

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**OCENA ZANESLJIVOSTI NUMERIČNEGA MODELA ZA NAPOVEDOVANJE
VSEBNOSTI DELCEV PM10 V ZUNANJEM ZRAKU NA OBMOČJU SLOVENIJE**

DIPLOMSKO DELO

Lenka PAGON

Mentor: doc. dr. Klemen Bergant

Nova Gorica, 2014

IZJAVA

Izjavljam, da je diplomsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Rezultati, ki so nastali v okviru skupnega raziskovanja z drugimi raziskovalci, ali so jih prispevali drugi raziskovalci (strokovnjaki), so eksplicitno prikazani oziroma navedeni (citirani) v diplomskem delu.

Lenka Pagon

ZAHVALE

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Klemenu Bergantu, ki me je sprejel pod svoje profesionalno mentorstvo ter me s strokovnimi nasveti in prijazno potrpežljivostjo usmerjal med nastajanjem diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi univ. dipl. meteorol. Marku Rusu za pomoč pri analizi podatkov.

Hvala družini in prijateljem, ki so mi stali ob strani, me spodbujali in verjeli vame v času celotnega študija.

POVZETEK

V diplomskem delu sem ovrednotila zanesljivost modela CAMx za napovedovanje koncentracije delcev PM10 v zunanjem zraku na območju Slovenije. Analize temeljijo na primerjavi izmerjenih in napovedanih koncentracij pozimi 2012/2013 za Ljubljano, Maribor, Mursko Soboto, Celje, Trbovlje in Novo Gorico. Iskala sem vzroke za obdobja s povišanimi koncentracijami PM10 ter za odstopanja napovedi od izmerjenih vrednosti. Obdobja s povišanimi koncentracijami so sovpadala z razvojem temperaturnih obratov ter nizkimi temperaturami ob površju, ki pogojujejo izpuste iz malih kurišč. Konec obdobj je bil povezan s spremembo vremenskih razmer – povečana vetrovnost in/ali padavine. Preseganj dnevne mejne koncentracije PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) je bilo na vseh šestih merilnih mestih 176, CAMx jih je napovedal 233. Ujemanje napovedi z meritvami je bilo zadovoljivo za Ljubljano, Maribor, Celje in Trbovlje, čeprav je CAMx precenil število preseganj. Za Mursko Soboto je model CAMx izrazito podcenil koncentracije PM10, čeprav so bile vremenske razmere dobro napovedane. Vzrok za to je bodisi v nerealnem opisu izpustov v modelu CAMx ali v neprimerljivosti modelske točke in dejanskega kraja meritev. Tudi v primeru Nove Gorice je CAMx podcenil koncentracije PM10, kar je lahko posledica precenjene napovedi hitrosti vetra. V splošnem je bil CAMx uspešnejši pri napovedovanju koncentracije PM10 v kotlinah, kot na bolj odprtih krajih.

Ključne besede: kakovost zraka, delci PM10, meritve, napovedi, zanesljivost modela, zima 2012/2013, CAMx, ALADIN/SI, Leckel, TEOM

SUMMARY

In my Bachelor thesis, I evaluated the reliability of CAMx, a model, which was designed to predict PM10 particles concentration rate in outdoor air on various areas across Slovenia. The analysis is based on the comparison of measured and predicted PM10 concentrations for Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Celje, Trbovlje and Nova Gorica in winter 2012/2013. I looked for causes of episodes with higher PM10 concentrations and deviations of predictions when compared to measured values. Episodes with higher PM10 concentrations were linked to temperature inversions and lower surface temperatures that influence emissions from minor furnaces. The episodes ended during the changes of weather, especially at higher rainfalls and wind rate. There were 176 incidences of exceedancing daily PM10 concentration limit ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) when measuring, in compare 233 CAMx predicted incidences. The correlations between predictions and real measurements were sufficient for the areas of Ljubljana, Maribor, Celje and Trbovlje, although CAMx model overestimated the number of excesses. In the area of Murska Sobota, model CAMx distinctly underestimated the PM10 concentrations regardless of well predicted weather forecasts. The cause might lie in unrealistic emission descriptions in CAMx model and in incomparability of a model point and an actual location point. In the area of Nova Gorica, CAMx underestimated the PM10 concentrations as well. This might be a consequence of overvalued wind speed predictions. In general, CAMx model turned out to be more adequate at predictions of PM10 concentration rates in valleys and basins than on open locations.

Key words: air quality, PM10 particles, measurements, predictions, model adequacy, winter 2012/2013, CAMx, ALADIN/SI, Leckel, TEOM

KAZALO

1	UVOD.....	1
1.1	Raziskovalni problem	1
1.2	Namen dela	3
1.3	Delovne hipoteze	3
2	TEORETIČNE OSNOVE	3
2.1	Aerosoli.....	3
2.2	Vpliv aerosolov na zdravje	6
2.3	Meritve koncentracije delcev PM10 v Sloveniji.....	7
2.3.1	Referenčni merilnik Leckel – SEQ 47/50.....	7
2.3.2	Tehtanje filtrov	8
2.3.3	Merilnik TEOM (model 1400a)	9
2.3.4	Uporabljeni podatki o koncentracijah PM10 v Sloveniji	10
2.4	Prizemne meritve meteoroloških spremenljivk	10
2.4.1	Samodejne meteorološke postaje.....	11
2.4.2	Padavine	12
2.4.3	Veter.....	13
2.4.4	Temperatura zraka	14
2.4.5	Uporabljeni meteorološki podatki.....	14
2.5	Radiosondažne meritve.....	15
2.6	Numerični model za napovedovanje kakovosti zraka - CAMx.....	16
2.7	Numerični model za napovedovanje vremena - ALADIN/SI	17
2.8	Ovrednotenje zanesljivosti numeričnega sistema ALADIN-CAMx pri napovedovanju koncentracij PM10	18
3	REZULTATI IN RAZPRAVA.....	19
3.1	Obdobja z povišanimi koncentracijami PM10 na merilnem mestu Ljubljana.....	19
3.2	Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času povišanih koncentracij PM10.....	20
3.2.1	Obdobje od 09.12.2012 do 16.12.2012.....	21
3.2.2	Obdobje od 19.12.2012 do 23.12.2012.....	22
3.2.3	Obdobje od 30.12.2012 do 05.01.2013.....	23
3.2.4	Obdobje od 25.01.2013 do 30.01.2013.....	24
3.2.5	Obdobje od 10.02.2013 do 20.02.2013.....	25
3.2.6	Obdobje od 23.02.2013 do 01.03.2013.....	26
3.2.7	Obdobje od 03.03.2013 do 07.03.2013.....	27

3.3 Podrobnejša analiza meritev kakovosti zraka na stalnih merilnih mestih in napovedi z modelom CAMx za obdobje od 1. decembra 2012 (dan 1) do 30. marca 2013 (dan 121).....	28
3.3.1 Ljubljana.....	28
3.3.2 Maribor.....	31
3.3.3 Murska Sobota.....	35
3.3.4 Celje.....	39
3.3.5 Nova Gorica.....	43
3.3.6 Trbovlje.....	45
3.4 Povzetek razmer v zimi 2012/2013.....	48
4 ZAKLJUČKI.....	49
5 VIRI.....	51
PRILOGE (ANNEXES)	

SEZNAM SLIK

Slika 1: Tipične velikosti delcev in njihova opredelitev (Hinds W.C., 1999).....	5
Slika 2: Velikost delcev PM10 in PM2,5 – za primerjavo je zraven prikazan človeški las (arb.ca.gov, 2009).....	5
Slika 3: Shematični prikaz delovanja (levo) in fotografija merilnika Leckel – SEQ 47/50 (desno) (Leckel S., 2008).....	8
Slika 4: Merilnik TEOM (model 1400a) (Bolte T., 2009)	9
Slika 5: Mreža samodejnih postaj za merjenje kakovosti zunanjega zraka in padavin (obkrožena so merilna mesta, katerih podatke sem uporabila v diplomski nalogi) (Atlas okolja, 2014).....	11
Slika 6: Ekološka postaja Murska Sobota (Atlas okolja, 2014)	12
Slika 7: Tehtalni ombrometer za merjenje padavin (levo) in ombrometer na prekucno posodo (desno) (meteolab, 2014).....	13
Slika 8: Primer ultrazvočnega anemometra (levo) in anemometra na vrtljive čaše (desno) skupaj z vetrokazom (sredina) (meteolab, 2014).....	13
Slika 9: Radiosonda v zraku in posamezni senzorji (Radiosonde museum, 2014)	15
Slika 10: Radiosonda (MeteoModem, 2014)	15
Slika 11: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 09.12.2012 do 16.12.2012.....	21
Slika 12: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 19.12.2012 do 23.12.2012.....	22
Slika 13: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 30.12.2012 do 05.01.2013.....	23
Slika 14: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 25.01.2013 do 30.01.2013.....	24
Slika 15: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 10.02.2013 do 20.02.2013.....	25
Slika 16: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 23.02.2013 do 01.03.2013.....	26
Slika 17: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 03.03.2013 do 07.03.2013.....	27
Slika 18: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Ljubljani v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	28
Slika 19: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Ljubljani v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	30
Slika 20: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Mariboru v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	31
Slika 21: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Mariboru v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	34
Slika 22: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Murski Soboti v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	35
Slika 23: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Murski Soboti v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	38
Slika 24: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Celju v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....	39

<i>Slika 25: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Celju v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 26: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Novi Gorici v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 27: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Novi Gorici v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 28: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Trbovljah v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 29: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Trbovljah v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013.....</i>	<i>47</i>

SEZNAM PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Vpliv kemikalij na zdravje ljudi (WHO. Environmental Health Criteria Documents).....</i>	<i>6</i>
<i>Preglednica 2: Izbrana merilna mesta s podatki o koncentracijah PM10, temperaturi zraka, hitrosti vetra in padavinah skupaj s pripadajočimi geografskimi podatki ter uporabljenimi merilniki.....</i>	<i>10</i>
<i>Preglednica 3: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Ljubljana skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju.....</i>	<i>19</i>
<i>Preglednica 4: Pregled obdobj s izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Maribor skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju.....</i>	<i>32</i>
<i>Preglednica 5: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar in februar 2013 na merilnem mestu Murska Sobota skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju.....</i>	<i>36</i>
<i>Preglednica 6: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Celje skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju.....</i>	<i>40</i>
<i>Preglednica 7: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Trbovlje skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju.....</i>	<i>46</i>
<i>Preglednica 8: Število preseganj dnevne mejne koncentracije v celotnem štirimesečnem obdobju na vseh merilnih mestih, napovedanih koncentracij z modelom CAMx in izmerjenih z merilnikom Leckel.....</i>	<i>49</i>

SEZNAM OKRAJŠAV

ALADIN	numerični model za napovedovanje vremena na omejenem območju (fr. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational)
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
EEA	Evropska okoljska agencija (angl. European Environment Agency)
GPS	globalni sistem pozicioniranja (angl. Global Positioning System)
mnv	metrov nadmorske višine
NIJZ	Nacionalni Inštitut za Javno Zdravje
PM10	delci s premerom 10 mikrometrov ali manj (angl. Particulate Matter 10)
PM2,5	delci s premerom 2,5 mikrometra ali manj (angl. Particulate Matter 2,5)
UTC	univerzalni koordinatni čas (fr. Temps Universel Coordonné)
WHO	Svetovna zdravstvena organizacija (angl. World Health Organization)

SEZNAM SIMBOLOV

c	koncentracija [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], koncentracija delcev PM10/PM2,5 pri pogojih vzorčenja
F	pretok [m^3/h], pretok zraka
m_v	masa [μg], masa filtra po vzorčenju
m_p	masa [μg], masa filtra pred vzorčenjem
t	čas [h], čas vzorčenja
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	merska enota za koncentracijo – mikrogram na kubični meter (zraka)
μm	merska enota za dolžino – mikrometer oziroma ena milijoninka metra

1 UVOD

1.1 Raziskovalni problem

Zaradi prepleta značilnih vremenskih razmer in razgibanosti terena ter posebnosti v virih onesnaževal je onesnaženost zraka v Sloveniji pereč problem. V poletnem času prevladujejo težave s prizemnim ozonom, v zimskem času z delci manjšimi od 10 μm . Slednjim običajno botrujejo stabilne vremenske razmere s temperaturnim obratom in posledično slabim mešanjem zraka. V takšnih pogojih že manjši izpusti lahko povzročijo visoke koncentracije onesnaževal v zunanjem zraku. Onesnaženost zraka stopnjujejo male kurilne naprave (velik delež gospodinjstev se ogreva z biomaso) ter gost tranzitni in lokalni promet. Kot kažejo meritve Agencije Republike Slovenije za okolje (Bolte T. in sod., 2013) ter analiza Evropske okoljske agencije (Poročilo EEA, 2013), je Slovenija v evropskem merilu med državami z najbolj onesnaženim zrakom, glede ozona na prvem mestu in glede delcev PM10 na petem mestu.

Onesnažen zrak je eden glavnih okoljskih dejavnikov tveganja za zdravje. Ocena Svetovne zdravstvene organizacije (WHO) kaže, da zaradi onesnaženega zraka po svetu vsako leto prezgodaj umre okoli 2 milijona ljudi. Prebivalci EU so najbolj izpostavljeni prašnim delcem, ozonu in policikličnim aromatskim ogljikovodikom. Življenjska doba prebivalcev Ljubljane naj bi bila zaradi onesnaženosti zraka krajša za kar 14,5 mesecev (smo na tretjem mestu, pred nami sta mesti Budimpešta in Bukarešta) (Pohar M., 2014).

V diplomski nalogi se bom posvetila problematiki onesnaženosti z delci PM10 in z možnostjo napovedovanja njihove vsebnosti v zunanjem zraku na območju Slovenije s pomočjo fotokemijskega disperzijskega modela. Kadar govorimo o onesnaženosti zraka z delci, imamo v mislih mikroskopske trdne delce (angl. Particulate Matter–PM), ki lebdi v zraku. Med onesnaževala, ki se pojavljajo v obliki delcev, uvrščamo morsko sol, črni ogljik (saje), prah in kondenzirane delce iz določenih kemikalij, kot so: dušikov dioksid (NO_2), dušikovi oksidi (NO_x), žveplov dioksid (SO_2), benzo-a-piren (BaP) (Poročilo EEA, 2013).

Poleg vpliva na zmanjšano vidnost ter na podnebje (slabijo namreč kratkovalovno sončno sevanje, vpijajo dolgovalovno sevanje površja in predstavljajo jedra za nastanek občasnih kapljic in kristalov) delci škodijo tudi zdravju ljudi, vegetaciji in nasploh predstavljajo obremenitev za okolje. Povečujejo namreč umrljivost zaradi bolezni dihal (draženje, vnetje in okužbe dihal, astma in zmanjšano delovanje pljuč, kronična obstruktivna pljučna bolezen, pljučni rak) ter bolezni srca in ožilja (motnje srčnega ritma, arterioskleroza, povišan krvni tlak, vpliv na strjevanje krvi, infarkt). Škodljivost delcev je še večja, če vsebujejo težke kovine. Dokazano je, da prisotnost cinka v delcih poveča moč vnetja, stopnjo odmiranja tkiv in preobčutljivosti pljuč (NIJZ, 2010). Večina raziskav v zadnjem desetletju je bila usmerjena v delce, manjše od 10 μm (PM10). Ti delci prodrejo v zgornja in srednja dihalna. Delci manjši od 2,5 μm (PM2,5) prodrejo v pljuča, v področje izmenjave plinov. Najmanjši delci, manjši od 0,1 μm , ki jim pravimo nanodelci, pa prodrejo v krvni obtok in potujejo po celotnem organizmu in so zdravju najbolj škodljivi (Pohar M., 2014).

Po zadnjih podatkih o bolnišničnih sprejemih otrok predstavljajo sprejemi zaradi bolezni dihal približno 15 % vseh sprejemov. Vzrok za tako visok odstotek bolnišničnih sprejemov otrok zaradi bolezni dihal gre iskati tudi v dejstvu, da povprečna letna mejna

koncentracija PM10 za varovanje zdravja ljudi po priporočilih WHO znaša $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, EU pa postavlja mejo $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ARSO/KOS, 2013).

V EU državah je bilo leta 2011 okoli 33 % mestne populacije izpostavljene presežku dnevne mejne vrednosti PM10, ki znaša $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Poročilo EEA, 2013). Podatek, da je zaradi prezgodnje smrti leta 2012 umrlo 3,7 milijonov ljudi po vsem svetu zaradi prevelike onesnaženosti zraka, je zastrašujoč. Do 88 % teh prezgodnjih smrti je prišlo v državah z nizkimi in srednjimi dohodki (zahodni Pacifik in severovzhodna Azija) (WHO, 2014).

Zakonodaja EU določa ukrepe za obvladovanje in izboljševanje kakovosti zraka tudi na področju onesnaženosti z delci PM10. Krovni dokument je Direktiva EU 2008/50/ES, ki zahteva postopno vpeljavo novejših tehnik ocenjevanja kakovosti zraka in poročanje o že zaznanih ter predvidenih učinkih ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka. Direktivo v slovenski pravni red deloma prenaša Uredba o kakovosti zunanega zraka (Uradni list RS št. 9/2011), ki določa standarde kakovosti zunanega zraka, način obveščanja javnosti ob preseganju mejnih vrednosti in obveznost priprave načrtov za ohranjanje in izboljšanje kakovosti zunanega zraka na degradiranih območjih. Omenjeni načrti so bili sprejeti za vseh predlaganih sedem degradiranih območij v Sloveniji. Prvi odlok o načrtu za kakovost zraka je bil sprejet 24.10.2013 (Uradni list RS, št. 88/13) in sicer na območju Mestne občine Murska Sobota. Sledili so odloki za območje Zasavja, območje Mestnih občin Novo Mesto, Maribor, Kranj in Celje (Uradni list RS, št. 108/13). Zadnji, sedmi odlok, je začel veljati na območju Mestne občine Ljubljana dne 4.4.2014 (Uradni list RS, št. 24/14).

ARSO je v skladu z zahtevo iz odlokov s 1.1.2014 pričela z napovedovanjem čezmerne onesnaženosti zunanega zraka z delci PM10 za dva dni vnaprej. Z namenom zanesljivejšega napovedovanja onesnaženosti zraka je ARSO v sodelovanju s Fakulteto za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani vzpostavila sistem za napovedovanje kakovosti zraka, v katerem je fotokemijski disperzijski model CAMx (ENVIRON, 2013; Koo in sod., 2009) gnezden/sklopljen v model ALADIN/SI, ki služi za napovedovanje vremena na omejenem območju (Pristov N. in sod., 2012). Poleg meteoroloških podatkov, ki jih pridobimo iz modela ALADIN/SI, dodaten vhod v CAMx predstavljajo podatki o človekovih (ploskovni in točkovni viri) in biogenih emisijah, kemijski robni pogoji, podatki o rabi tal, stolpec ozona in indeks listne površine (Rus M. in sod., 2011). Sistem CAMx je pred vpeljavo v operativno napovedovanje kakovosti zraka na ARSO, predvsem za potrebe napovedovanja onesnaženosti zunanega zraka z delci PM10 kot tudi z ozonom.

Ker je vsak model le približen opis dejanskih procesov v naravi, je potrebno kakovost modelov preveriti oziroma ustrezno ovrednotiti. Tako je tudi v primeru sklopitve modelov CAMx in ALADIN. Zaradi vse večjega zavedanja o problematiki kakovosti zraka je bila v zadnjih treh desetletjih posvečena velika pozornost razvoju modelov za napovedovanje zraka. Šele zadnjih nekaj let se skuša k vrednotenju modelov za napovedovanje kakovosti zraka pristopiti sistematično (Rao T.S. in sod., 2011). Osnovni korak pri vrednotenju kakovosti modelov je primerjava modelskih rezultatov z razpoložljivimi meritvami, kar vključuje tako meritve koncentracij izbranih onesnaževal, njihovih izpustov kot tudi meteoroloških in drugih relevantnih spremenljivk (Dennis R. in sod., 2010).

