncentrace ozonu roste během dne a dosahuje maxima kolem poledne, kdy je množství dopadajícího slunečního záření nejvyšší, koncentrace oxidu uhelnatého roste v ranních hodinách a později v odpoledních hodinách v závislosti na automobilové dopravě, 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).

Denní cyklus ozonu je znázorněn grafem 12, kde referenční přístroj ČHMÚ naměřil jeho typický denní průběh. Koncentrace ozonu roste v závislosti na příkonu dopadajícího záření s maximem kolem poledne, kdy na zemský povrch dopadá záření nejvíce, což vede i ke vzniku troposférického ozonu (rovnice 1), 2), 3)). Sensory dobře kopírují křivku referenčního přístroje, ale s jistým časovým zpožděním maxima kolem 14:00-15:00 hodin. Koncentrace výrazněji nadhodnotil pouze sensor 7. Směrodatná odchylka se pohybuje v konstantních hodnotách bez výraznějších rozdílů.



Graf 12: Průběh průměrné koncentrace během dne pro ozon.

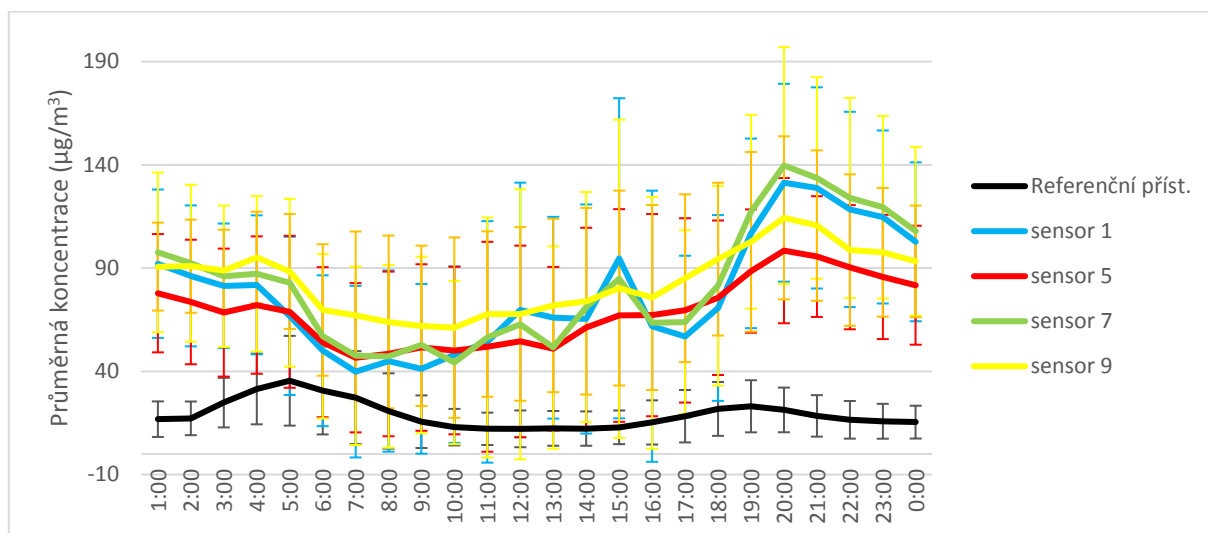
Průběh koncentrace oxidu uhelnatého měřené sensory na grafu 13, kopíruje křivku denního průběhu z referenčního přístroje. Zvýšení koncentrací od 4:00 ráno a od 16:00 hod odpoledne odpovídá době přepravy automobilovou dopravou obyvatel do zaměstnání a zpět. Koncentrace naměřené sensory jsou podhodnocené. Data všech sensorů se ale jeví podobná s minimálním rozdílem a velmi nízkou směrodatnou odchylkou. Ta je výrazná u referenčního přístroje s maximální hodnotou v 8:00 a 9:00 hod ráno, což značí velkou reálnou variabilitu koncentrací v těchto hodinách.



Graf 13: Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxid uhelnatý.