Za naše potrebe je bil na ARSO izveden testni zagon modela za obdobje od decembra 2012 do marca 2013. V okviru diplomske naloge je na podlagi pridobljenih modelskih izračunov in razpoložljivih meritev ovrednotena zanesljivost modela CAMx pri napovedovanju onesnaženosti zunanega zraka z delci PM10 na območju Slovenije.

1.2 Namen dela

Osnovni namen diplomskega dela je ovrednotiti zanesljivost modela ALADIN-CAMx pri napovedovanju koncentracije delcev PM10 v zraku na območju Slovenije, še posebej ob vremenskih situacijah, ki privedejo do obdobj s povišanimi koncentracijami delcev v zunanjem zraku.

1.3 Delovne hipoteze

1. Obdobja z visokimi koncentracijami delcev PM10 v zunanjem zraku sledijo daljšim (nekajdnevnim) obdobjem stabilnega vremena in se prekinajo s spremembo vremenske situacije.
2. Model CAMx v večini primerov zadovoljivo opiše koncentracije delcev PM10 v zunanjem zraku v obdobjih s povečano onesnaženostjo zraka na območju Slovenije.
3. V primeru precejšnjih odstopanj ocen modela CAMx od izmerjenih vrednosti koncentracij delcev PM10 v zunanjem zraku je to povezano:
 - z nezanesljivo numerično napovedjo vremena (ALADIN/SI), ki je osnova za modeliranje koncentracije delcev;
 - z lokalno spremenljivostjo koncentracij delcev, saj modelski rezultati predstavljajo povprečno vrednost v računski celici, meritve pa vrednosti v določeni točki;
 - s pomanjkljivostmi v emisijski bazi, ker so določeni viri pomanjkljivo oziroma neustrezno predstavljeni ali celo izpuščeni;
 - z napakami, povezanimi z merilno metodo za določanje koncentracij delcev na izbranem merilnem mestu.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Aerosoli

Aerosoli so drobni trdni ali tekoči delci naravnega ali človekovega izvora, ki lebdijo v ozračju in v celotnem okolju. Poznamo jih v različnih oblikah kot so prah, dim, smog ali megla in oblačne kapljice. Aerosoli vplivajo na vidnost, klimo ter naše zdravje in kakovost življenja (Hinds W.C., 1999). Onesnaženost zraka z delci je v Evropi pereč problem, še posebej zaradi delcev manjših od 10 μm . Večinoma je sestava delcev v onesnaženem zraku različna: sulfat (SO_4^{2-}), nitrat (NO_3^-), amonij (NH_4^+), različne kovine (kadmij, arzen, nikelj, svinec) ter ogljik v organski in anorganski obliki (Bolte T. in sod., 2013).

Kadar gre za izpuste delcev v ozračje iz virov na površini, govorimo o primarnih delcih, medtem, ko sekundarni delci nastanejo kot posledica različnih pretvorb v onesnaženi atmosferi (Bolte T. in sod., 2013).

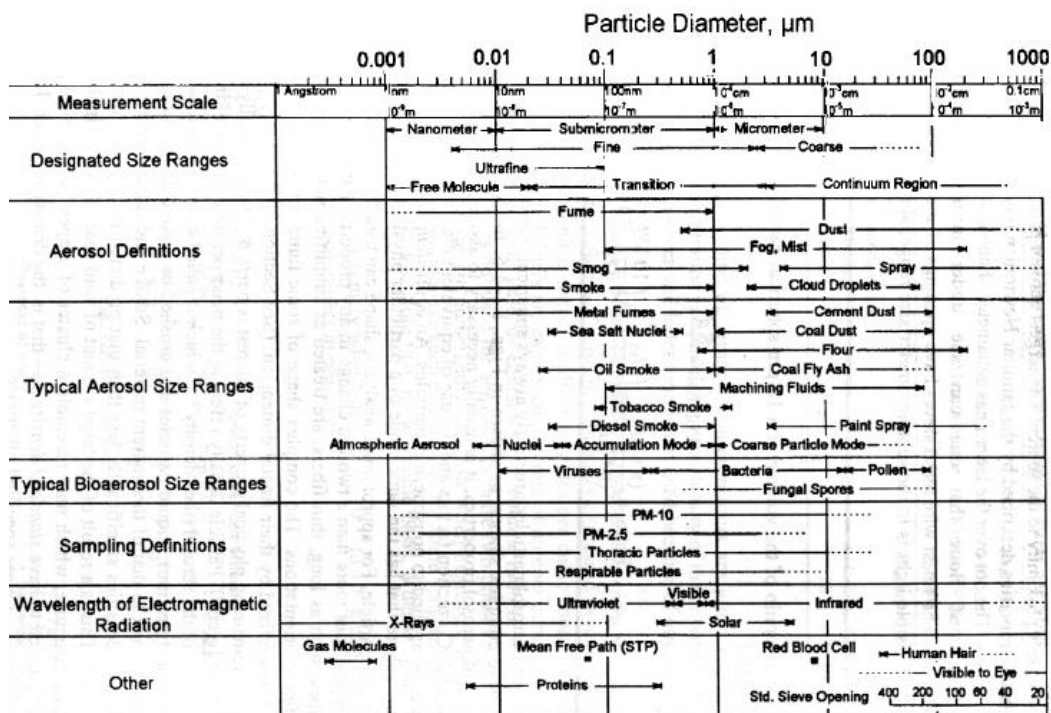
Med delce naravnega izvora štejemo meglene in oblačne kapljice (1-40 μm), različne bakterije (1-15 μm), cvetni prah (20-60 μm), puščavski pesek, morsko sol, dim gozdnih požarov, meteorski prah, vulkanski pepel ipd (Bolte T. in sod., 2013).

Antropogeni aerosoli so posledica človekovih dejavnosti (energetski objekti, industrija, promet, poljedelstvo, individualna kurišča). Takšni primeri so cementni prah (10-150 μm), pepel (3-80 μm), kremenčev in azbestni prah (od nekaj nanometrov pa tudi do 200 μm), oljni (0,03-1 μm) in tobačni dimi (0,01-0,15 μm) ter za zdravje najbolj zaskrbljujoči radioaktivni aerosoli (0,1-20 μm) (Bolte T. in sod., 2013). Poleg tega, da pogosto predstavljajo tveganje za naše zdravje, aerosoli vplivajo tudi na klimo in okolje.

Dokazano je, da sulfatni aerosol, ki večinoma izvira iz žveplovega dioksida, katerega glavni vir so energetika, industrija in promet, spremeni optične lastnosti ozračja. Zaradi tega aerosola se poveča količina odbitega sončnega sevanja. Tako manj sončne energije pride do tal in Zemlja se skupaj z ozračjem zato manj segreva kot bi se, če teh aerosolov ne bi bilo (Reynolds R., 2004). Po drugi strani pa nekateri aerosoli, npr. črni ogljik, dobro vpijajo dolgovalovno sevanje ozračja in s tem pozitivno prispevajo k segrevanju. Delci namreč prestrežejo sevanje in takoj oddajo toploto bližnjim molekulam, ki sicer same prepuščajo sončne žarke. Torej šele aerosoli omogočijo otoplitev okolice. Zaradi te dvojne vloge aerosolov so ocene njihovega vpliva na podnebne spremembe izredno negotove (IPCC, 2013).

Drobne delce (angl. fine particles) tvorijo delci smoga (angl. accumulation mode) in delci, ki nastanejo v atmosferi s pretvorbo »plin-v-delec« skupaj z delci, ki nastanejo kot produkt izgorevanja in se oddajajo neposredno v ozračje (angl. nuclei mode). Ti so večinoma v velikosti pod 1 μm (10^{-6} m). Grobe delce (angl. coarse particles) najdemo v prahu, ki ga prenaša veter, v morskem pršcu in v območjih obratujočih kamnolomov ter kmetijskih obdelovalnih površin. Nastanejo na zemeljski površini in so večinoma večji od 1 μm (PM_{1,0}). Sem štejemo tudi nekatere bioaerosole, npr. glivične spore in cvetni prah, katerih izvor je vegetacija. Zaradi velikosti grobih delcev je njihov vpliv na površje manjši (zlahka se usedajo). Njihova življenjska doba v ozračju je le nekaj ur ali dni. Med bioaerosole sodijo tudi virusi in bakterije (Hinds W.C., 1999).

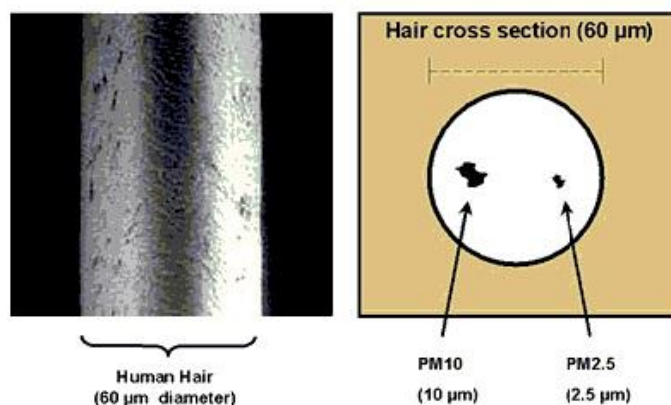
Delci, ki nastanejo pri gorenju, se lahko nahajajo v obeh velikostnih razredih. Delci različnega izvora so različne kemijske sestave in prav tako različnih oblik in različnih fizikalnih stanj. Nadaljnjo besedilo povzeto po Bolte T. in sod., 2013.



Slika 1: Tipične velikosti delcev in njihova opredelitev (Hinds W.C., 1999)

Določitev velikosti delcev je eden najpomembnejših elementov pri meritvah in pri modeliranju dinamike aerosola. Tipične velikosti oziroma premeri delcev so podani na sliki 1. Premer delcev največkrat opišemo z izrazom »aerodinamični premer«, ki je določen kot premer okroglega delca z gostoto 1 g/cm^3 . To pomeni, da se v zraku obnaša kot vodna kapljica določenega premera. Delci enake oblike in velikosti, toda različne gostote, imajo različen aerodinamični premer. Na podlagi aerodinamičnega premera ločimo delce:

- PM10 – delci z aerodinamičnim premerom pod $10 \mu\text{m}$,
- PM2,5 – delci z aerodinamičnim premerom pod $2,5 \mu\text{m}$,
- PM1,0 – delci z aerodinamičnim premerom pod $1 \mu\text{m}$,
- UFP – nanodelci (zelo fini delci) z aerodinamičnim premerom pod $0,1 \mu\text{m}$.



Slika 2: Velikost delcev PM10 in PM2,5 – za primerjavo je zraven prikazan človeški las (arb.ca.gov, 2009)

Na sliki 2 je prikazana velikost tipičnega delca PM10 in PM2,5 v primerjavi z debelino človeškega lasu. V glavnem velja, da se manjši delci zadržujejo v zraku dalj časa. Večji delci (večji od PM10) se zadržujejo v atmosferi nekaj ur, medtem ko manjši delci (manjši od PM1) lahko ostanejo v atmosferi več tednov in se odstranijo iz atmosfere s padavinami ali prerazporedijo z vetrom.

Nekateri aerosoli so obstojni le nekaj sekund, drugi lahko tudi leto ali več (Hinds W.C., 1999).

2.2 Vpliv aerosolov na zdravje

Manjši kot so delci, globlje prodrejo v dihalne poti. Znano je, da prašni delci PM10 prodrejo tudi v pljučne mešičke, saj je premer terminalnih bronhiol 10 µm. Iz tega razloga je posvečena tolikšna pozornost v stroki prav prašnim delcem PM10 in manjšim, kajti ravno ti manjši delci od tam lahko prehajajo skozi krvno-zračno pregrado ter nazadnje pridejo do ciljnih organov. Vnetna reakcija na mestu vstopa (pljuča) lahko dodatno poslabša obstoječo bolezen dihal (Vudrag M., 2014).

Nanodelci (UFP) so vsi prašni delci, velikosti 0,1 µm (100 nanometrov) in manj. Škodljivi učinki so izrazitejši pri izpostavljenosti nanodelcem in so: rakotvornost (kancerogenost), mutacija celic, poškodba organov in reproduktivna škoda. Ocene vplivov mnogih snovi - predvsem kemikalij - na zdravje ljudi (preglednica 1) so objavljene v dokumentih WHO. Vse te snovi se praviloma vnesejo v telo s prašnimi (PM10, PM2,5) ali nano delci (WHO. Environmental Health Criteria Documents).

Preglednica 1: Vpliv kemikalij na zdravje ljudi (WHO. Environmental Health Criteria Documents)

VPLIV NA ZDRAVJE	OBČUTLJIVA SKUPINA	GLAVNE KEMIKALIJE
rak	odvisno od spola in starosti, mladostniki, otroci	azbest, PAH, nitro-PAH, benzen, nekatere kovine, radon, naravni toksini, dioksin, hormonski motilci
bolezni srca in ožilja	starejši	PM10 (respirabilni delci), CO, As, Pb, Cd, Co
bolezni dihal	otroci, astmatiki	PM10, SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , Ni, Cr
alergije in preobčutljivost	otroci, astmatiki	PM10, O ₃ , Ni, Cr
razmnoževanje	zarodek, mladi	PCB, DDT, dioksini, ftalati, Pb, Hg
motnje živčnega sistema	zarodek, otroci	Metil-Hg, Pb, Mn, Al, organska topila, dioksini, PCB
osteoporoza	starejši	Pb, Cd, Al, Se, hormonski motilci

V veliki večini delcev je glavna sestavina amorfn ogljik (saje), na tega pa se lahko vežejo številne primesi. Kovine, kot so železo in baker, poškodujejo dedni material in povzročijo vnetja. V eni od raziskav so dokazali, da prisotnost cinka v delcih poveča stopnjo odmiranja pljučnega tkiva (nekroze) in preobčutljivost pljuč. Organska topila, ki so sestavni del delcev, pa poškodujejo dedni material in so rakotvorna. Sposobnost

delcev, da povzročijo oksidativni stres in vnetno reakcijo (nastanek citokinov, maščobno peroksidacijo), je odvisna od velikosti delcev. Delci, manjši od 2,5 μm , so bolj škodljivi (Bolte T. in sod., 2013).

Odnos med koncentracijo delcev in povečanim tveganjem za umrljivostjo je premosorazmeren: pri povprečni letni vrednosti PM10 koncentracije 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se stopnja umrljivosti poveča za dobra 2 % (Katsouyanni K. in sod., 1996).

Zaradi škodljivih učinkov aerosolov, ki so posledica človekovih dejavnosti, je ključnega pomena poznavanje njihovih koncentracij v ozračju, saj na podlagi tega lahko izvajamo trenutne in dolgoročne ukrepe za zmanjševanje tveganja za človekovo zdravje in okolje nasploh. V Sloveniji se sistematično izvajajo meritve delcev PM10, postopoma pa se uvajajo tudi meritve delcev PM2,5. Prvim je posvečena vsa pozornost v nadaljevanju diplomskega dela.

2.3 Meritve koncentracije delcev PM10 v Sloveniji

Za meritve koncentracije delcev PM10 v zunanjem zraku so na razpolago različne metode. V skladu s Pravilnikom o monitoringu kakovosti zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 36/2007) je potrebno meritve zunanjega zraka izvajati z referenčno metodo. Slovenija izvaja meritve koncentracije delcev PM10 na različnih mestih, ki so vključena v državno merilno mrežo za kakovost zraka. Meritve se izvajajo z referenčnimi merilniki Leckel in merilniki TEOM. Opis obeh merilnih metod v nadaljevanju je povzet po Bolte T., 2009.

TEOM (kratica za angleški izraz »Tempared Oscilating Microbalance«) merilnik nam sproti posreduje povprečne polurne podatke o koncentraciji delcev PM10, iz katerih se nato izračunavajo urna in dnevna povprečja. Z referenčnim merilnikom Leckel pa dobimo le podatek o povprečni dnevni koncentraciji delcev PM10. Pri TEOM merilniku prihaja do napake zaradi izhlapevanja lahkih organskih snovi, saj je zajemna cev merilnika greta na 50 °C. Zato je potrebno za TEOM merilnike določiti korekcijske faktorje, ki jih ocenimo na podlagi primerjalnih meritev z enim od referenčnih merilnikov. V našem primeru to pomeni uporabo primerjalnih meritev z referenčnim merilnikom Leckel.

2.3.1 Referenčni merilnik Leckel – SEQ 47/50

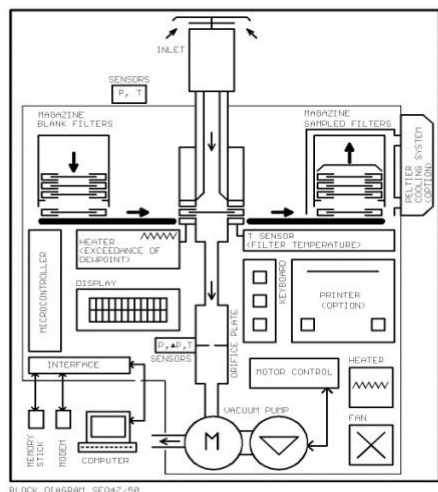
Kot referenčni merilnik koncentracij delcev PM10 se v Sloveniji uporablja merilnik Leckel – SEQ 47/50 (slika 3), (Leckel S., 2008 in Enviro Technology Services plc., 2014).

Pri tem merilniku se kot medij za vzorčenje uporablja filter, skozi katerega je speljan zunanji zrak. V primeru, da določamo le maso oziroma koncentracijo delcev, uporabljamo steklene filtre premera 47 ali 50 mm. Merilnik Leckel ima ohišje iz nerjavečega jekla, v katerega je nameščena vakuumska črpalka z nastavljivim pretokom, šaržerjem z nastavki za čiste filtre in šaržerjem, kjer se zbirajo že vzorčeni filtri. Izven ohišja sta nameščena senzorja za merjenje temperature in zračnega tlaka.

Gre za merilnik z nizkim volumskim pretokom (angl. Low Volume Sampler–LVS) in je namenjen zunanjim meritvam pri vseh temperaturah in pogojih okolja. V šaržerju je 15

filtru (novejša izvedba merilnikov jih ima 17), ki jih vzorčevalnik sam menja ob datumu in uri, ki ju nastavimo. Najkrajši možen čas vzorčenja na enem filtru je 1 ura, najdaljši pa 168 ur. Običajen čas vzorčenja je 24 ur. Celoten vzorčevalni sistem se hladi s tokom zraka. Temperatura zraka, ki ga vzorčimo, se meri neposredno za filtrom, ko je le-ta v položaju vzorčenja. Če temperatura v zimskem obdobju pade pod točko rosišča, se filter ogreva, da ne pride do kondenzacije znotraj merilnika.

Filtre na merilnem mestu zamenjajo z novimi vsakih 14 dni in prinesejo v Kemijski analitski laboratorij ARSO, kjer se izvajajo nadaljnje analize (Koleša T., 2010).



Slika 3: Shematični prikaz delovanja (levo) in fotografija merilnika Leckel – SEQ 47/50 (desno) (Leckel S., 2008)

2.3.2 Tehtanje filtrov

Koncentracijo delcev PM₁₀ in PM_{2,5} se je med letoma 2012 in 2013 še določalo v skladu s standardom SIST EN 12341:2000 (Določevanje frakcije PM₁₀ lebdečih trdnih delcev – Referenčna metoda in terenski preskusni postopek za potrditev ustreznosti merilnih metod) in standardom SIST EN 14907:2005 (Standardna gravimetrijska metoda za določevanje masne frakcije PM_{2,5} lebdečih delcev). Kot medij za zbiranje delcev uporabljamo steklene ali kvarčne filtre. Filtri so premera 47, 50 ali 150 mm. Steklene filtre uporabljamo, če potrebujemo le koncentracijo delcev, kvarčne pa, če se izvaja tudi kemijska analiza delcev PM. Filtre tehtamo v tehtalnem prostoru pri konstantni temperaturi in vlagi. V tehtalnici filtre pregledamo in poškodovane filtre zavržemo. Filtre vsaj 48 ur kondicioniramo pri temperaturi (20 ± 1 °C) in relativni vlagi (45 % - 50 %). Za tehtanje uporabljamo mikro tehtnico z najmanjšim razdelkom 0,000001 g (10⁻⁶). Vsak filter stehtamo dvakrat. Na ta način preverimo, ali je čas kondicioniranja ustrezen. Stehtane filtre shranimo v označene nosilce za filtre in jih v prenosnih torbah odnesemo na vzorčevalno mesto. Čas vzorčenja je 24 ur, pri pretoku 2,3 m³/h. Po vzorčenju filtre vsaj 48 ur kondicioniramo pri kontrolirani temperaturi in vlagi, nato jih stehtamo. Koncentracijo delcev PM izračunamo po enačbi (1):

$$c [\mu\text{g}/\text{m}^3] = (m_v - m_p) / (F * t) \quad (1)$$

Rezultat podajamo v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kjer je volumen zraka volumen pri zunanjih pogojih v času vzorčenja. Kakovost rezultatov zagotavljamo s kontroliranimi pogoji v tehtalnem prostoru, z uporabo kontrolne uteži, z uporabo slepih terenskih in laboratorijskih filtrov ter z rednim vzdrževanjem vzorčevalnikov in mikro tehtnice (Kranjc I., 2014).

2.3.3 Merilnik TEOM (model 1400a)

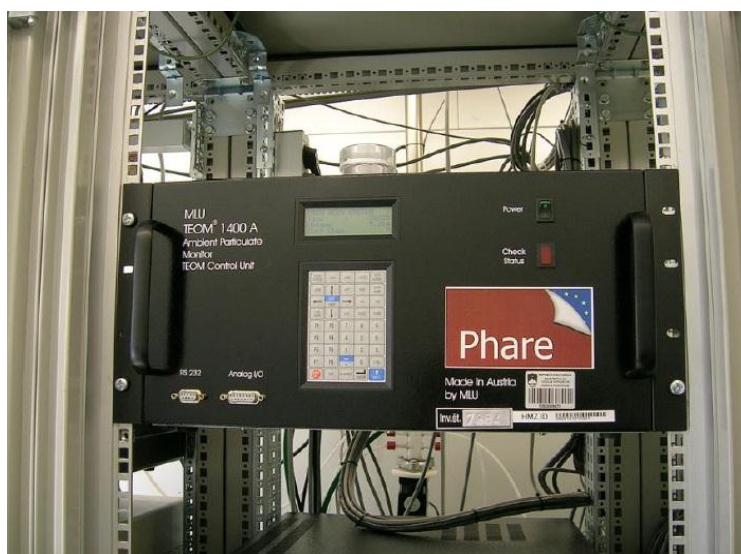
TEOM (slika 4) je merilnik za sprotno spremljanje koncentracije delcev z aerodinamičnim premerom, manjšim od 10 μm . Meri maso delcev suspendiranih v zraku. Visoko občutljiv masni razločevalnik ob znanem pretoku zraka omogoča meritve masne koncentracije, masnega razmerja in celotne mase delcev na filtru pri stalnih pogojih. Merilno območje instrumenta je od 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do nekaj g/m^3 .

Merilnik je sestavljen iz dveh glavnih delov, TEOM senzorske enote in TEOM kontrolne enote. Senzorska enota omogoča merjenje skupne mase nakopičenih delcev PM10 na sistemskem menjalnem filtru. Ob stalnem pretoku zraka 3 l/min skozi instrument in merjenju skupne mase delcev lahko izračunamo masno koncentracijo zajetega vzorca.

Meritve mase delcev se izvajajo na principu merjenja spremembe frekvence oscilirajočega filtra, ki se spreminja zaradi povečevanja mase delcev, ki se usedejo na filter. Metoda je gravimetrična. Okoliški zrak se usmerja pri stalnem pretoku na filter, ki se tehta v enakomernih časovnih razmikih, na podlagi česar izračunamo masno koncentracijo (10 minutno povprečje). Instrument meri celotno nakopičeno maso delcev na filtru in na podlagi tega podaja 30 minutna, 1 urna, 8 urna in 24 urna povprečja masne koncentracije. Uporaba filtrov, izdelanih iz hidrofobnega materiala, skupaj z zajemom zraka za vzorčenje pri 50 °C, preprečuje vpliv vlage na meritev.

Filtri so teflonski, prevlečeni z borosilikatnim steklom. Filter se stehta vsaki dve sekundi. Razlika med maso filtra, na katerega je bil že usmerjen pretok, in začetno maso filtra (tehtana avtomatsko z instrumentom po namestitvi) daje celotno maso ujetih delcev. Trenutna branja stanja celotne mase delcev uskladijo iz dveh odčitkov, vrednosti so podane v g/s.

Notranje temperature v instrumentu so kontrolirane, da se vzdržujejo stalni pogoji v katerih poteka meritve. Vzorec je gret na 50 °C, preden gre na masni senzor, tako, da filter zbira delce pri nizki relativni vlagi. Vse meritve in temperaturne funkcije instrumenta so nadzorovane elektronsko. Stabilnost pretoka se preverja vsakih 6 mesecev (Bolte T., 2009).



Slika 4: Merilnik TEOM (model 1400a) (Bolte T., 2009)

2.3.4 Uporabljeni podatki o koncentracijah PM10 v Sloveniji

Za potrebe diplomske naloge sem uporabila podatke o izmerjenih koncentracijah PM10 v obdobju od 1. decembra 2012 do 31. marca 2013 na šestih merilnih mestih v Sloveniji (slika 5) in sicer v Ljubljani, Mariboru, Murski Soboti, Celju, Novi Gorici in v Trbovljah. Preglednica 2 podaja geografske podatke o izbranih ekoloških postajah skupaj z navedbo merilnika za PM10, ki je nameščen na posamezni postaji (Atlas okolja, 2014).

Ker na koncentracije delcev v ozračju, poleg izpustov, izrazito vplivajo tudi vremenske razmere, je za proučevanje vzrokov za povišane koncentracije ključnega pomena hkratno izvajanje meteoroloških meritvev. Pomembne so predvsem meritve vetra, padavin in temperature zraka pri tleh. Za spremljanje razvoja temperaturnih obratov pa so pomembne tudi meritve spreminjanja temperature zraka z nadmorsko višino, ki jih izvajamo z radiosondami.

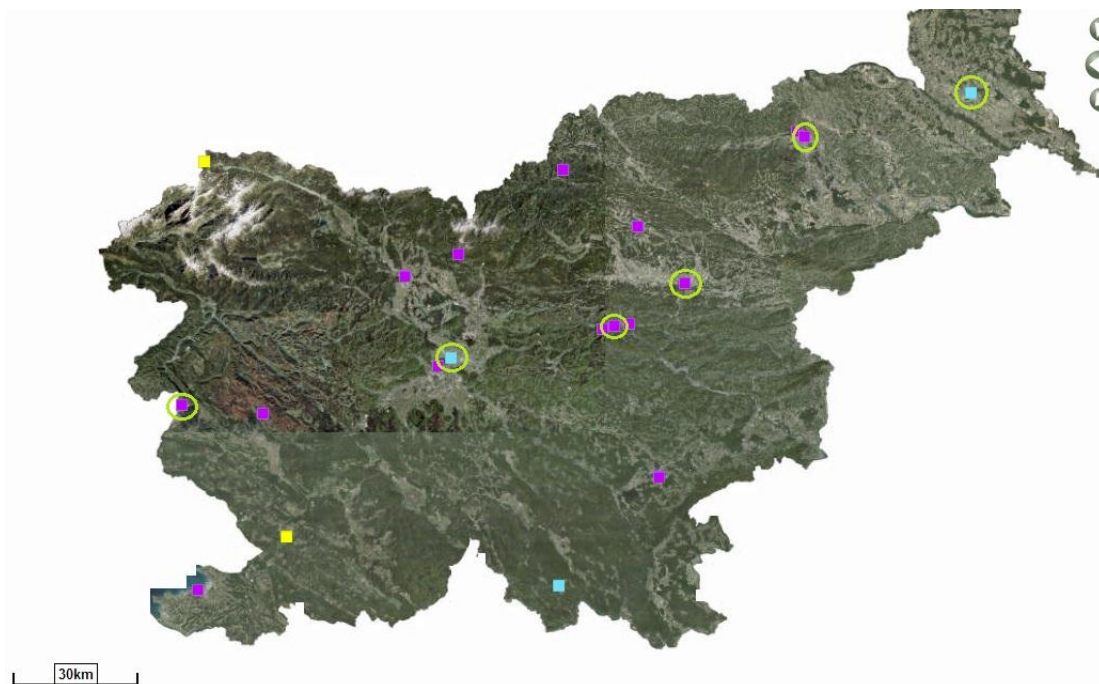
Preglednica 2: Izbrana merilna mesta s podatki o koncentracijah PM10, temperaturi zraka, hitrosti vetra in padavinah skupaj s pripadajočimi geografskimi podatki ter uporabljenimi merilniki

MERILNO MESTO	GEOGRAFSKA DOLŽINA / ŠIRINA	NADMORSKA VIŠINA [m]	UPORABLJEN MERILNIK
Ljubljana	46,06°S / 14,51°V	299	TEOM, Leckel
Maribor	46,56°S / 15,65°V	269	TEOM, Leckel
Murska Sobota	46,65°S / 16,19°V	186	TEOM, Leckel
Celje	46,23°S / 15,26°V	237	Leckel
Nova Gorica	45,96°S / 13,65°V	109	TEOM, Leckel
Trbovlje	46,14°S / 15,03°V	359	TEOM, Leckel

Poleg navedenih šestih krajev sem naredila delno analizo še za dodatna štiri merilna mesta in sicer za Zagorje, Koper, Iskrbo in za Novo Mesto, vendar rezultati niso podrobneje predstavljeni v diplomskem delu. V prilogah je za ta merilna mesta podana le slikovna primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 ter spremljajočih vremenskih razmer za celotno štirimesečno obdobje, podobno kot v primeru krajev, ki sem jih v diplomskem delu podrobneje obravnavala.

2.4 Prizemne meritve meteoroloških spremenljivk

Meritve koncentracije delcev in drugih onesnaževal ter meteorološke meritve se pogosto izvajajo na istem merilnem mestu v okviru tako imenovanih ekoloških postaj (slika 5), ki so namenjene spremljanju kakovosti zraka. Ponekod pa so merilniki za koncentracijo delcev PM10 nameščeni samostojno. Takrat si pri proučevanju vremenskih situacij ob povišanih koncentracijah onesnaževal pomagamo s podatki iz najbližjih meteoroloških postaj.



Slika 5: Mreža samodejnih postaj za merjenje kakovosti zunanjega zraka in padavin (obkrožena so merilna mesta, katerih podatke sem uporabila v diplomski nalogi) (Atlas okolja, 2014)

2.4.1 Samodejne meteorološke postaje

Za sprotno spremljanje vremenskih razmer se uporabljajo samodejne (avtomatske) meteorološke postaje, ki so tudi sestavni del ekoloških postaj (slika 6). Običajno merijo smer in hitrost vetra 10 m nad tlemi, količino padavin, temperaturo zraka in zračno vlago 2 m nad tlemi ter energijo sončnega obsevanja. Nekatere imajo dodane senzorje za določanje vidnosti, tipa sedanjega vremena, višine baze oblakov in druge. Merilni interval na samodejnih meteoroloških postajah je trenutno 30 minut, za padavine pa 5 minut. ARSO v okviru projekta BOBER (ARSO/BOBER, 2010) prenavlja mrežo samodejnih meteoroloških postaj in pri tem prehaja na 10 minutni merilni interval. V okviru merilnega intervala postaja zabeleži, poleg trenutne vrednosti, še nekatere statistike, kot so povprečje in ekstremi v celotnem intervalu (ARSO/Meteo, 2014).

Zaradi pomena pri proučevanju onesnaženosti zraka z delci v nadaljevanju podrobneje obravnavam meritve padavin, vetra in temperature zraka.



Slika 6: Ekološka postaja Murska Sobota (Atlas okolja, 2014)

2.4.2 Padavine

Spremljanje padavinskih razmer je z vidika onesnaženosti zraka pomembno, saj padavine fizično odstranijo – sperejo – nekaj delcev iz ozračja in tako zmanjšujejo koncentracijo delcev v zraku.

Na klimatoloških in padavinskih postajah se meritve višine padavin izvajajo ročno, enkrat dnevno, in sicer ob 7. uri zjutraj, s pomočjo klasičnega dežemera (ombrometra) oziroma dežemera. V okviru samodejnih meteoroloških postaj pa so nameščeni elektronski ombrometri, ki sproti beležijo količino padavin v določenem časovnem intervalu. Gre bodisi za tehtalne ombrometre ali ombrometre na prekucno posodo (slika 7). Kot že samo ime pove, tehtalni ombrometri merijo padavine na podlagi stalnega tehtanja padavinske vode v zbiralni posodi oziroma razlike v teži med enim in drugim merilnim intervalom. Ombrometri na prekucno posodo pa merijo na podlagi števila praznjenj manjše posode. Običajno gre za par posod, ki se ob napolnitvi ene posode prekucne na drugo stran in jo izprazni, na njeno mesto pa se premakne druga posoda. Meritve višine padavin so podane v milimetrih, kar je enakovredno litrom vode na kvadratni meter (l/m^2) (Bergant K., 2014).



Slika 7: Tehtalni ombrometer za merjenje padavin (levo) in ombrometer na prekucno posodo (desno) (meteolab, 2014)

2.4.3 Veter

Veter igra pomembno vlogo pri razširjanju onesnaževal in s tem tudi delcev v prostoru. Na podlagi smeri in hitrosti vetra lahko sklepamo o tem, kam in kako intenzivno se bodo onesnaževala razširjala s premikanjem zračnih mas. Na podlagi meritev vetra sklepamo tudi o stabilnosti ozračja, ki v veliki meri vpliva na pogoje za širjenje onesnaženja v zunanjem zraku.

Ob vetrovnih razmerah prihaja do intenzivnega mešanja zraka, zato je koncentracija delcev v zraku blizu površja dokaj majhna. Kadar pa so hitrosti vetra majhne, oziroma imamo brezvetrje, se še posebej v dolinah in kotlinah, kjer so običajno večja mesta in tudi industrija, onesnaževala kopičijo v bližini virov v prizemni plasti zraka. Takrat so koncentracije delcev v zunanjem zraku pogosto povišane. Izkazalo se je, da veter vpliva na koncentracijo delcev v zunanjem zraku celo bolj kot padavine.

Hitrost in smer vetra merimo z vetromeri (anemometri). V uporabi sta dve vrsti, anemometer na vrtljive čaše in ultrazvočni anemometer (slika 8).



Slika 8: Primer ultrazvočnega anemometra (levo) in anemometra na vrtljive čaše (desno) skupaj z vetrokazom (sredina) (meteolab, 2014)

Anemometri na vrtljive čaše na podlagi hitrosti vrtenja čaš izmerijo hitrost vetra, na podlagi usmeritve vetrokaza, ki se obrača proti vetru, pa njegovo smer. Ultrazvočni anemometri s pomočjo spremenjenih frekvenc ultrazvoka, ki so posledica Dopplerjevega učinka zaradi vetra, brez vrtljivih delov izmerijo tako hitrost kot smer vetra. Po standardih Svetovne meteorološke organizacije so anemometri na meteoroloških postajah nameščeni 10 m nad tlemi. Na ekoloških postajah veter običajno merimo nekoliko bližje tlom in sicer 7 m nad tlemi.

Slovenija je glede na razgibano površje sorazmerno slabo pokrita z merilno mrežo za veter. Velikokrat tudi sama meritev vetra ni reprezentativna za širše območje, temveč le za neposredno bližino merilnih mest. Meteorološke meritve so pogosto namenjene spremljanju vremena na urbanih območjih. Tam na meritve močno vplivajo različne vetrne ovire (zgradbe, drevesa) v bližini meritev (ARSO/Meteo, 2014).

2.4.4 Temperatura zraka

Temperatura zraka ima v Sloveniji značilen dnevni in letni hod. Najvišje dnevne temperature zraka 2 m nad tlemi ob jasnem vremenu izmerijo zgodaj popoldne, običajno med 14. in 15. uro, najnižje pa tik pred sončnim vzhodom. Temperatura zraka v splošnem z rastjo nadmorsko višino pada, v povprečju se povprečna letna temperatura zraka na vsakih 1000 m zniža za 5,3 °C. Poleg nadmorske višine na temperaturo vplivajo še relief oziroma mikrolokacija postaje, večje vodne površine in poseljenost. Vpliv mikrolokacije je najbolj izrazit pri minimalni, posredno pa tudi pri povprečni temperaturi zraka. Ob jasnih in mirnih nočeh je v kotlinah in dolinah pogost pojav nastanek tako imenovanih jezer hladnega zraka. Pojav temperaturnega obrata oziroma temperaturne inverzije je zlasti opazen pozimi, ko se neredko zgodi, da jezera hladnega zraka v kotlini vztrajajo tudi več dni. Jezera hladnega zraka in temperaturni obrati igrajo pomembno vlogo pri onesnaženosti zraka z delci v zaprtih kotlinah in dolinah. Ob nizkih temperaturah pozimi so potrebe po ogrevanju stavb večje, zato se povečajo tudi emisije delcev, predvsem iz malih kurišč. V topli polovici leta je vpliv kotlinske lege na temperaturne razmere in s tem tudi na onesnaženost delcev manj izrazit. Na temperaturo zraka vpliva tudi gostota poseljenosti. V povprečju je temperatura zraka v mestih zaradi večje gostote izvorov toplote (kurišča, promet, industrija) in drugačnih fizikalnih lastnosti asfaltnih in betonskih površin (manjši albedo, večja toplotna kapaciteta) nekoliko višja kot v okolici. Večje kot je mesto, bolj očiten je ta vpliv (ARSO/Meteo, 2014). Na samodejnih meteoroloških postajah temperaturo zraka merimo z elektronskimi uporovnimi termometri.