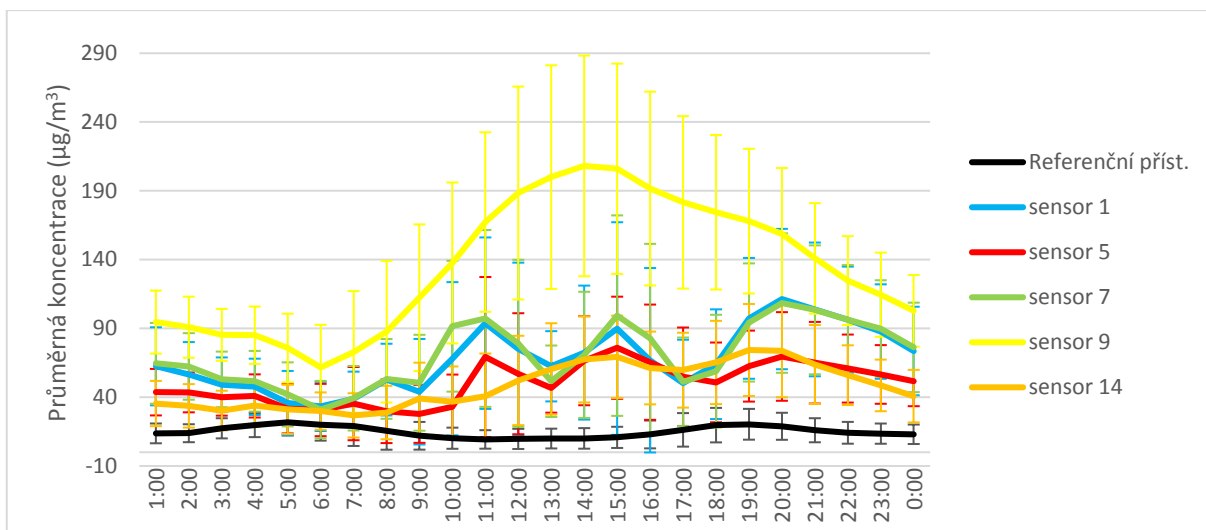
Znázornění průběhu koncentrací oxidů dusíku sensorů a referenčního přístroje na grafu 14 je velmi rozdílné. Sensory měřily výrazně odlišné koncentrace oxidů dusíku s jasným kolísáním hodnot oproti referenčnímu přístroji, který zaznamenal pouze jemné zvýšení

v ranních a odpoledních hodinách. Změny v koncentracích oxidů dusíku jsou spjaty s automobilovou dopravou a denním chodem koncentrace přízemního ozonu. Důležitou složkou jsou také denní cykly koncentrací jednotlivých oxidů dusíku, které jsou zde měřeny dohromady. Sensory také vykazují mnohem vyšší variabilitu měřených dat během jednotlivých hodin oproti směrodatné odchylce referenčního přístroje, která je zde velmi nízká.



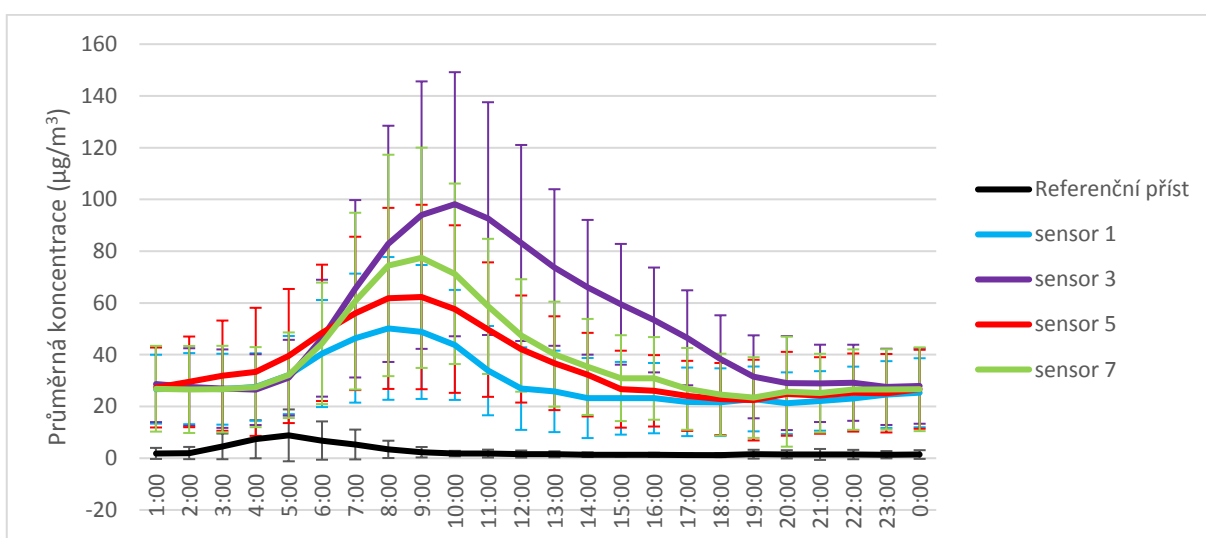
Graf 14. Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxidy dusíku.