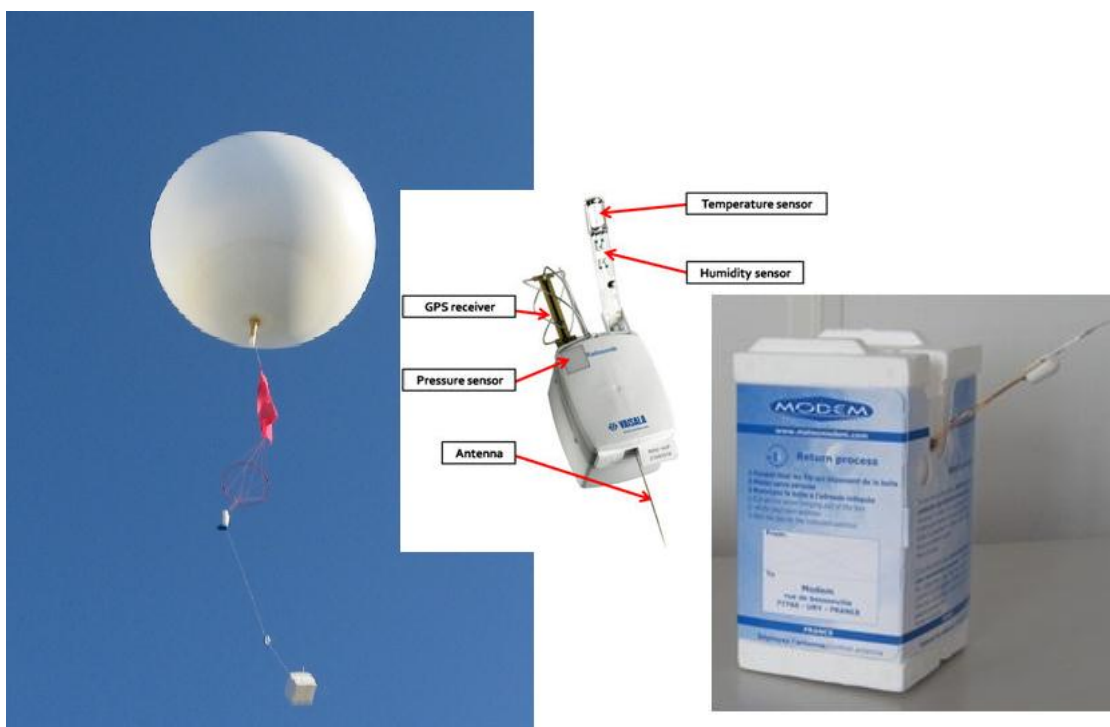
2.4.5 Uporabljeni meteorološki podatki

Za potrebe diplomske naloge sem poleg podatkov o izmerjenih koncentracijah PM10 v obdobju od 1. decembra 2012 do 31. marca 2013 uporabila tudi vzporedno izmerjene podatke o temperaturi zraka 2 m nad tlemi in podatke o količini padavin ter hitrosti in smeri vetra na šestih izbranih merilnih mestih v Sloveniji (slika 5). Edina izjema je merilno mesto Trbovlje, kjer ne razpolagamo z meritvami količine padavin. V tem primeru so bili uporabljeni podatki o padavinah, izmerjeni v bližnjem Hrastniku (geografska širina: 46,15° in dolžina: 15,08°).

2.5 Radiosondažne meritve

Radiosonda (sliki 9 in 10) je meteorološki inštrument za merjenje različnih meteoroloških veličin v zračnem stolpcu. Radiosondo pritrdimo na meteorološki balon (slika 9), ki je napolnjen s helijem in ponese sondo približno do višine 25 km. Poleg merilnikov za zračni tlak, temperaturo zraka in zračno vlago ima radiosonda tudi navigacijski (GPS) in radijski oddajnik (slika 9). S pomočjo GPS oddajnika spremljamo, kako zračni tokovi na poti skozi ozračje zanašajo radiosondo in tako določimo smer in hitrost vetra na izbrani nadmorski višini. Preko radijskega oddajnika radiosonda prenaša podatke o lastnostih ozračja (temperatura zraka, zračna vlaga, zračni tlak ter smer in hitrost vetra) do sprejemnika. Radiosonde delujejo na radijski frekvenci 403 MHz ali 1680 MHz. Oba tipa lahko prilagodimo nekoliko višje ali nižje (Radiosonde museum, 2014).

Običajno se radiosondažne meritve izvajajo dvakrat (0:00 UTC in 12:00 UTC) ali štirikrat (0:00 UTC, 6:00 UTC, 12:00 UTC, 18:00 UTC) dnevno. Uporabljajo se predvsem za ocenjevanje trenutne stabilnosti ozračja nad izbranim območjem, za analizo meteoroloških spremenljivk v višjih plasteh ozračja ter predstavljajo ključne vhodne podatke v numeričnih modelih za napovedovanje vremena. Na ARSO uporabljajo radiosonde proizvajalca MODEM (FR) (<http://www.meteomodem.com/radiosonde.php>), meritve pa se v Sloveniji izvajajo enkrat dnevno in sicer ob 3:00 UTC v Ljubljani. Nam najbližje radiosondažne meritve ob standardnih terminih se izvajajo na Hrvaškem v Zagrebu in v Italiji v Vidmu (Bergant K., 2014).



Slika 9: Radiosonda v zraku in posamezni senzori (Radiosonde museum, 2014)

Slika 10: Radiosonda (MeteoModem, 2014)

2.6 Numerični model za napovedovanje kakovosti zraka - CAMx

CAMx je model za simuliranje razširjanja primesi v zraku, ki so ga izdelali v ENVIRON International Corporation v Novatu v Kaliforniji (ENVIRON, 2013). Ime »Comprehensive Air quality Model with extensions« (CAMx) pove, da gre za obsežen vsestranski sistem, ki je primeren za proučevanje razširjanja in kemije ozona, delcev PM_{2,5} in PM₁₀, in nekaterih drugih škodljivih snovi v zraku v različnih skalah, od majhne, ki zajema npr. le del izbranega mesta do skale kontinentalnih razsežnosti. Tako je bil model CAMx uporabljen tudi v okviru Mednarodne iniciative za vrednotenje modelov za kakovost zraka AQMEII (Rao T.S. in sod., 2011) in sicer za modeliranje ozona in delcev PM₁₀ na območju Evrope (Nopmongcol U. in sod., 2011).

CAMx simulira emisije (izpuste) snovi v zrak, njihov transport (prenos) in disperzijo (razširjanje) v prostoru, kemijske pretvorbe ter depozicijo (izpad) raznih primesi v zraku. Model je Eulerjev, kar pomeni, da je ves prostor razdeljen na množico volumskih elementov in v vsakem od njih se v vsakem časovnem koraku računajo spremembe koncentracij vsake od snovi l po enačbi (2). CAMx uporablja različne koordinatne sisteme, zato je enačba v modelu zapisana specifično glede na izbrani koordinatni sistem.

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\nabla_H \cdot V_H c_l + \left[\frac{\partial(c_l \eta)}{\partial t} - c_l \frac{\partial^2 h}{\partial z \partial t} \right] + \nabla \cdot \rho K \nabla \left(\frac{c_l}{\rho} \right) + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{izpust} + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{kemijska} + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{izpad} \quad (2)$$

V enačbi (2) V in K predstavljata hitrost vetra in turbulentno difuzivnost; oba se od kraja do kraja in v času lahko močno spreminjata glede na vremenske pogoje. Da lahko povemo, kako se bo v nekem delu ozračja spreminjala koncentracija primesi v zraku, je treba poznati izpuste in izpade te snovi ter kemijske procese v zvezi z njo (nastajanje ali pretvorba v druge snovi). Kam bo veter zanašal snovi in kako se bodo razredčevale je odvisno od vremenskih spremenljivk V in K . Ker na kemijske pretvorbe vplivajo lahko tudi temperatura zraka, količina kemijsko aktivnega sevanja (predvsem sončnega, delno tudi IR), vlažnost zraka itd., se nabor vremensko odvisnih spremenljivk, ki jih je v danih razmerah treba upoštevati, lahko precej poveča.

Modeliranje zraka je izračunavanje časovnih sprememb količine posameznih primesi v zraku, ki nas zanima. Zanesljivost modelskih napovedi kakovosti zraka je močno odvisna od zanesljivosti modelskih napovedi vremena na omejenem območju (Vautard R. in sod., 2012). Tudi v našem primeru je CAMx le model za prenos, razširjanje, kemijsko pretvorbo, izpuste in izpad primesi – ni pa meteorološki model, ki bi izračunaval v času se spreminjajoča tridimenzionalna polja vetra, difuzivnosti itd. Vse potrebne vremenske spremenljivke mora CAMx dobiti kot vhodne podatke iz meteorološkega modela. V našem primeru jih dobi iz numeričnega modela za napovedovanje vremena na omejenem območju – ALADIN/SI. Za potrebe modeliranja ozona in delcev na območju Slovenije je bil sestavljen modelski sistem, v katerem je fotokemijski disperzijski model CAMx povezan z meteorološkim modelom ALADIN/SI. V modelski sistem je vključen tudi podroben opis izpustov, ki so posledica človekovih dejavnosti na območju Slovenije in Evrope, in podatki o koncentracijah onesnaževal na stranskih robovih območja modeliranja iz globalnega fotokemijskega modela.

Model CAMx omogoča tudi gnezdenje ali sklapljanje (model CAMx dobiva robne pogoje in inicializacijske podatke od modela ALADIN/SI). Na večjem območju lahko izberemo manj podrobno ločljivost, na manjšem predelu, ki nas še posebej zanima, pa je lahko izbrana ločljivost modela večja.

Koncentracije različnih onesnaževal v ozračju so odvisne od vrste fizikalnih in kemijskih procesov, ki vplivajo na to, kako se onesnaževala iz virov izpustov širijo v ozračju, kako sodelujejo v različnih kemijskih pretvorbah in kako vplivajo na izločanje onesnaževal iz ozračja. Pri modeliranju onesnaženosti zraka moramo najprej dobro poznati vremenske razmere, v katerih računamo koncentracije onesnaževal. Z vetrovnim poljem določimo advekcijo oziroma prenos primesi v zraku, razredčevanje teh primesi v zraku pa računamo s pomočjo enačb, ki opisujejo turbulentno difuzivnost. Nekatere lastnosti ozračja (npr. temperatura, vlažnost, optična debelina) dodatno vplivajo tudi na kemijske in fotokemijske pretvorbe snovi ali pa na bolj ali manj učinkovito izločanje snovi iz ozračja (ob padavinah, vetru). Poleg dobrega opisa meteoroloških spremenljivk je potrebno dobro poznati izpuste (točkovne in ploskovne) posameznih onesnaževal ter kemijske začetne in robne pogoje (koncentracije onesnaževal na začetku zagona oziroma na robu računskega območja). (Rus M. in sod., 2011; ENVIRON, 2013).

2.7 Numerični model za napovedovanje vremena - ALADIN/SI

ALADIN/SI je slovenska različica numeričnega meteorološkega modela ALADIN za računanje bodočega stanja ozračja nad omejenim geografskim območjem. Pri razvoju modela sodeluje 16 državnih meteoroloških služb iz Evrope in severne Afrike, vključno s slovensko državno meteorološko službo. Slednja je še posebej vpeta v delo Srednjeevropske skupine za modeliranje vremena na omejenem območju (RC-LACE). Model ALADIN/SI na ARSO vsakodnevno uporabljajo kot primarni meteorološki model za kratkoročno napoved vremena na območju Slovenije, ki služi za osnovo pri pripravi meteorološke in hidrološke napovedi. Z rezultati modela so redno seznanjeni vsi, ki jih vreme zanima ali so od njega odvisni. Rezultati so na razpolago javnosti na spletnih straneh državne meteorološke službe. Opis modela, ki je podan v nadaljevanju, je v celoti povzet po Pristov N. in sod., 2012.

Osnova modela ALADIN so fizikalne enačbe, ki opisujejo obnašanje nestisljivega zraka v vlažnem ozračju na vrteči se Zemlji – gibalna enačba, kontinuitetna enačba in energijska enačba. Iz njih dobimo sistem diferencialnih enačb, ki nima analitične rešitve. Lahko ga rešujemo le s pomočjo numeričnih metod. V vsaki mrežni točki se računa hitrost gibanja zraka (veter), temperatura, vlaga, pritisk, vsebnost oblačnih in padavinskih delcev, ipd.

V modelu ALADIN so enačbe zapisane v spektralnem prostoru. To pomeni, da polje vsake meteorološke spremenljivke predstavlja linearna kombinacija različno dolgih horizontalnih valov. Bodoče modelsko stanje oziroma napoved dobimo s časovno integracijo enačb. V vsakem časovnem koraku modelskemu stanju prištejemo izračunane tendence (časovne odvode) meteoroloških spremenljivk in tako dobimo novo stanje po vsakem časovnem koraku. Na ta način korakamo naprej v času do želenega časovnega dosega napovedi. Dolžina časovnega koraka je omejena z numerično stabilnostjo shem (ALADIN uporablja semi-implicitno semi-lagrangeovo časovno diskretizacijo, kar omogoča uporabo dolgih časovnih korakov) in z razdaljo med mrežnimi točkami.

Število računskih operacij, ki jih je potrebno izvesti v vsakem časovnem koraku, je odvisno predvsem od horizontalne in vertikalne ločljivosti računske mreže. Poleg tega je čas izračuna napovedi odvisen od računske sposobnosti računalnika, na katerem se poganja model. Smiselni časovni doseg napovedi z modelom ALADIN je, poleg računske zahtevnosti, omejen tudi z napovedljivostjo vremenskih procesov. Napaka se

z vse daljšim časom integracije v modelu povečuje zaradi napak začetnega stanja ozračja, zaradi poenostavljenih in nepopolnih modelskih enačb in zaradi približnih numeričnih metod.

Poleg meteoroloških robnih in začetnih pogojev so za izračun modela potrebni še podatki o višini in hrapavosti zemeljskega površja in tipu tal (vodna površina ali trdna tla, delež peska in zemlje) ter o drugih fiziografskih lastnostih, ki vplivajo na izmenjavo energijskih tokov med tlemi in ozračjem. Za večino teh količin ni na razpolago dnevni vrednosti, ampak se uporabijo statistične mesečne vrednosti. Sem sodijo na primer albedo (odbojnost za sončno sevanje) tal, tip vegetacije in indeks listne površine.

Podrobnejša napoved z modelom ALADIN je mogoča za tri dni vnaprej. Izračuni prihodnjega vremena se izvajajo ob 00:00 UTC, 03:00 UTC, 06:00 UTC, 09:00 UTC, 12:00 UTC, 15:00 UTC, 18:00 UTC in 21:00 UTC, pri čemer težimo k čim krajšim časovnim zamikom. Takoj, ko je na voljo triurna napoved globalnega modela, se pripravi začetno stanje s pomočjo analize z lokalno asimilacijo, pri kateri se uporabi opazovanja, ki so na voljo do tedaj. Analizi sledi izračun 72-urne napovedi, kjer je časovni korak integracije triminutni. Med potekom integracije se še naprej sproti prenašajo potrebni robni pogoji. Vsako uro se izpišejo tridimenzionalna polja meteoroloških spremenljivk.

Uporaba napovedi ALADIN/SI je zelo široka. Prvi in ključni uporabnik je meteorološka prognoza, poleg tega pa rezultate modelskih izračunov uporabljajo še v aplikaciji za kratkoročno napoved (INCA), v prognostičnih hidroloških modelih, v modelih za računanje stanja morja (NAPOM, SWAN) in širjenja onesnaženja (CAMx, FlexPart). Izbrana polja modelskih izračunov ARSO posreduje tudi v nemško meteorološko službo, kjer pripravijo skupinske napovedi na podlagi številnih regionalnih modelov evropskih meteoroloških služb. Prav tako ARSO napovedi posreduje meteorološki službi Furlanije-Julijske krajine za potrebe napovedovanje vremena, ter v Bratislavo, kjer se v okviru Regionalne skupine za modeliranje vremena na omejenem območju (RC-LACE) opravljajo medsebojne primerjave izračunov z izračuni drugih meteoroloških služb v tej skupini.

Rezultati sistema ALADIN/SI predstavljajo kakovostno meteorološko informacijo, zato so zanimivi tudi za zunanje uporabnike. Numerična meteorološka napoved je pomemben vhodni podatek v modelih za optimalno pridobivanje in distribucijo električne energije. Rezultate modela uporabljajo vzdrževalci cest (pluženje, posipanje). V zadnjem času se nakazujejo nove možnosti uporabe podatkov pri določanju področij z visokim tveganjem zemeljskih plazov, pri napovedovanju vetrne energije in ogroženosti pred požari.

2.8 Ovrednotenje zanesljivosti numeričnega sistema ALADIN-CAMx pri napovedovanju koncentracij PM10

Na podlagi podatkov o povprečnih dnevni koncentracij PM10, pridobljenih z merilniki TEOM in Leckel v testnem štirimesečnem obdobju zime 2012/2013, sem najprej poiskala obdobja s preseženimi mejnimi dnevnimi koncentracijami na merilnem mestu Ljubljana. Za ta obdobja sem pridobila podatke o radiosondažnih meritvah v Ljubljani in proučila, ali obdobja s povišanimi koncentracijami delcev PM10 sovpadajo z obdobji temperaturnega obrata oziroma njegovim razvojem.

Nato sem preverila, če obdobja s povišanimi koncentracijami PM10 v Ljubljani sovpadajo tudi z obdobji s povišanimi koncentracijami PM10 na ostalih petih obravnavanih merilnih mestih (preglednica 2).

V nadaljevanju sem na podlagi podatkov o vetru, količini padavin in temperaturi zraka ugotavljala, kako so lokalne vremenske razmere v teh obdobjih vplivale na časovno dinamiko onesnaženosti zraka z delci PM10. Izmerjene vrednosti koncentracij PM10 sem vizualno primerjala z napovedmi modela CAMx za najbližjo modelsko točko in na podlagi tega ovrednotila kakovost modelskih napovedi. V primeru odstopanj modelskih vrednosti od meritev sem skušala poiskati vzroke za ta odstopanja. Te sem iskala predvsem v odstopanjih napovedi meteorološkega modela ALADIN/SI od dejanskih vremenskih razmer, ki vplivajo na koncentracijo delcev PM10, ter v odstopanjih emisijskih podatkov, uporabljenih v modelu CAMx od dejanske dinamike emisij delcev PM10, ki je tesno povezana s temperaturnimi razmerami in posledično z ogrevanjem stavb.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 Obdobja z povišanimi koncentracijami PM10 na merilnem mestu Ljubljana

Za Ljubljansko kotlino so značilni zelo pogosti temperaturni obrati z višino od 100 do 300 m nad dnom kotline in vetrovi s hitrostjo pod 1 m/s (Atlas okolja, 2014). To botruje tudi pogosto povišanim koncentracijam PM10, še posebej v zimskem času.

Kot prvi korak v analizi sem na podlagi TEOM in Leckel meritev koncentracij PM10 najprej določila obdobja s povišanimi koncentracijami v Ljubljani v štirih mesecih, od 1. decembra 2012 do 31. marca 2013, torej obdobja, ko so bile presežene dnevne mejne koncentracije.

Preglednica 3: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Ljubljana skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevnih mejnih koncentracij v posameznem obdobju

LJUBLJANA		število preseganj	
mesec	obdobje povišanih koncentracij	meritve Leckel	napoved CAMx
december	09.12.2012 - 16.12.2012	6	5
	19.12.2012 - 23.12.2012	1	5
januar	30.12.2012 - 05.01.2013	2	5
	25.01.2013 - 30.01.2013	2	4
februar	10.02.2013 - 20.02.2013	3	8
	23.02.2013 - 01.03.2013	1	4
marec	03.03.2013 - 07.03.2013	2	1

Obdobja s preseženimi dnevnimi mejnimi koncentracijami so razvidna iz preglednice 3 in iz slike 18. Iz tega je razvidno, da sta bili v decembru 2012 v Ljubljani zabeleženi dve takšni obdobji, na prehodu iz decembra 2012 v januar 2013 eno in v januarju 2013 še eno takšno obdobje, v februarju 2013 dve in v marcu 2013 le eno takšno obdobje.

Poleg preseganj v navedenih obdobjih je bila mejna dnevna vrednost presežena v Ljubljani še dvakrat in to 9. in 21. januarja 2013, vendar gre za nekakšne »osamelce«, saj so bile povprečne dnevne koncentracije PM10 dan pred in dan za tema dnevnoma pod $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Glede na podatke referenčnega merilnika Leckel je bila v tem štirimesečnem obdobju dnevna mejna koncentracija $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ v Ljubljani presežena 22-krat, model CAMx pa je napovedal kar 50 takšnih preseganj.

3.2 Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času povišanih koncentracij PM10

Radiosondažne meritve so osnova za ocenjevanje stabilnosti ozračja, kondenzacijskega nivoja in prisotnosti oblačnih plasti. Temperaturni obrat, ki ga je mogoče določiti s pomočjo radiosondažnih meritev, pa je pokazatelj izrazito stabilnega ozračja, ko je vertikalno mešanje zraka omejeno. V takšnih razmerah prihaja do kopičenja onesnaževal v prizemni plasti ozračja in s tem tudi do povišanih koncentracij PM10. Delci namreč ostanejo ujeti v kotlinah in dolinah, saj toplejši zrak nad hladnejšim deluje kot nekakšna pokrovka. V nestabilni atmosferi temperatura zraka izrazito pada z višanjem nadmorske višine, vertikalno mešanje zraka je v takšnih razmerah omogočeno. Zaradi tega se delci lažje širijo v širšo okolico, obenem pa se koncentracija delcev PM10 manjša (Bergant K., 2014).

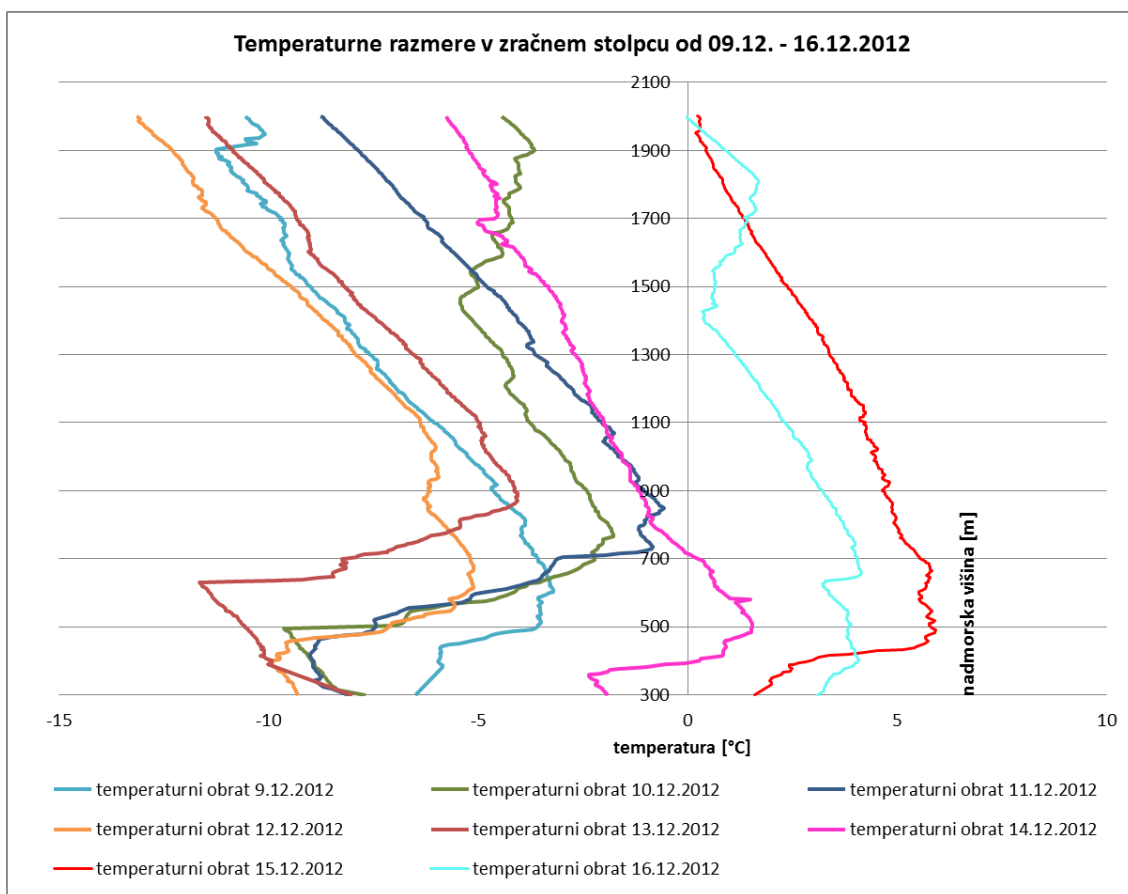
Temperaturni obrati z meglo ali nizko oblačnostjo so precej pogosti pozimi, kadar se nad našimi kraji dlje časa zadržuje območje visokega zračnega tlaka. Oblačnost, ki ob tem običajno nastane na višinah med 800 in 1300 m, lahko vztraja več dni. Takšna slojasta oblačnost zelo dobro odbija sončno sevanje v vidnem spektru in kadar je vpadni kot sončnih žarkov majhen, je sončne energije, ki pride do površja, premalo za razkroj temperaturnega obrata (Cedilnik J. in Štrajhar M., 2012).

Ko sem določila obdobja povišanih koncentracij, sem na podlagi radiosondažnih meritev v Ljubljani preverila, ali lahko ta obdobja povežem s prej opisanimi temperaturnimi obrati.

Iz radiosondažnih podatkov za Ljubljano je namreč razvidno, kako se temperatura zraka nad našimi kraji spreminja glede na nadmorsko višino. Na podlagi grafičnega prikaza radiosondažnih podatkov lahko določimo, ali je bil na izbran dan prisoten temperaturni obrat in na kateri nadmorski višini je do njega prišlo. Zapisi vremena iz leta 2012/2013 (ARSO/Bilteni Naše okolje, 2012/2013) kažejo, da je bil v obdobjih s povišanimi koncentracijami delcev PM10 dejansko opažen izrazit temperaturni obrat. Prav tako v teh obdobjih ni bilo padavin in je pihal šibak veter. Temperature zraka pri tleh so bile nizke. Zato ocenjujem, da ni bilo prisotnega izrazitega mešanja ozračja. Vnos delcev in posledično tudi koncentracija delcev PM10 sta se povečevala. Nizka temperatura zraka pri tleh nam nakazuje, da je bilo aktivnih veliko malih kurišč in s tem povečan vnos delcev PM10.

Kot pričakovano, sem v radiosondažnih meritvah v Ljubljani v obdobjih povišanih koncentracij delcev PM10 v zraku povsod zaznala izrazite temperaturne obrate. V nadaljevanju bom podrobneje opisala razvoj in razkroj temperaturnega obrata v posameznih obdobjih s povišanimi koncentracijami delcev PM10.

3.2.1 Obdobje od 09.12.2012 do 16.12.2012

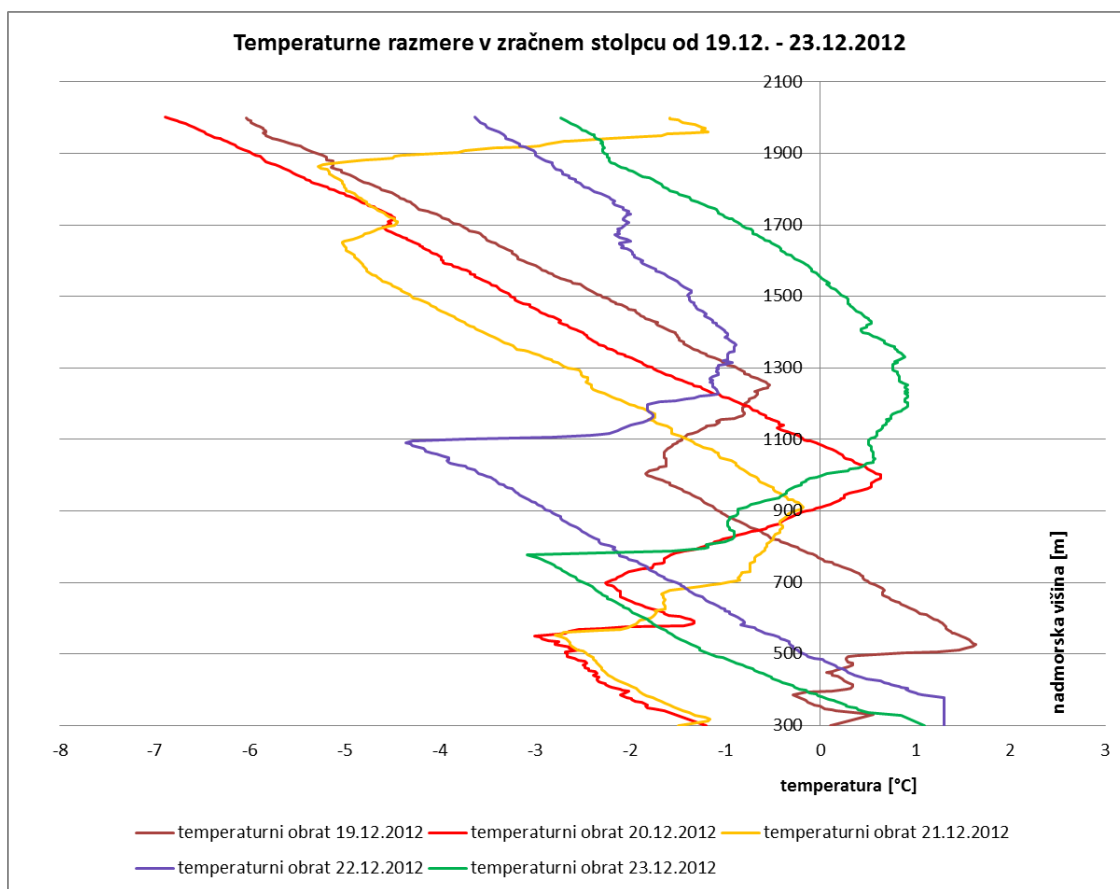


Slika 11: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 09.12.2012 do 16.12.2012

Temperaturni obrat je bil iz radiosondažne meritve razviden že 9. decembra 2012. V naslednjih dneh se je temperaturni obrat še krepil in bil najbolj izrazit 10. ter 11. decembra 2012. Začetek temperaturnega obrata je bil ta dva dneva, kot tudi 12. decembra 2012, nekje na 500 m. Ko se je temperaturni obrat krepil, se je povečevala tudi koncentracija delcev v zraku. 13. decembra 2012 se je temperaturni obrat nekoliko dvignil, začel se je približno na 650 m. 14. in 15. decembra 2012 je temperaturni obrat bil še dokaj izrazit, vendar se je spustil nižje. V naslednjih dneh pa se je obrat postopoma začel razkrajati, s tem pa se je nižala tudi koncentracija delcev.

Opisana dinamika temperaturnega obrata v obdobju od 9. do 16. decembra 2012 je razvidna iz slike 11. V tem obdobju je bila v Ljubljani presežena mejna dnevna koncentracija delcev PM10 kar šestkrat. Najvišja koncentracija delcev PM10 je bila 11. decembra, ko je znašala glede na referenčno meritev kar $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

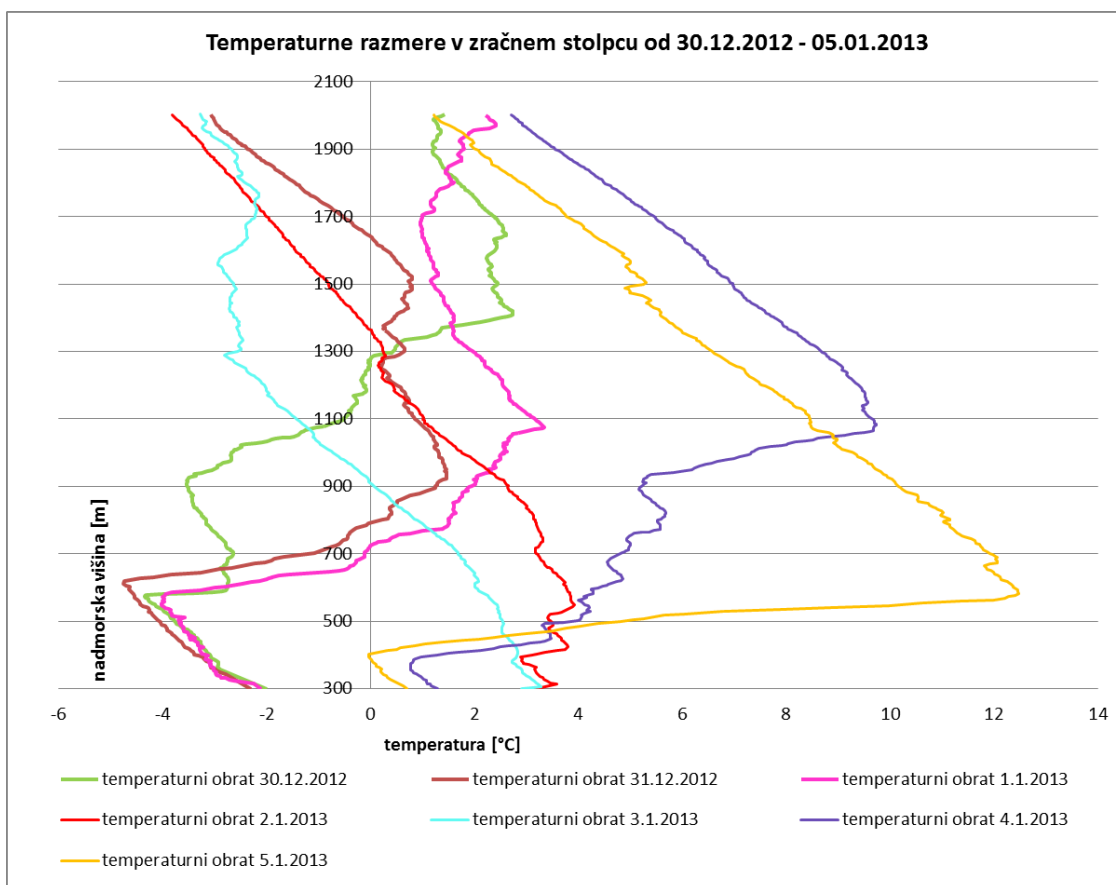
3.2.2 Obdobje od 19.12.2012 do 23.12.2012



Slika 12: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 19.12.2012 do 23.12.2012

Začetek prvega temperaturnega obrata smo zasledili 19. decembra 2012 na približno 500 m_{nv}, drugega pa nekje na višini okrog 1000 m_{nv}. V naslednjih dveh dneh sta se združila v okrepljen obrat z začetkom na približno 550 m_{nv}. 21. decembra 2012 je koncentracija delcev dosegla najvišjo vrednost v tem obdobju in sicer 65 µg/m³. Sledilo je premešanje prizemne plasti zraka in 22. decembra 2012 se je temperaturni obrat izrazito dvignil na kar 1100 m_{nv}. S tem se je koncentracija lepo prerezporedila in zmanjšala ob površju na 41 µg/m³, saj je imelo onesnaženje na razpolago večji volumen. 23. decembra 2012 je koncentracija PM₁₀ padla celo na 35 µg/m³, obrat pa se je takrat pričel na 775 m_{nv}, kot je razvidno iz slike 12.

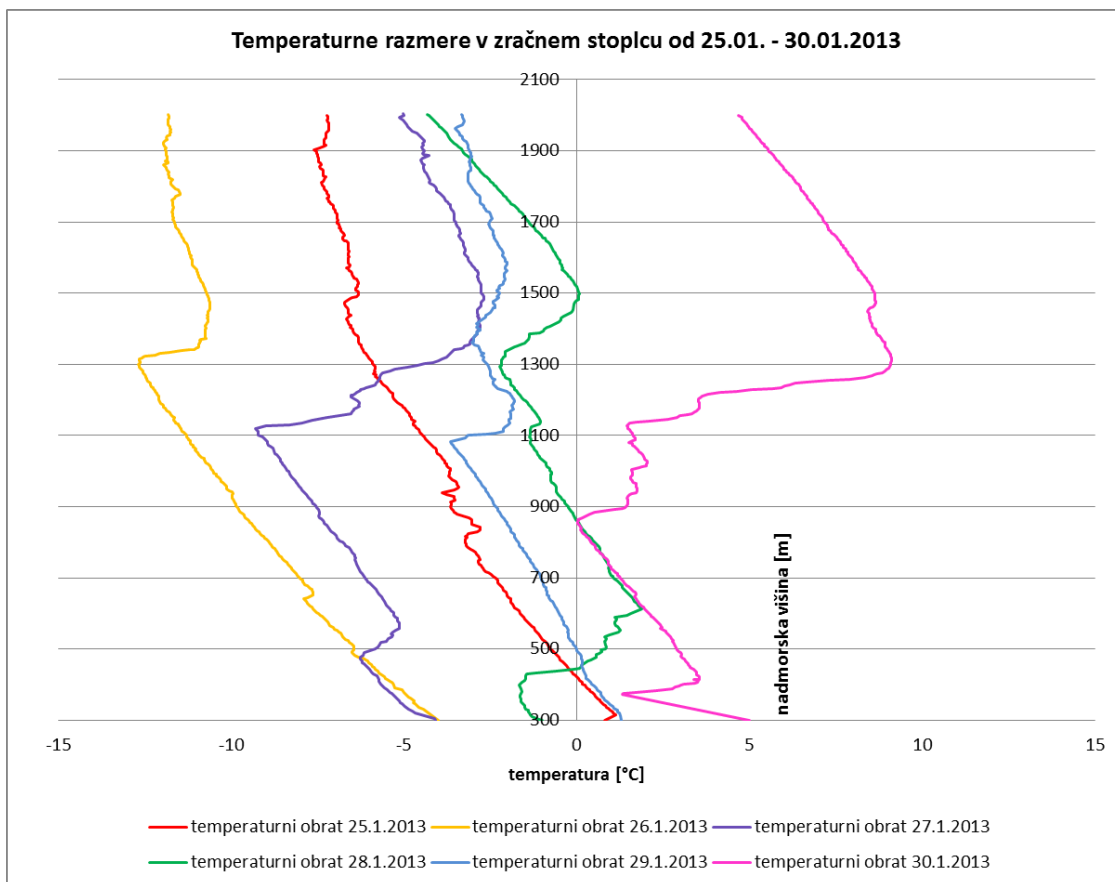
3.2.3 Obdobje od 30.12.2012 do 05.01.2013



Slika 13: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 30.12.2012 do 05.01.2013

Zadnja dva dneva v letu 2012 in na novega leta dan 2013 je začetek temperaturnega obrata nihal na okoli 570 mnv, s koncentracijami PM10 blizu $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koncentracija je malenkost narastla na silvestrski večer, sklepam, da zaradi ognjemetov. 2. januarja 2013 se je prizemna plast ozračja premešala, temperaturni obrat je oslabel, koncentracija PM10 se je spustila na $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zaradi padavin in vetra. Temperaturni obrat se je ponovno vzpostavil 4. januarja 2013, ko je koncentracija PM10 dosegla v tem obdobju najvišjo povprečno dnevno vrednost in sicer $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sledil je postopen razkroj temperaturnega obrata in nižanje koncentracij PM10 (slika 13).