V úzkém koncentračním vztahu s přízemním ozonem je i oxid dusičitý, jehož graf denní koncentrace (graf 15) je znázorněn níže. Ozon reaguje s oxidem dusnatým (rovnice č. 3.), který se tím spolu s ozonem z atmosféry odebírá, za vzniku právě oxidu dusičitého, jehož koncentrace roste ve chvílích, kdy koncentrace ozonu klesá. Sensory kromě nadhodnocení koncentrací zaznamenaly výrazně kolísavá data v průběhu dne, zatímco referenční přístroj utvořil očekávanou koncentrační křivku dle zmiňovaného (He et al., 2017). Křivky koncentrací sensorů se s křivkou referenčního přístroje neshodují. Sensor 9 zaznamenal od 8 hod ráno z neznámého důvodu rapidní růst koncentrace. Jelikož ostatní sensory takovou změnu nezaznamenaly, je měření vyhodnoceno jako chybné.



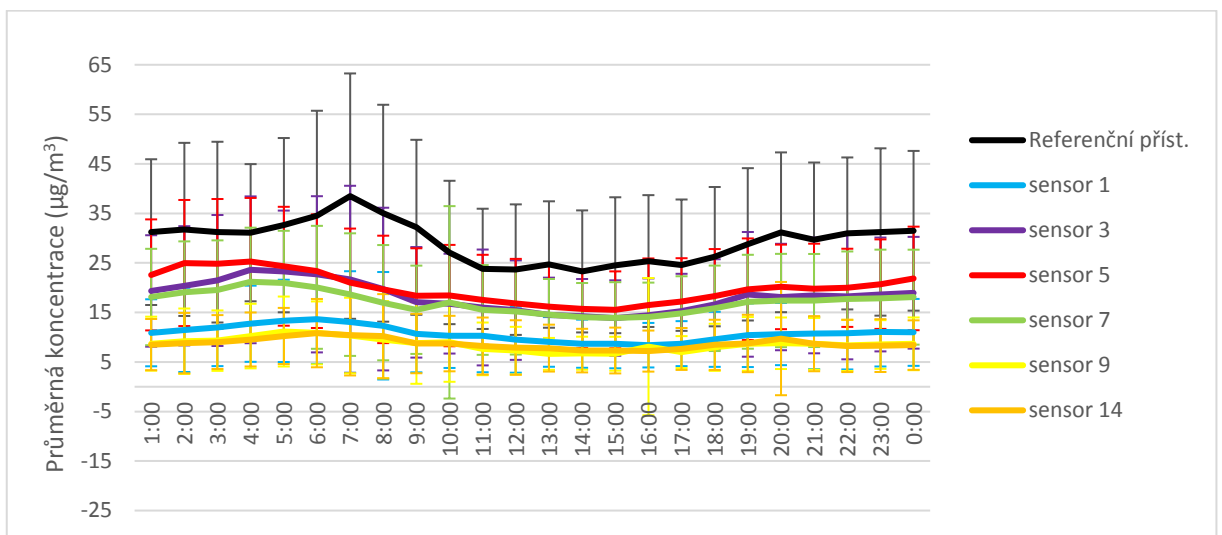
Graf 15: Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxid dusičitý.

Na grafu 16 je znázorněno zvýšení koncentrace oxidu dusnatého. Referenční přístroj zaznamenal lehký vzrůst v ranních hodinách, přičemž sensory tento růst zaznamenaly s mnohem větším časovým rozdílem a sensor od sensoru se liší maximem koncentrace během dne. 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. Směrodatná odchylka referenčního přístroje je minimální, což vypovídá o konstantních hodnotách koncentrací v danou hodinu dne. Odchylky sensorů se zvyšují spolu s růstem maxima koncentrace jednotlivých sensorů a opět klesají s tím, jak se koncentrace na začátku dne a ke konci opět vrací ke stejné hodnotě u všech sensorů.



Graf 16: Průběh průměrné koncentrace během dne pro oxid dusnatý.

Graf 17 znázorňuje průběh koncentrace aerosolu PM_{10} během dne. Aerosol je produkován a resuspendován 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. Rozdíl mezi trojicemi může být vysvětlen již uvedenou společnou kalibrační skupinou. Referenční přístroj dle hodnot jeho směrodatné odchylky zachytil více variabilní data než sensory, které mají výraznější změnu hodnoty odchylky pouze v několika hodinách, následně se vrací ke konstantním hodnotám.



Graf 17: Průběh průměrné koncentrace během dne pro aerosolové částice PM_{10} .

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala představením nových měřicích sensorů typu AQMesh pro monitorování kvality ovzduší, a především porovnáním výstupních dat z těchto přístrojů s daty z referenčních přístrojů, které poskytl ČHMÚ. Cílem bylo zhodnotit, jak sensory reálně pracují v terénu a okomentovat odlišnosti dat od výstupu z referenčního přístroje.

Sensory měly z velké části problémy při poskytování spolehlivých dat pro oxidy dusíku (NO_x) i pro oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2) a přízemní ozon (O_3). Data pro tyto polutanty se vyznačovala nejvyšší problémovostí s průměrně 39 % chybějících dat pro NO , 45 % chybějících dat pro NO_2 , 41 % chybějících dat pro NO_x a 35 % pro O_3 . Průměrný počet chybějících dat u CO nepřesáhl 10 %. Pro aerosolové částice PM_{10} data byla téměř kompletní, protože pouze 4 % dat chybělo z důvodu výpadku přístroje.

Problémy s poskytnutím dat pod mírou detekce u ozonu ale byly vykompenzovány přesností poskytnutých dat (průměrně $R^2 = 0,6$), což byla nejvyšší dosažená shoda měření s referenčním přístrojem ze všech polutantů. Sensory také zvládly měření koncentrace aerosolových částic PM_{10} s druhou nejvyšší přesností modelu $R^2 = 0,3$. Pro ostatní polutanty modely korelačních diagramů dosáhly hodnoty $R^2 < 0,1$.

Z výpočtu korelačních matic byly získány informace o reprodukovatelnosti měření jednotlivými sensory, které byly porovnávány mezi sebou. Byly potvrzeny nevýznamné, nebo minimální korelace sensorů, které měly vysoké procento chybějících dat. Nejvyšší korelace dat s minimální směrodatnou odchylkou korelačního koeficientu vykazovalo měření koncentrací oxidu uhelnatého ($\overline{R_{CO}}=0,9$) a aerosolových částic PM_{10} ($\overline{R_{PM10}}=0,9$). Významná shoda dat $R > 0,5$ se potvrdila u všech sensorů, při porovnávání v rámci měření každého polutantu jednotlivě.