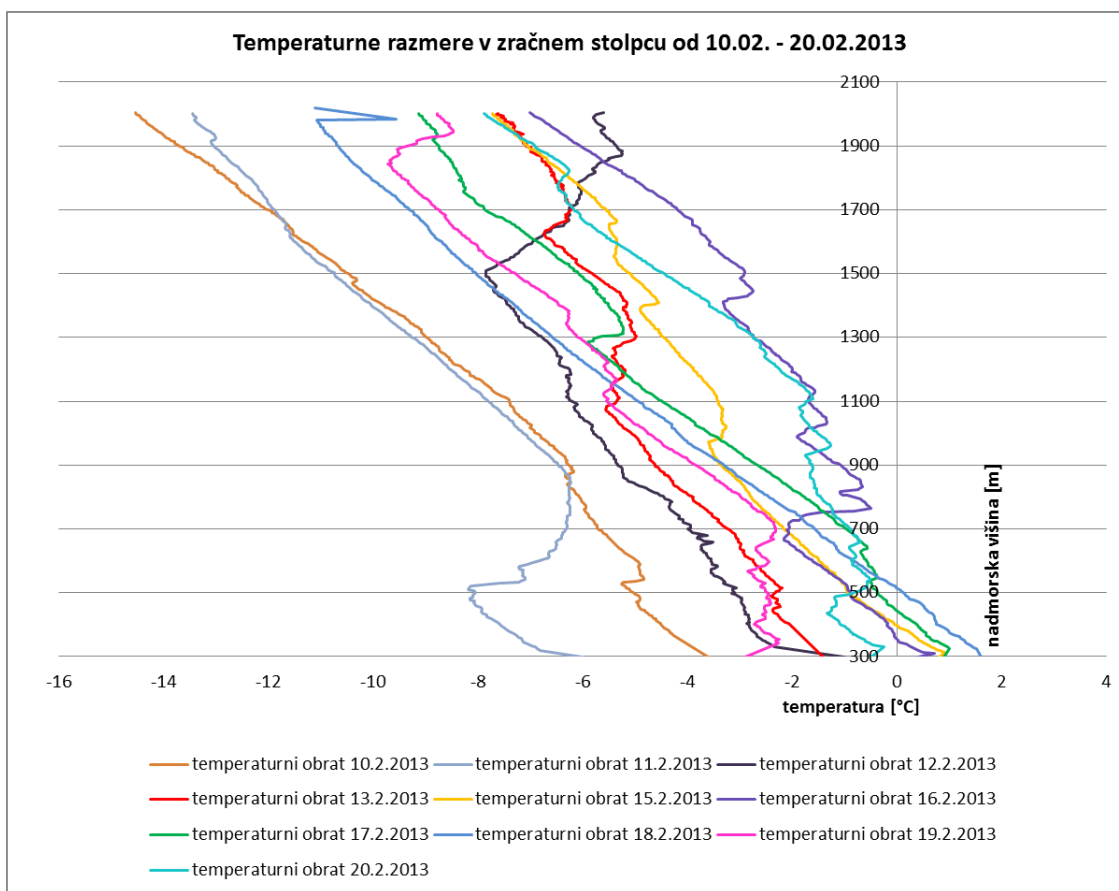
3.2.4 Obdobje od 25.01.2013 do 30.01.2013



Slika 14: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 25.01.2013 do 30.01.2013

Kot je razvidno iz slike 14, temperaturnega obrata 25. januarja 2013 še ni bilo in koncentracija PM10 v dolini je bila tisti dan dokaj nizka in sicer $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dan kasneje, 26. januarja 2013, se je na višini okrog 1300 m počasi začel tvoriti temperaturni obrat, ki se je v naslednjih dveh dneh okrepil, hkrati pa se mu je pridružil še temperaturni obrat na višinah okrog 500 m. Slednji je bil najbolj izrazit 28. januarja 2013, ko je bila zabeležena tudi najvišja koncentracija PM10 v tem obdobju in sicer $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. V naslednjih dneh se je prizemna plast zraka premešala, temperaturni obrat pa dvignil na okrog 1000 m. Volumen zraka pod obratom se je povečal in zato je koncentracija delcev PM10 v zraku pri tleh padla na okrog $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

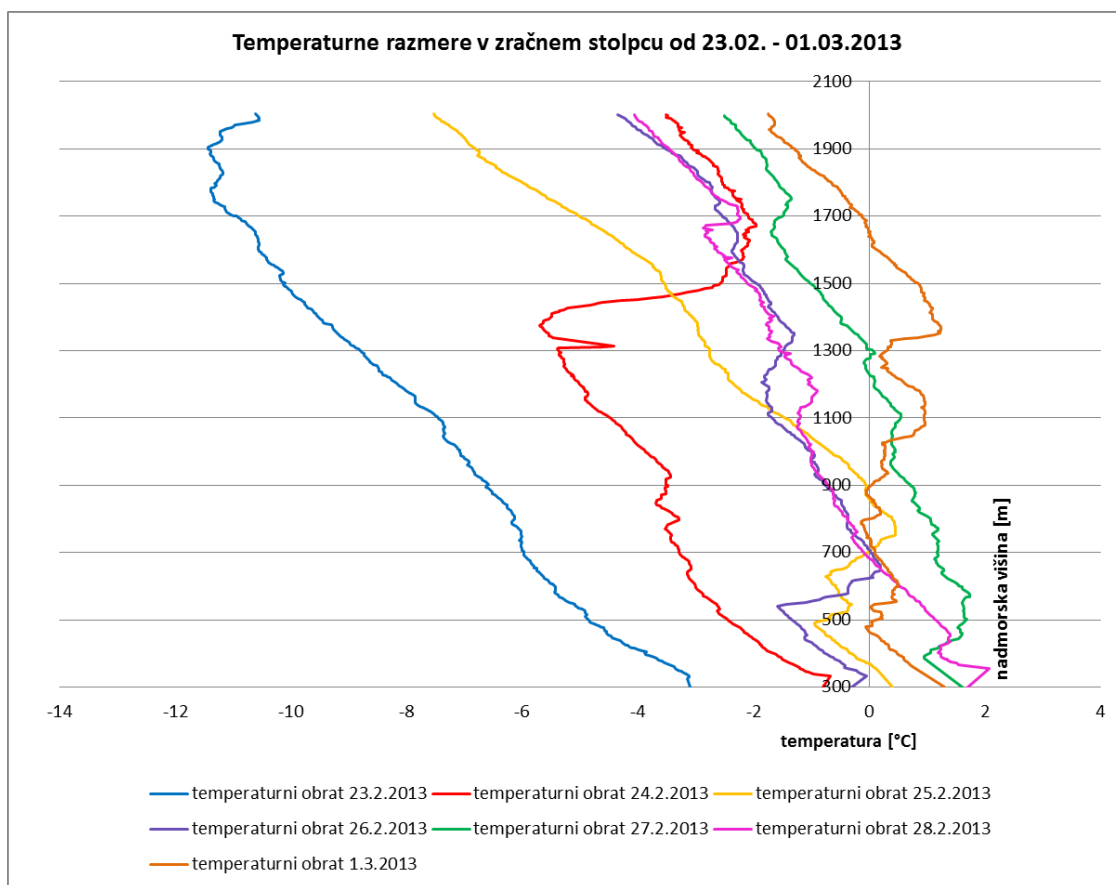
3.2.5 Obdobje od 10.02.2013 do 20.02.2013



Slika 15: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 10.02.2013 do 20.02.2013

Iz slike 15 je že na prvi pogled razvidno, da je bil temperaturni obrat v tem obdobju neizrazit. Povprečne dnevne koncentracije so se celotno obdobje gibale okrog mejne dnevne vrednosti. Še najbolj izrazit je bil temperaturni obrat 11., 16. in 19. februarja 2013, radiosondažni podatki za 14. februar 2013 pa žal niso na razpolago. Koncentracija PM10 v tem obdobju ni pretirano nihala in se je v celotnem obdobju gibala blizu dnevne mejne vrednosti. Povprečje vseh enajstih dni znaša $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najvišja koncentracija v tem obdobju je bila izmerjena 15. februarja 2013 in sicer $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

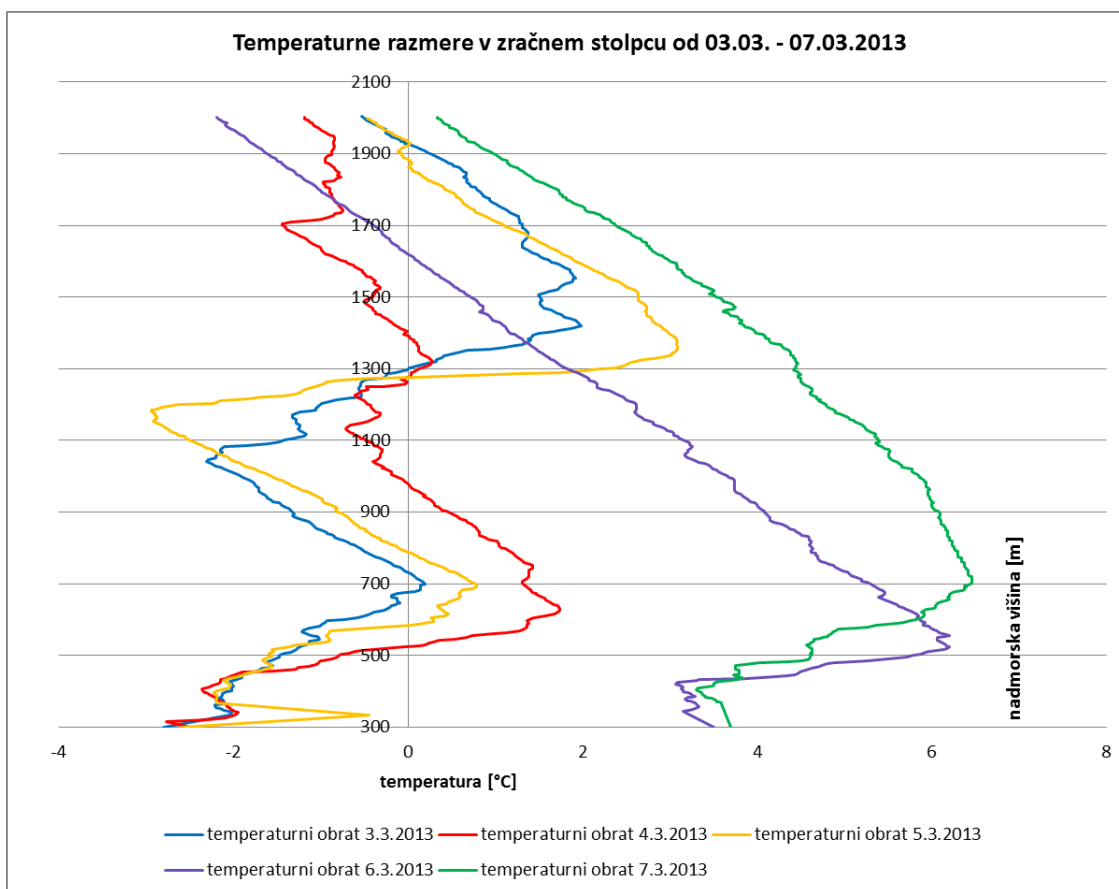
3.2.6 Obdobje od 23.02.2013 do 01.03.2013



Slika 16: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 23.02.2013 do 01.03.2013

23. februarja 2013 je do višine 1900 m temperatura enakomerno padala, dan kasneje je bil temperaturni profil zelo razgiban, obrat pa se je razvil na višini okrog 1400 mnv. Koncentracija je bila tega in naslednjega dne še pod dnevno mejno vrednostjo in sicer okrog $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. V naslednjih dneh so se v prizemni plasti zraka vzpostavile razmere, ko se je temperatura zraka z višino zelo počasi spreminjala, vmes je bilo več plasti s šibkimi temperaturnimi obrati. V takšnih razmerah je mešanje zraka v prizemni plasti omejeno, zato so se koncentracije vse dni gibale nekaj nad $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Še najbolj izrazit je bil temperaturni obrat 26. februarja 2013 na okrog 550 mnv (slika 16). Tega dne je koncentracija PM10 dosegla svoj maksimum v tem obdobju z vrednostjo $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Padec koncentracije PM10 pod $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ je 2. marca 2013 le naznanil prehod v še izrazitejše obdobje povišanih koncentracij PM10.

3.2.7 Obdobje od 03.03.2013 do 07.03.2013



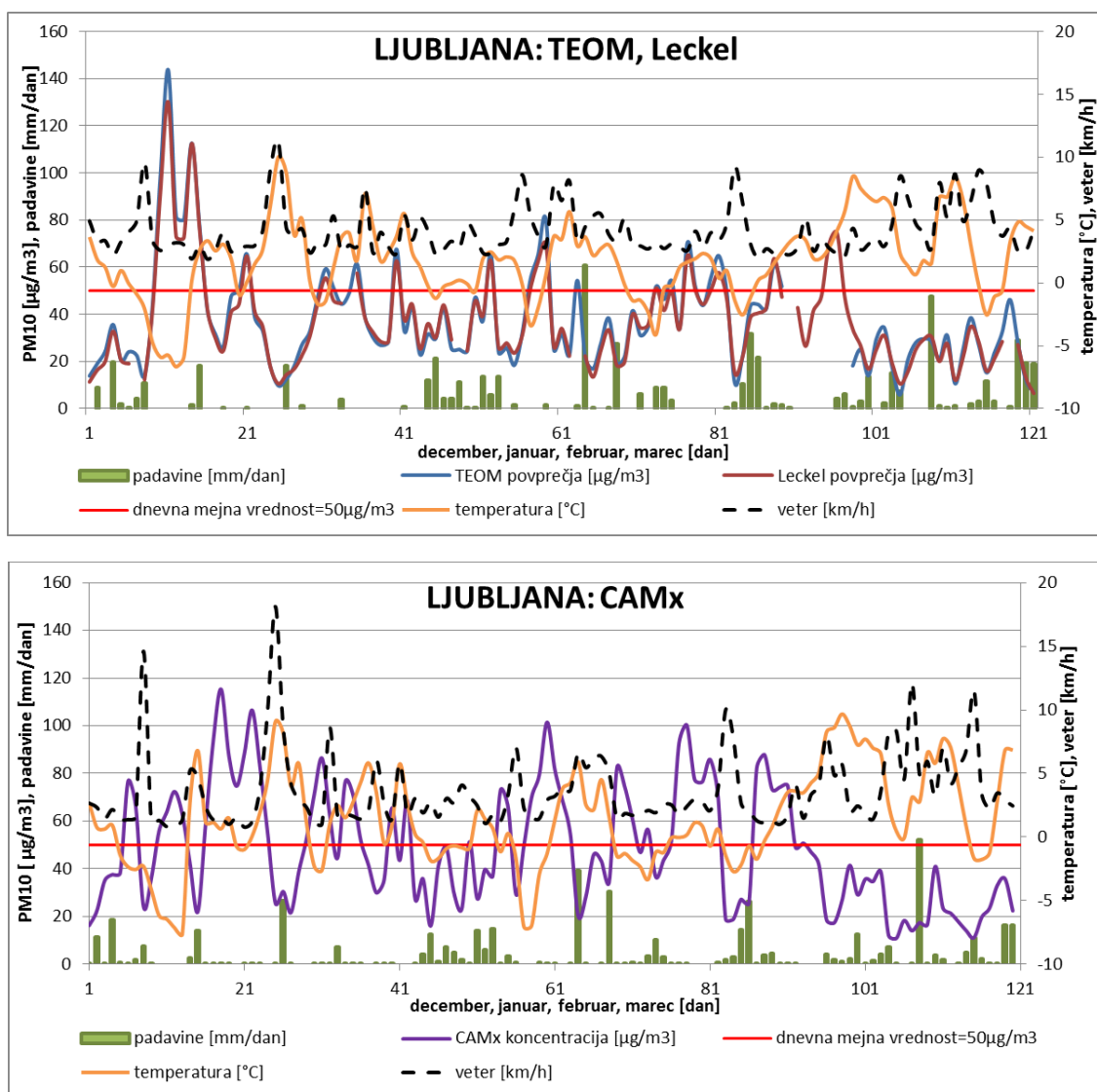
Slika 17: Temperaturne razmere v zračnem stolpcu nad Ljubljano v času od 03.03.2013 do 07.03.2013

Zadnje obdobje opazovanih povišanih koncentracij PM10 v testnem štirimesečnem obdobju se je začelo s 3. marcem in končalo s 7. marcem 2013 (slika 17). Vse te dni lahko opazimo izrazit temperaturni obrat na višini okrog 450 mnv, že pod to višino pa prve tri dni dodaten manjši prizemni temperaturni obrat. Prvega dne v obdobju je bila koncentracija še pod dnevno mejno vrednostjo in je znašala $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 5. marca 2013 pa je koncentracija PM10 sunkovito narasla na $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Maksimum koncentracije PM10 je bil opažen četrtega dne, 6. marca 2013, ko je dosegla vrednost $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$. S spremembo zračne mase se je tega dne v celotni prizemni plasti otoplilo in pričele so se padavine. Koncentracija PM10 se je pričela zmanjševati in je 7. marca 2013 še znašala $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, v naslednjih dneh pa je izrazito padla.

3.3 Podrobnejša analiza meritev kakovosti zraka na stalnih merilnih mestih in napovedi z modelom CAMx za obdobje od 1. decembra 2012 (dan 1) do 30. marca 2013 (dan 121)

3.3.1 Ljubljana

Merilno mesto Ljubljana se uvršča v tip mestnega ozadja, ki je pretežno pod vplivom lokalnega prometa, energetike in manjših industrijskih obratov in v manjši meri pod vplivom izpustov individualnih kurišč v bližnji okolici (Atlas okolja, 2014).



Slika 18: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Ljubljani v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

Najvišja izmerjena koncentracija delcev PM10 v celotnem štirimesečnem obdobju je bila 11. decembra 2012, torej v prvem obdobju povišanih koncentracij PM10 (od 9. decembra do 16. decembra 2012). Napovedana vrednost modela CAMx je bila podcenjena in sicer na $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Z referenčnim merilnikom Leckel je bila ta dan izmerjena koncentracija PM10 $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z merilnikom TEOM pa celo $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (slika 18). Razvidno je dobro ujemanje med meritvami z referenčnim merilnikom Leckel in merilnikom TEOM. Ob visokih koncentracijah sicer vrednosti, izmerjene z merilnikom TEOM, nekoliko presegajo vrednosti izmerjene z merilnikom Leckel. Kljub temu lahko na podlagi te primerjave zaključim, da so meritve z merilnikom TEOM zanesljive in uporabne, četudi primerjamo le 24-urna povprečja meritev.

Model CAMx prvega viška koncentracij PM10 ni ustrezno zaznal, saj je najvišje koncentracije napovedal za sedem dni kasneje in sicer za 18. december 2012, ko je bila napovedana koncentracija $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Glede na to, da je model ALADIN/SI za to obdobje dokaj dobro napovedal vetrovne, padavinske in temperaturne razmere, je zamik verjetno posledica odstopanj podatkov iz emisijske baze, ki jo uporablja model CAMx, od dejanskih izpustov v tem obdobju.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v drugem obdobju, od 19. do 23. decembra 2012, je model dobro napovedal, samo koncentracijo pa nekoliko precenil. Izmerjena koncentracija z merilnikom Leckel je bila namreč 21. decembra 2012 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Merilnik TEOM se je ponovno dobro obnesel, saj je bila izmerjena koncentracija $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije v tretjem obdobju, od 30. decembra 2012 do 5. januarja 2013, je model zelo dobro napovedal, koncentracijo je precenil le za $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena koncentracija je bila 4. januarja 2013 $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model je za to obdobje napovedal še višjo koncentracijo – $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in sicer za 31. december 2012. Izmerjena koncentracija je ta dan res presegla dnevno mejno vrednost, vendar je znašala le $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Izpostavila bi še 9. januar 2013 in 21. januar 2013, čeprav teh dni nisem vključila v nobeno obdobje. Izmerjena koncentracija je obakrat presegla dnevno mejno vrednost in je znašala $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Za 9. januar 2013 je model CAMx zelo dobro napovedal koncentracijo ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 21. januarja 2013 pa naj bi bila po napovedi koncentracija pod dnevno mejno vrednostjo in sicer $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

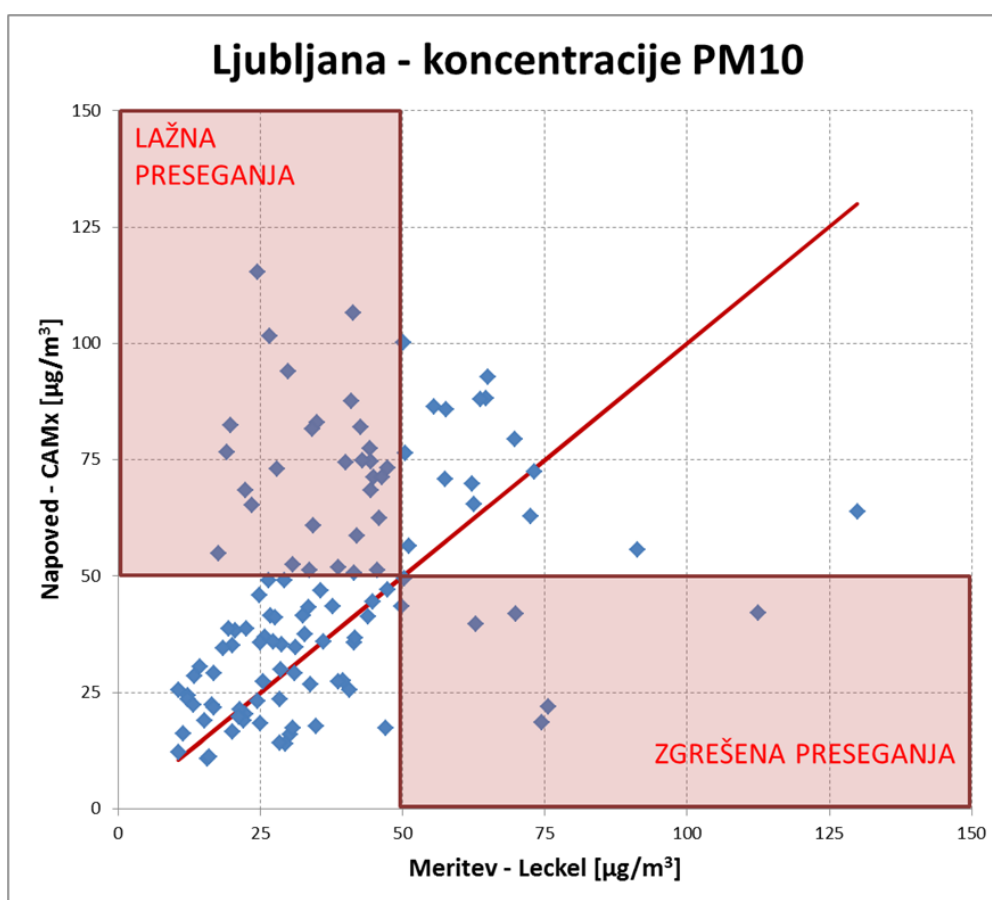
Maksimum koncentracije v četrtem obdobju, od 25. januarja do 30. januarja 2013, je model napovedal najbolje. Meritev koncentracije delcev PM10 je bila najbližje napovedani v celotnem štirimesečnem obdobju dne 28. januarja 2013 (59. dan opazovanja). Napovedana koncentracija je bila $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena z referenčnim merilnikom Leckel $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in izmerjena z merilnikom TEOM, bližje napovedani, $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dnevne mejne vrednosti koncentracije delcev PM10 v petem obdobju, od 10. februarja do 20. februarja 2013, so bile presežene trikrat. Dne 10. februarja 2013 je model CAMx dobro napovedal povišanje koncentracije, ki naj bi znašala $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dejanska vrednost je znašala $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najvišja izmerjena koncentracija v tem obdobju je bila dne 15. februarja 2013 in sicer $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A model je napoved precenil, saj je napovedal povišanje koncentracije na $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tudi vrednost zabeležena z merilnikom TEOM je tistega dne znašala le $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v šestem obdobju, od 23. februarja 2013 do 1. marca 2013, je model napovedal, a je koncentracijo ponovno precenil. Napovedana vrednost je bila kar $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena pa le $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in sicer 26. februarja 2013.

V zadnjem, sedmem obdobju, od 3. marca do 7. marca 2013, je model zelo podcenil koncentracije PM10. Najvišja izmerjena koncentracija je bila 6. marca 2013 in sicer $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa le $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V Ljubljani je bilo v celotnem štirimesečnem obdobju zabeleženih 22 preseganj mejne dnevne koncentracije PM10, na podlagi napovedi z modelom CAMx naj bi bilo takšnih preseganj kar 50. Model je znotraj posameznih obdobj, ki jih je časovno sicer dokaj dobro opredelil, pogosto napovedal več preseganj dnevne mejne vrednosti, kot jih je bilo dejansko zabeleženih. Poleg tega pa je včasih napovedal tudi lažna preseganja (slika 19), do katerih v resnici ni prišlo. Takšen primer je obdobje od 9. marca do 12. marca 2013.

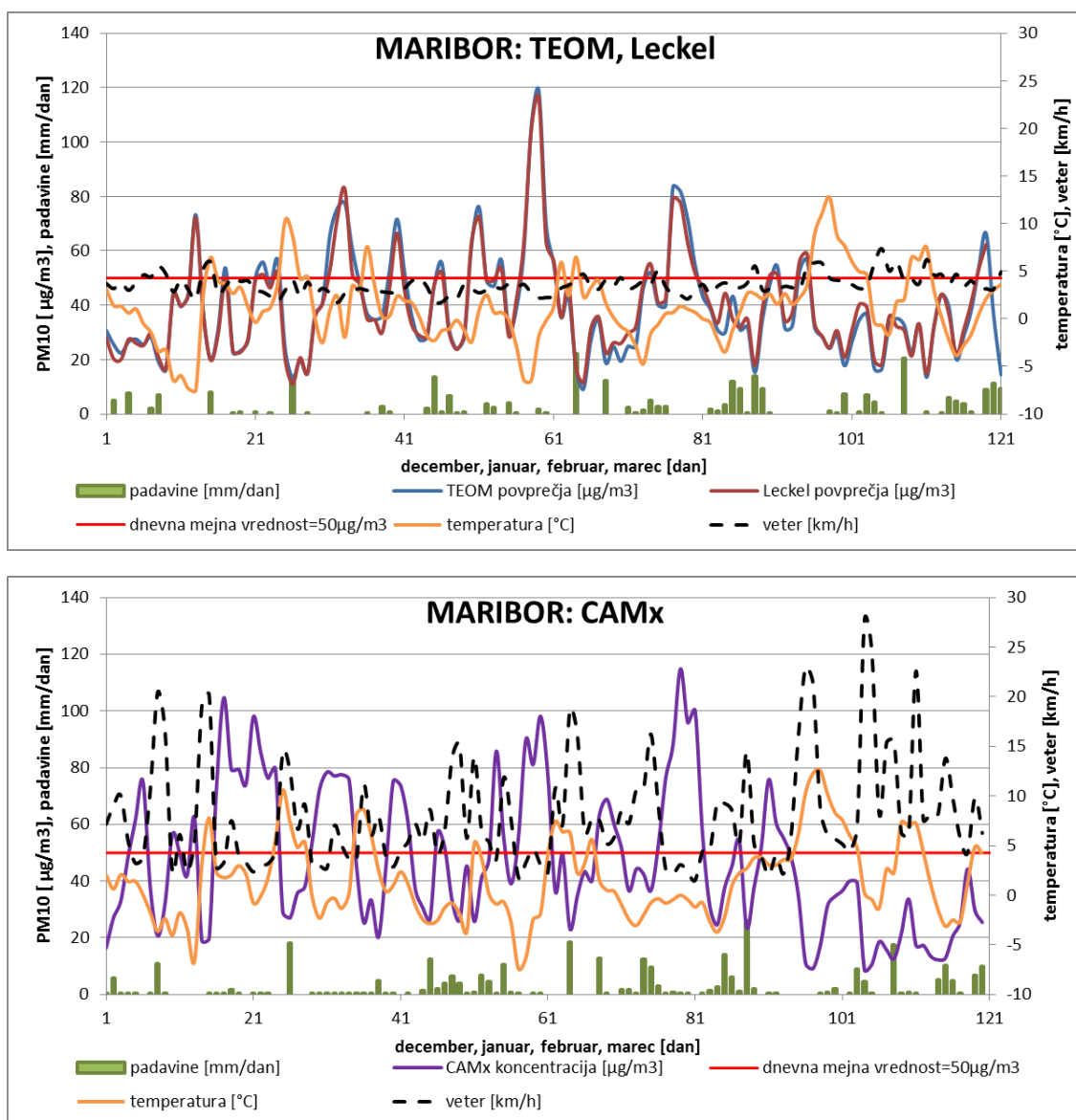


Slika 19: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Ljubljani v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

V splošnem model CAMx dobro sledi dinamiki izmerjenih koncentracij PM10, čeprav večinoma nekoliko preceni izmerjene vrednosti, kar je razvidno tudi iz slike 19. Model je na eni strani kar nekaj izmerjenih zelo visokih vrednosti koncentracij PM10 tudi podcenil (desni spodnji kot grafa: dve vrednosti izmerjene blizu $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, je model ocenil le na blizu $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vrednost okoli $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le na okoli $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in vrednost $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le na okoli $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Po drugi strani pa lahko vidimo, da je model v kar velikem številu primerov napovedal vrednosti preko $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ko so bile dejansko izmerjene vrednosti pod $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.2 Maribor

Merilno mesto Maribor uvrščamo v prometni tip postaje. Leži znotraj cestnega kanjona, ob prometnici z dnevnim prometom 46.000 vozil, v neposredni bližini semaforiziranega križišča in avtobusne postaje. Klima Maribora je pretežno celinska z vplivom predalpske. V primerjavi s kotlinami osrednje Slovenije je to območje sicer bolj prevetreno, vendar ne dovolj, tako, da se v zimskem obdobju onesnaževala v zunanjem zraku dlje časa zadržujejo nad urbaniziranim območjem občine Maribor (Atlas okolja, 2014).



Slika 20: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Mariboru v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

Preglednica 4: Pregled obdobj s izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Maribor skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju

MARIBOR		število preseganj	
mesec	obdobje povišanih koncentracij	meritve Leckel	napoved CAMx
december	10.12.2012 - 14.12.2012	1	2
	21.12.2012 - 24.12.2012	2	4
januar	30.12.2012 - 04.01.2013	4	5
	08.01.2013 - 11.01.2013	1	3
	18.01.2013 - 31.01.2013	8	7
februar	11.02.2013 - 20.02.2013	5	7
marec	28.02.2013 - 07.03.2013	4	4
	27.03.2013 - 31.03.2013	2	0

Poleg preseganj v navedenih obdobjih (preglednica 4) je bila mejna dnevna vrednost presežena v Mariboru še enkrat in sicer 15. januarja 2013, vendar gre za »osamelec«, saj so bile povprečne dnevne koncentracije PM10 dan pred 15. januarjem 2013 pod $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in dan po 15. januarju 2013 pod $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V petem obdobju, od 18. januarja do 31. januarja 2013, in hkrati v celotnem štirimesečnem obdobju, je bila 28. januarja 2013 najvišja izmerjena koncentracija delcev PM10. Z referenčnim merilnikom Leckel je bila vrednost $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z merilnikom TEOM pa $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (slika 20). Z modelom CAMx je bila ta dan napovedana povišana koncentracija na $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model CAMx je povišane koncentracije PM10 v tem obdobju dobro zaznal, vendar je podcenil koncentracije.

Najvišjo koncentracijo PM10 v celotnem štirimesečnem obdobju je model napovedal za 17. februar 2013 in sicer $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena povprečna dnevna koncentracija PM10 v tem obdobju, od 11. februarja do 20. februarja 2013, je bila dva dni pred tem (15. januar 2013) in sicer $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Leckel) oziroma $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TEOM).

V prvem obdobju, od 10. decembra do 14. decembra 2012, je bila izmerjena povprečna dnevna koncentracija PM10 presežena le enkrat, in sicer dne 13. decembra 2012 in je znašala $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Napoved modela CAMx je bila podcenjena, napovedana je bila $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije v drugem obdobju, od 21. decembra do 24. decembra 2012, je model precenil za $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Napovedana koncentracija je bila $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena koncentracija pa 24. decembra 2012 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model je v tem obdobju napovedal še višjo koncentracijo, $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in sicer za 21. december 2012, izmerjena koncentracija tega dne pa je bila pod dnevno mejno vrednostjo, $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v tretjem obdobju, od 30. decembra 2012 do 4. januarja 2013, je model dobro napovedal, koncentracijo pa podcenil le za $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena koncentracija je bila namreč 2. januarja 2013 $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V četrtem obdobju, od 8. januarja do 11. januarja 2013, je bila izmerjena povprečna dnevna koncentracija PM10 presežena 9. januarja 2013 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model CAMx je v tem obdobju napovedal kar trikratno povišanje koncentracij.

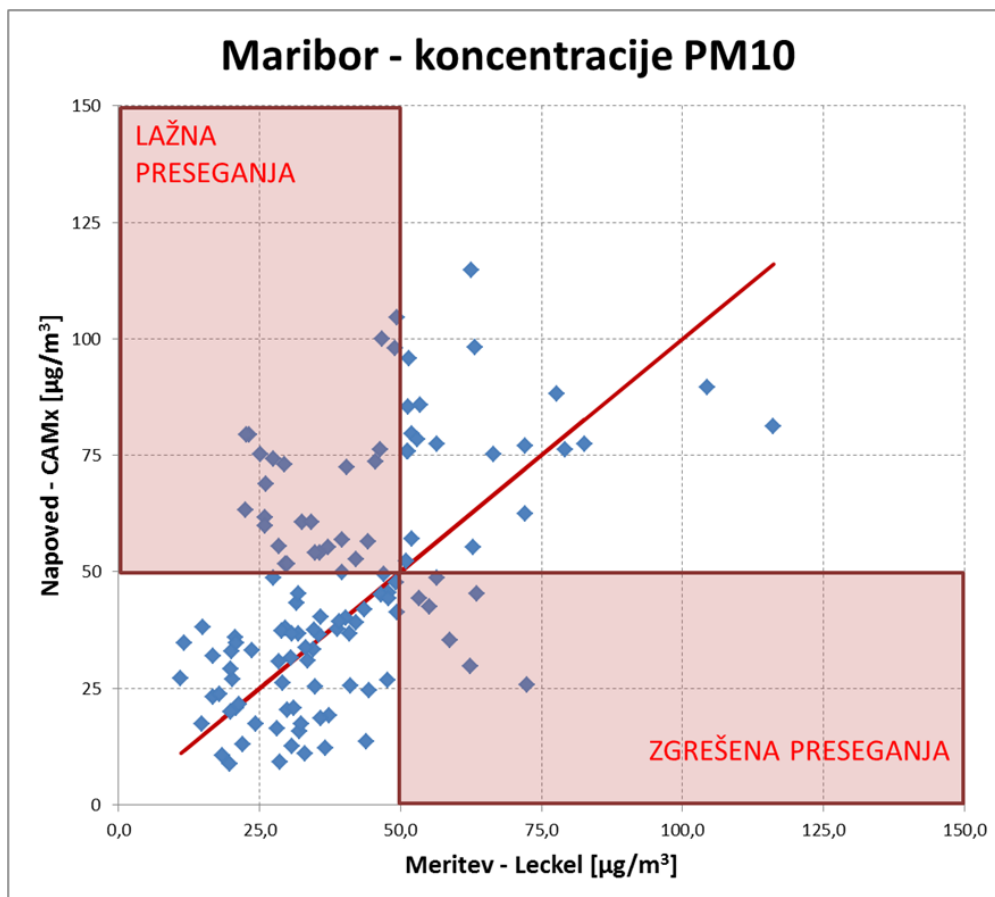
Dnevne mejne vrednosti koncentracije delcev PM10 v petem obdobju, od 18. januarja do 31. januarja 2013, so bile presežene kar osemkrat. Poleg izmerjene najvišje koncentracije v celotnem štirimesečnem obdobju ($116 \mu\text{g}/\text{m}^3$) je v tem obdobju model CAMx dobro napovedal povišanje koncentracije, ki naj bi 26. januarja 2013 znašala $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena vrednost je bila $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Druga najvišja izmerjena koncentracija v tem obdobju je bila dan pred najvišjo, 27. januarja 2013, $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model je napoved nekoliko podcenil, saj je tega dne napovedal povišanje koncentracije na $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vendar kljub temu dobro zaznal presežanje dnevne mejne vrednosti. Merilnik TEOM je tisti dan zabeležil vrednost $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tretja napovedana koncentracija, ki je odstopala od drugih, je bila samo $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dne 20. januarja 2013. Model je ponovno podcenil izmerjeno vrednost, ki je znašala $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Maksimum koncentracije v šestem obdobju, od 11. februarja do 20. februarja 2013, je model najbolje napovedal in ta napoved je bila najbližje izmerjeni vrednosti v celotnem štirimesečnem obdobju in sicer 46. dan meritev in sicer 15. februarja 2013. Napovedana koncentracija je bila $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z referenčnim merilnikom Leckel izmerjena $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in z merilnikom TEOM izmerjena višja, $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model CAMx je za 19. februar 2013 precenil napoved koncentracije z napovedanimi $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena koncentracija pa je bila pod dnevno mejno vrednostjo, $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v sedmem obdobju, od 28. februarja do 7. marca 2013, je model napovedal, a koncentracijo podcenil. Napovedana vrednost je bila samo $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena pa $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in sicer 5. marca 2013.

V zadnjem, osmem obdobju, od 27. marca do 31. marca 2013, je model v splošnem podcenil koncentracijo PM10. Najvišja izmerjena koncentracija dne 29. marca 2013 je znašala $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa zgolj $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V Mariboru je bilo v celotnem štirimesečnem obdobju zabeleženih 28 presežanj mejne dnevne koncentracije PM10, na podlagi napovedi z modelom CAMx naj bi bilo takšnih presežanj 47.



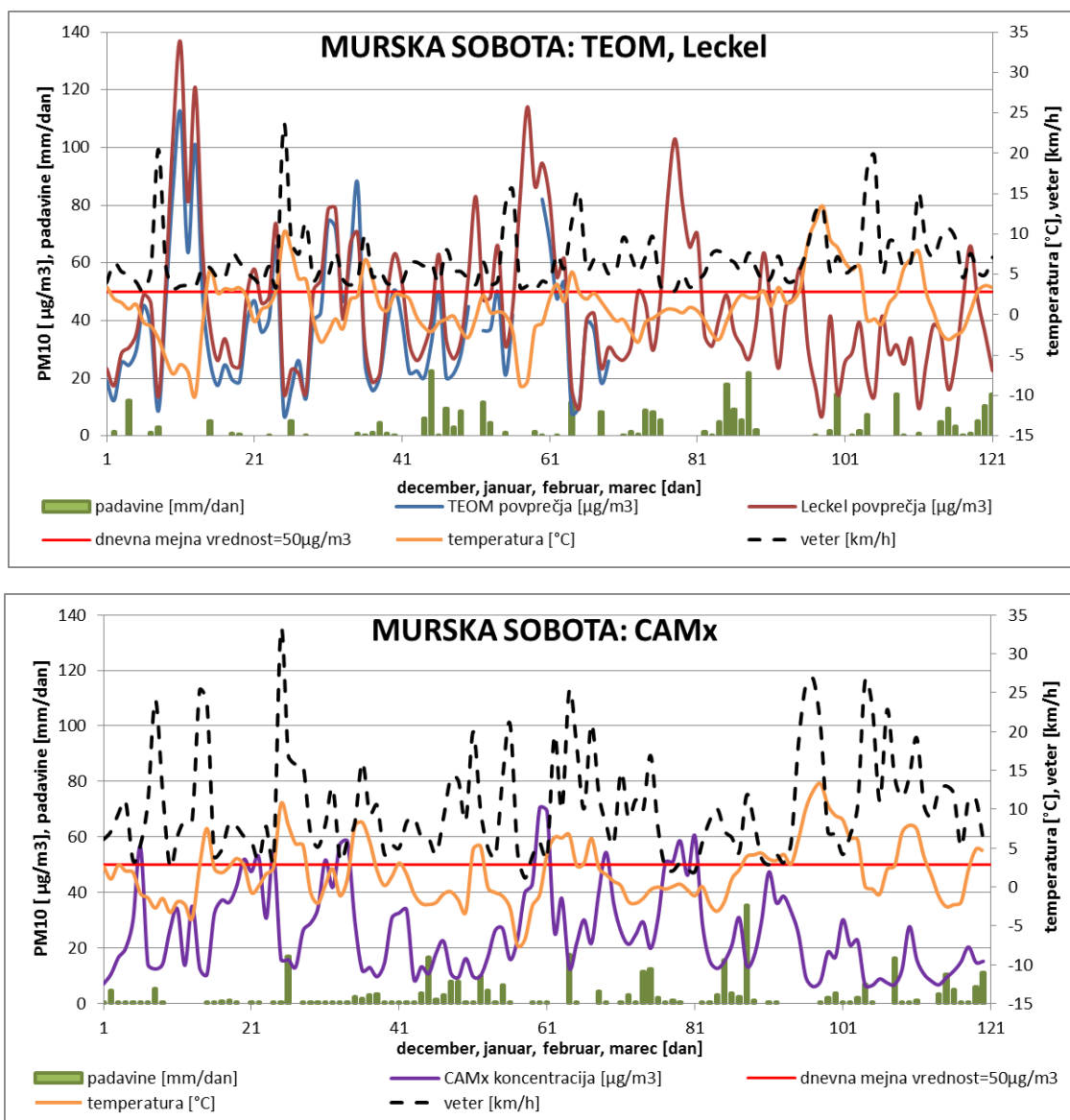
Slika 21: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Mariboru v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

V splošnem je model precenil koncentracije PM10, kar je razvidno tudi iz slike 21, še posebej, ko je šlo za visoke koncentracije. Vendar so bila odstopanja napovedi od meritev manjša kot pri Ljubljani. Zgrešenih preseganj je bilo malo in odstopanja niso bila zelo velika. Izrazito je odstopala izmerjena vrednost okoli $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ki jo je model ocenil le na blizu $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lažnih preseganj je bilo več, približno toliko kot pri Ljubljani, vendar so bolj »zgoščena« (bližje so črti, bolj zanesljive so napovedi).