Při výpočtu normalizované střední kvadratické odchylky bylo zjištěno, že mnohem nižší rozptyl hodnot vykazovaly sensory při měření přízemního ozonu, oxidu uhelnatého a aerosolových částic PM_{10} , kdy se jejich hodnoty nRMSE pohybovaly od 0,5 až do 1, což znamená nižší míru rozptylu dat, a tedy vyšší přesnost měření. Do skupiny s podstatně vyššími hodnotami nRMSE a tedy s nižší přesností měření, byla zařazena měření koncentrací oxidů dusíku, oxidu dusičitého, a oxidu dusnatého, jejichž hodnoty se pohybovaly od 3 až do 22.

Pro zjištění shody mezi sensory a referenčním přístrojem byly vypracovány grafy regresní závislosti a zjištěny hodnoty koeficientu determinace spolu s rovnicí směrnice přímky pro každý sensor a polutant zvlášť. Při porovnání s referenčními daty byla zjištěna minimální shoda dat koncentrací oxidu uhelnatého a oxidu dusnatého (průměrná hodnota koeficientu $R^2=0,01$), velmi podobných výsledků dosáhly i koeficienty determinace oxidů dusíku a oxidu dusičitého, kde nejvyšší shoda u NO_x byla průměrná hodnota koeficientu $R^2=0,03$ a pro NO_2 byla průměrná hodnota $R^2=0,05$. Úspěšnější shoda dat s koncentracemi z referenčního přístroje byla zjištěna u aerosolových částic PM_{10} s průměrnou hodnotou $R^2=0,3$ a nejvyšší shody s referenčními daty dosáhlo měření koncentrace přízemního ozonu s průměrnou hodnotou koeficientu determinace $R^2=0,6$. Dle umístění sensorů na lokalitě stanice, která měřila koncentrace oxidů dusíku, by ale výsledky měly být opačné, protože koncentrace ozonu se mohly v okolí sensoru a stanice více lišit z důvodu odlišných lokalit umístění, zatímco koncentrace oxidů dusíku nemohly být tolik odlišné, jak vykazují sensory.

Z regresních závislostí byla zjištěna přesnost- R^2 se blíží k 1 a správnost měření-hodnota směrnice přímky se blíží k 1. Čím více byla hodnota vzdálena od čísla 1, tím méně přesná a méně správná byla data poskytnuta sensory. Správná ($0,9x$), a i velmi přesná ($R^2=0,59$) data poskytnuly sensory v případě měření přízemního ozonu. Velmi správná ($0,7x$), ale bohužel dost nepřesná ($R^2=0,03$) data byla poskytnuta sensory při měření oxidu dusičitého. Podstatně méně přesná data ($R^2=0,34$), ale s nižší správností ($0,3x$) poskytly sensory při měření koncentrací aerosolových částic. Bohužel velmi nepřesná ($R^2=0,01$) a i méně správná ($<0,5x$) data v porovnání s daty referenčními byla poskytnuta pro koncentrace oxidu dusnatého. Velmi nízké přesností ($R^2=0,01$) a poměrně nízké správností ($0,3x$) dosáhla data koncentrací oxidů dusíku. Data velice nepřesná ($R^2=0,01$) a s minimální správností ($<0,1x$) byla poskytnuta sensory při měření oxidu uhelnatého.

Během týdenního chodu bylo zjištěno, že sensory se naměřenými koncentracemi nejvíce blížily referenční křivce u přízemního ozonu. Pouze sensor 7 se rapidně lišil naměřenou koncentrací, která byla až dvojnásobně vyšší. U týdenního chodu oxidu uhelnatého sensory dobře kopírovaly referenční křivku a grafické znázornění potvrdilo minimální odchylku měření mezi sensory. Celkově ale výrazně podhodnotily reálnou hodnotu koncentrace během celého týdne. Křivka oxidů dusíku se reálně naměřené koncentraci referenčního přístroje podobala minimálně. Všechny sensory výrazně nadhodnocovaly koncentrace s mnohem vyšší variací dat během jednotlivých dní v týdnu. Křivky koncentrací oxidu dusičitého ze sensorů už věrněji kopírovaly křivku referenčního přístroje a až na sensor 9 měly i nízké rozdíly mezi sebou.

Směrodatná odchylka ale byla u sensorů dost výrazná oproti minimální směrodatné odchylce referenčního přístroje a sensory mnohokrát nadhodnocovaly koncentrace. Křivky sensorů, které měřily koncentrace oxidu dusnatého, nezaznamenaly výraznější změny během týdne a stejně tak i referenční křivka. Sensory ale opět výrazně nadhodnotily reálné koncentrace polutantu a vykazovaly i mnohem vyšší variaci dat během jednotlivých dní. Opět dosti podhodnocená data poskytly sensory pro aerosolové částice PM_{10} . Změnu zaznamenala směrodatná odchylka sensorů, kdy byla naopak velmi nízká a odchylka referenčního přístroje byla výraznější, což indikuje větší variabilitu dat v jednotlivé dny u referenčního přístroje, zatímco sensory měřily data konstantně vysoká.

Denní cyklus přízemního ozonu sensory zaznamenaly téměř totožně, až na časově posunuté koncentrační maximum. Koncentrace naměřená sensorem 7 byla výrazněji nadhodnocena, jak už bylo zjištěno u týdenních chodů. Koncentrační křivky oxidu dusnatého velmi přesně kopírovaly křivku referenčního přístroje, jen ale s poloviční reálnou hodnotou koncentrace. Křivky koncentrací oxidů dusíku a oxidu dusičitého se s křivkou referenčního přístroje neshodovaly ani minimálně. Vykazovaly vysokou variaci dat, zatímco referenční přístroj zaznamenal konstantní hodnoty během jednotlivých hodin. Hodnoty ze 4 sensorů měřících koncentrace oxidu dusnatého zaznamenaly individuálně různé hodnoty maxima, což je zvláštní, když je z grafu evidentní, že začátkem i koncem dne se hodnoty koncentrací opět shodují s minimálním rozdílem mezi jednotlivými sensory, avšak koncentrace byla vyšší než reálně naměřená referenčním přístrojem. Taktéž každý sensor zaznamenal jinak variabilní data, což mělo za následek právě odlišné hodnoty denního koncentračního maxima. Variabilita dat z referenčního přístroje byla minimální. Sensory také velmi dobře kopírovaly referenční koncentrační křivku aerosolových částic PM_{10} jen s nižší variabilitou dat, která byla mnohem vyšší u referenčního přístroje. Sensory se rozdělily do dvou skupin po třech, při čemž obě skupiny měřily nižší koncentrace jen s rozdílem mezi sebou.

Celkově tedy sensory byly úspěšnější při měření koncentrací přízemního ozonu, a i aerosolových částic PM_{10} . Tato úspěšnost by mohla být vysvětlena i tím, že v Ostravském ovzduší je nadlimitní obsah těchto dvou polutantů a sensory mohou pracovat lépe při monitoringu vyšších koncentrací Oxidy dusíku se jevíly jako nejvíce problémové s velmi vysokou variabilitou dat a s nejmenší přesností. Taktéž velmi malou přesnost vykazovaly sensory při měření koncentrace oxidu uhelnatého, nicméně minimální odchylka mezi jednotlivými sensory je více než zajímavá a pokud by se zlepšila jejich přesnost měření, tak by dosahovaly vynikajících výsledků měření. Data poskytnutá pro tuto práci mají i další možnosti

podrobnějšího zpracování. Příkladem by byla závislost poskytnutých dat na okolních podmínkách (vlhkost, teplota), které byly poskytnuty spolu s daty koncentrací.

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.

Armbruster D. A., Pry T., (2008), *Limit of Blank, Limit of Detection and Limit of Quantitation*, The Clinical Biochemist Reviews, Pages 49–52

Braniš M., Hůnová I. (za kolektiv autorů) (2009), *Atmosféra a klima Atmosféra a klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší*, Nakladatelství Karolinum Počet stran: 352

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

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

Gao M., Cao J., Seto E., (2015), *A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Xi'an, China* Environmental Pollution, Volume 199 April, 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 I., Janoušková S., (2004), *Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší*, Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum, Praha

Kumar P., Morawska L., Martani C., Biskos G., Neophytou M., Di Sabatino S., Bell M., Norford L., Britter R., (2015), *The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities* Environment International 75 Pages 199-205

Lafuente R., García-Blázquez N., Jacquemin B., Angel Checa M., (2016), *Outdoor air pollution and sperm quality* Volume 106, Issue 4, 15 September, Pages 880–896

Lim S. S., on behalf of the GBD 2010 Comparative Risk Assessment Group, (2010), *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*, Lancet 380, Pages 2224–2260

Martuzzi M., Mitis F., Iavarone I., et Serinell M., (2006), „Health Impact of PM₁₀ and Ozone in 13 Italian Cities, WHO, (Copenhagen).

- Maznová J., Hůnová I., Vlček O., Hnilicová H., (2009), *Zlepšení metod hodnocení znečištění ovzduší částicemi PM₁₀ na území České republiky* Český hydrometeorologický ústav, Praha
- Meloun M., Militký J., (2004) *Statistická analýza experimentálních dat*, Academia (Akademie věd České republiky) ISBN 80-200-1254-0, Praha
- Nagao S., Taguchi K., Sakai H., Tanaka R., Horinouchi H., Watanabe H., (2014), *Carbon monoxide- bound hemoglobin-vesicles for the treatment of bleomycin-induced pulmonary fibrosis* Biomaterials Volume 35, Issue 24, , Pages 6553–6562
- Pokorná P., Hovorka J., Hopke P.K., (2016), *Elemental composition and source identification of very fine aerosol particles in a European air pollution hot-spot* Atmospheric Pollution Research 7, Pages 671-679
- Pokorná P., Hovorka J., Klán M., Hopke P.K., (2015) *Source apportionment of size resolved particulate matter at a European air pollution hot spot* Science of The Total Environment, Volume 502, 1 January, Pages 172-183
- Sillman S., (1999) *The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments* Atmospheric Environment Volume 33, Issue 12, 1 June, Pages 1821-1845
- Vossler T., Cernikovský L., Novak J., Placha H., Krejčí B., Nikolova I., Chalupnickova E., Williams R., (2015), *An investigation of local and regional sources of fine particulate matter in Ostrava, the Czech Republic* Atmospheric Pollution Research, Volume 6, Issue 3, Pages 454-463

Elektronické zdroje:

AQMesh Parameters – AQMesh. *AQMesh – AQMesh* [online]. Copyright © AQMesh Inc [cit. 23.07.2017]. Dostupné z: <http://www.aqmesh.com/product/parameters/>

Cambridge Enterprise, University of Cambridge. [online] Copyright © 2015 [cit. 25.02.2017]. Dostupné z: <https://www.enterprise.cam.ac.uk/case-studies/breathe-deep-new-sensors-offer-a-clearer-picture-of-urban-air-quality/>, zveřejněno na webu 2016

ČHMÚ 2017 *Aktuální přehled dat z automatizovaných stanic* [online]. [cit. 10. 2. 2017] Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/actual_hour_data_CZ.html

Operating manual, Resources – AQMesh. *AQMesh – AQMesh* [online] Copyright © AQMesh Inc. [cit. 23.03.2017]. Dostupné z: <http://www.aqmesh.com/wp-content/uploads/2016/07/OMAQM-MK3-5-Hardware.pdf>

Počet obyvatel ve správním obvodu statutárního města Ostravy — Ostrava. 2017 [online] [cit. 15. 1. 2017] Dostupné z: <https://www.ostrava.cz/cs/urad/hledam-informace/aktualni-informace/pocet-obyvatel-ve-spravnim-obvodu-statutarniho-mesta-ostravy>

Přehled stanic Portál ČHMÚ: Home. [online] Copyright ©. [cit. 28. 3. 2017] Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2015_enh/pdf/PrehledStanic.pdf

Souhrnný tabelární přehled ČHMÚ - Portál ČHMÚ : Home [online]. Copyright © [cit. 21.03.2017]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2015_enh/pdf/kom.pdf

WHO | Ambient (outdoor) air quality and health. *301 Moved Permanently* [online]. [cit. 27. 3. 2017] Dostupné z: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>