Model ALADIN/Sl je za Maribor dokaj dobro napovedal padavinske in temperaturne razmere ter slabše vetrovne razmere, saj so bile hitrosti vetra precej precenjene. Vzrok za precenjene hitrosti vetra lahko iščemo v tem, da model ALADIN/Sl zaradi omejene prostorske ločljivosti ni sposoben realno opisati razmer na dejanskem merilnem mestu, kjer je nameščena ekološka postaja. Vendar zaznana večja odstopanja CAMx-ovih modelskih napovedi koncentracij PM10 od izmerjenih vrednosti težko povežemo s slabimi ALADIN-ovimi napovedmi vetra. Vzrok za odstopanje napovedanih vrednosti od izmerjenih je najbolj verjetno emisijska baza podatkov, ki jo uporablja CAMx.

3.3.3 Murska Sobota

Murska Sobota ima celinsko podnebje. Območje, kjer je merilna postaja, je pretežno kmetijsko. V razdalji 70 m od merilnega mesta je regionalna cesta, s prometom 12.000 vozil dnevno. Merilno mesto uvrščamo v tip podeželskega ali obmestnega ozadja. Na merilno mesto vplivajo izpusti iz bližnje ceste in naselij (v zimskem času individualna kurišča), pa tudi obdelave kmetijskih površin in ob močnejšem vetru tudi resuspenzija prahu. Koncentracije delcev PM10 izven naselij in dlje od prometnih cest so nižje (Atlas okolja, 2014).



Slika 22: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Murski Soboti v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

Preglednica 5: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar in februar 2013 na merilnem mestu Murska Sobota skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevni mejnih koncentracij v posameznem obdobju

MURSKA SOBOTA		število preseganj	
mesec	obdobje povišanih koncentracij	meritve Leckel	napoved CAMx
december	09.12.2012 - 14.12.2012	6	0
januar	30.12.2012 - 04.01.2013	5	3
	09.01.2013 - 23.01.2013	6	0
	26.01.2013 - 01.02.2013	7	2
februar	15.02.2013 - 19.02.2013	5	4

Najvišja izmerjena koncentracija delcev PM10 v celotnem štirimesečnem obdobju je bila 11. decembra 2012, torej v prvem obdobju povišanih koncentracij PM10, od 9. decembra do 14. decembra 2012 (na isti dan in v istem obdobju kot v Ljubljani). Z referenčnim merilnikom Leckel je bila ta dan izmerjena koncentracija PM10 $136 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z merilnikom TEOM pa manj, $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (slika 22). Napovedana koncentracija z modelom CAMx je bila za tisti dan skoraj za $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nižja, $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model je zelo podcenil koncentracijo PM10, najbolj v štirimesečnem obdobju.

Model CAMx tega viška koncentracij PM10 ni ustrezno zaznal, najvišje koncentracije v celotnem štirimesečnem obdobju je napovedal za 29. januar 2013, ko je bila napovedana koncentracija $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dneva z povišano dnevno mejno vrednostjo koncentracije PM10 sta bila tudi 21. december 2012 in 24. december 2012, ki pa ju nisem vključila v nobeno obdobje. 21. decembra 2012 je model koncentracijo podcenil, saj je bila izmerjena koncentracija $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa je bila pod dnevno mejno vrednostjo, $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tri dni kasneje pa je model ravno tako podcenil vrednost z $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, saj je bila izmerjena vrednost $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v drugem obdobju, od 30. decembra 2012 do 4. januarja 2013, je model slabo napovedal, koncentracijo je ponovno podcenil. Izmerjena koncentracija je bila namreč 1. januarja 2013 $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Naslednji dan, 2. januarja 2013, je model CAMx v vseh petih obdobjih edinkrat precenil koncentracijo delcev PM10. V štirimesečnem obdobju se je model CAMx najbolj obnesel 3. januarja 2013, ko je napovedal povišanje koncentracije PM10 na $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena koncentracija pa je bila $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Leckel) oziroma $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TEOM).

Dnevne mejne vrednosti koncentracije delcev PM10 v tretjem obdobju, od 9. januarja do 23. januarja 2013, so bile presežene kar šestkrat (preglednica 5). Model CAMx preseganja v tem obdobju ni napovedal niti enkrat. Izmerjena vrednost v tem obdobju je bila najvišja v celotnem štirimesečnem obdobju, in sicer 20. januarja 2013, ko je merilnik Leckel izmeril $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, model CAMx pa je napovedal le $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Podatka za TEOM ravno za ta dan ni.

Pojav najvišje koncentracije v četrtem obdobju, od 26. januarja do 1. februarja 2013, je model podcenil za $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena koncentracija je bila dne 27. januarja 2013, $114 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Povišane koncentracije v zadnjem, petem obdobju, od 15. februarja do 19. februarja 2013, je model napovedal, vendar napovedi tudi tokrat podcenil. V tem obdobju je bila

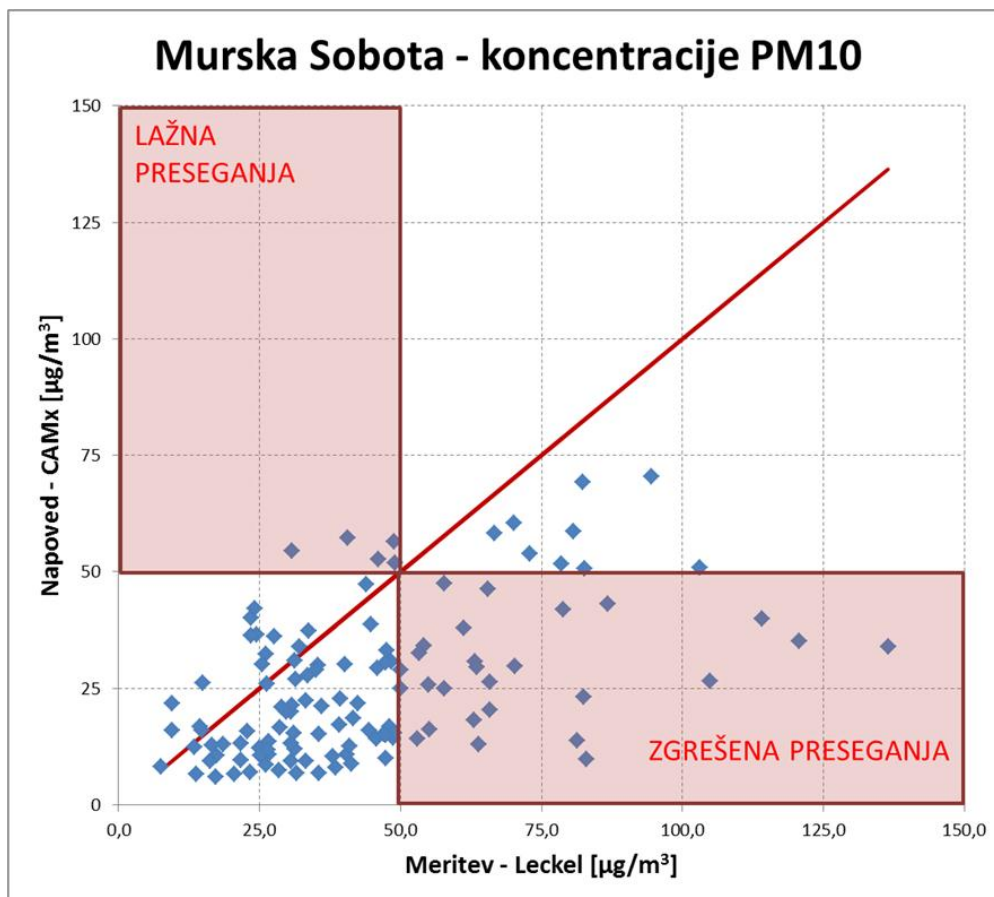
vseh pet dni izmerjena dnevna mejna vrednost koncentracije presežena, napovedana dnevna pa za štiri dni. Maksimum koncentracije v tem obdobju je bil dosežen 16. februarja 2013 in sicer je znašal $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model CAMx je meritev podcenil na $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zadnji dan v mesecu februarju 2013 je model CAMx podcenil vrednost koncentracije z $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, izmerjena vrednost pa je bila $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V mesecu marcu je prišlo do preseganj dnevne mejne vrednosti koncentracije le dvakrat in sicer 5. marca 2013 ($58 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in 28. marca 2013 ($66 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Model je ponovno podcenil vrednost, 5. marca 2013 na $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 28. marca 2013 na $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Vrednost koncentracije PM10 za dva »osamelca«, 29. decembra 2012 in 11. februarja 2013, je bila izmerjena na $50,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Preseganja dnevne mejne vrednosti za ta dva dni ni bilo napovedanega. CAMx je 29. decembra 2012 meritev podcenil na $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 11. februarja 2013 na $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V Murski Soboti je bilo v celotnem štirimesečnem obdobju zabeleženih 36 preseganj mejne dnevne koncentracije PM10, na podlagi napovedi z modelom CAMx naj bi bilo takšnih preseganj le 14.



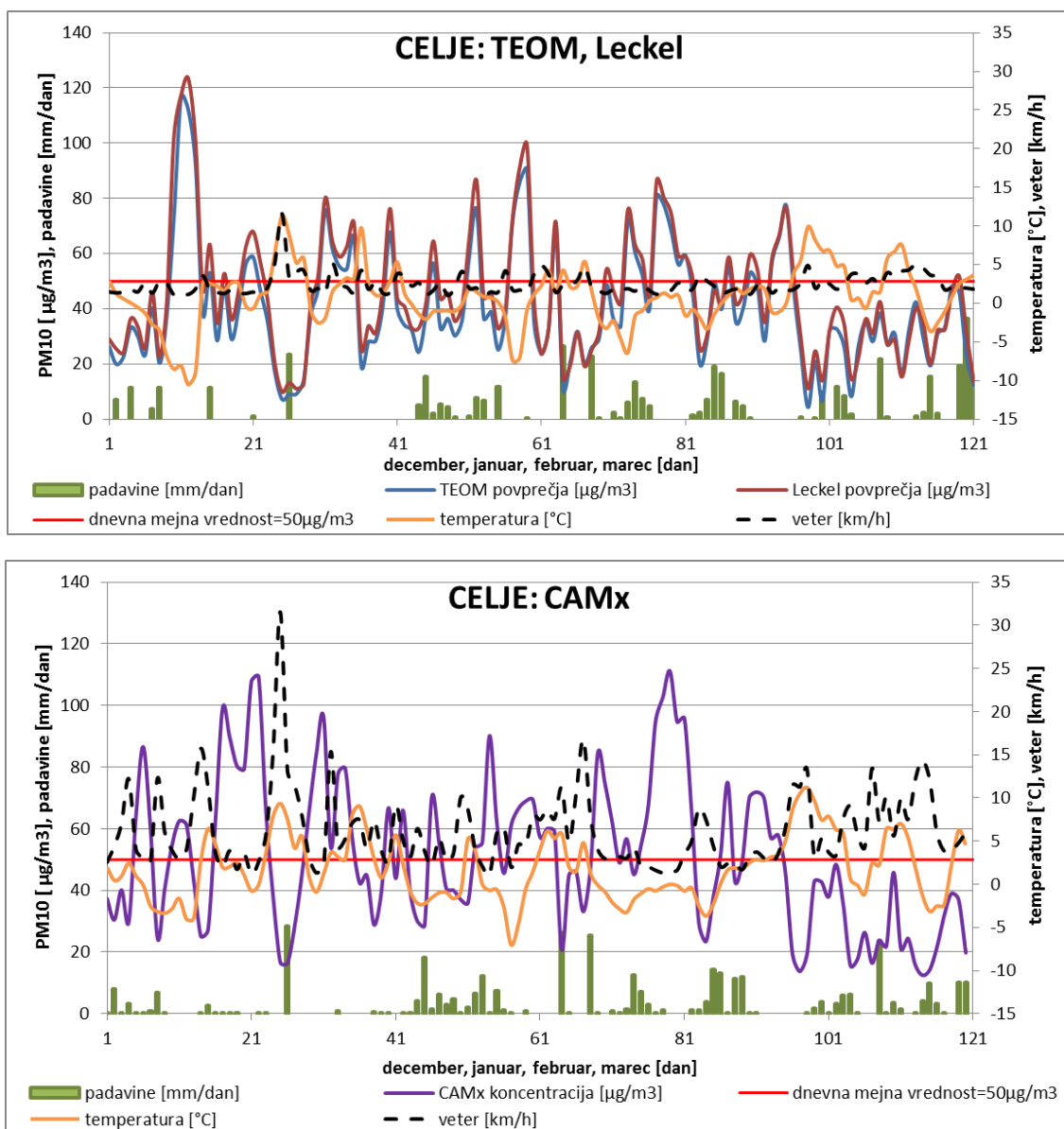
Slika 23: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Murski Soboti v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

V splošnem je model slabo opisal in večinoma precej podcenil izmerjene vrednosti koncentracije PM10, kar je razvidno iz slike 23. Zgrešil je večino izmerjenih preseganj dnevne mejne koncentracije. Maksimalna vrednost izmerjene koncentracije je bila preko $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, medtem, ko je model napovedal višino koncentracije le blizu $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Samo petkrat je prišlo do tega, da je model napovedal preseganje dnevne mejne vrednosti, dejanske vrednosti pa niso presegle mejne vrednosti.

Tudi v primeru Murske Sobote težko iščemo vzroke za slabe napovedi modela CAMx v vhodnih meteoroloških podatkih, saj ALADIN/SI dokaj dobro napove temperature, padavinske in vetrovne razmere, čeprav je veter nekoliko precenjen. Očitno emisijska baza, ki jo uporablja CAMx, ne zajame ustrezno dejanskih izpustov v neposredni bližini ekološke postaje, ki vplivajo na lokalno onesnaženost zraka z delci PM10 in prihajajo pozimi večinoma iz malih kurišč. Poleg tega je lahko vzrok za odstopanja tudi v tem, da povprečne lastnosti modelske točke, ki predstavlja območje velikosti $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, v primeru Murske Sobote precej odstopajo od lastnosti kraja, kjer dejansko potekajo meritve.

3.3.4 Celje

Na vzhodu Slovenije prevladuje celinsko podnebje. Doline in kotline tega območja so slabo prevetrene, pogosto se pojavljajo plitvi temperaturni obrati, ki močno poslabšajo pogoje za širjenje onesnaženosti zraka. Večja naselja in večji viri izpustov so v kotlinah in dolinah. Merilno mesto Celje je po klasifikaciji uvrščeno v tip mestnega ozadja. Koncentracije delcev so pogosto povišane. Na merilno mesto najbolj vplivajo izpusti onesnaževal iz lokalnega prometa, individualnih kurišč ter iz industrije (Atlas okolja, 2014).



Slika 24: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Celju v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

Preglednica 6: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Celje skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevnih mejnih koncentracij v posameznem obdobju

CELJE		število preseganj	
mesec	obdobje povišanih koncentracij	meritve Leckel	napoved CAMx
december	10.12.2012 - 22.12.2012	9	10
januar	30.12.2012 - 04.01.2013	6	6
	20.01.2013 - 28.01.2013	5	7
februar	11.02.2013 - 20.02.2013	9	9
marec	01.03.2013 - 06.03.2013	5	4

Najvišja izmerjena koncentracija delcev PM10 v celotnem štirimesečnem obdobju je bila 12. decembra 2012, torej v prvem obdobju povišanih koncentracij PM10, od 10. decembra do 22. decembra 2012. Z referenčnim merilnikom Leckel je bila ta dan izmerjena koncentracija PM10 $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z merilnikom TEOM pa $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (slika 24). Model CAMx je 12. decembra 2012 najbolj podcenil koncentracijo PM10, saj je bila napovedana vrednost le $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. V splošnem lahko opazimo, da TEOM ob minimalnih in maksimalnih koncentracijah običajno izmeri malo nižje vrednosti kot Leckel. Kljub manjšim odstopanjem lahko na podlagi te primerjave zaključim, da so meritve Leckel primerljive z meritvami TEOM.

Model CAMx tega viška koncentracij PM10 ni ustrezno zaznal, saj je najvišjo koncentracijo v tem obdobju napovedal za 21. december 2012, ko je bila napovedana koncentracija $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Glede na to, da je model ALADIN/SI za to obdobje dokaj dobro napovedal vetrovne, padavinske in temperaturne razmere, je zamik verjetno posledica odstopanj podatkov iz emisijske baze, ki jo uporablja CAMx, od dejanskih izpustov v tem obdobju. Gre za podoben primer kot pri meritvah v Ljubljani.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v drugem obdobju, od 30. decembra 2012 do 4. januarja 2013, je model dobro napovedal, a koncentracijo nekoliko precenil. Izmerjena koncentracija je bila namreč 31. decembra 2012 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Izpostavila bi še 9. januar 2013 in 15. januar 2013, čeprav ju nisem vključila v nobeno daljše obdobje povišanih koncentracij PM10. Izmerjena koncentracija je obkraj presegla dnevno mejno vrednost in sicer je znašala 9. januarja 2013 $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 15. januarja 2013 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Za 9. januar 2013 je model CAMx koncentracijo dobro napovedal ($67 \mu\text{g}/\text{m}^3$), prav tako tudi za 15. januar 2013, ko naj bi bila po napovedi koncentracija ponovno nad dnevno mejno vrednostjo in sicer $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije v tretjem obdobju, od 20. januarja do 28. januarja 2013, je model podcenil in napovedal $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena koncentracija je bila zadnjega dne $99 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

1. februarja 2013 je model CAMx podcenil koncentracijo, ki je znašala $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena je bila za $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ več, $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 8. februarja 2013 pa je meritev kazala na $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, model pa je napoved precenil s $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentracije.

Dnevne mejne vrednosti koncentracije delcev PM10 v četrtem obdobju, od 11. februarja do 20. februarja 2013, so bile presežene devetkrat (preglednica 6). 13. februarja 2013 je model CAMx povišanje koncentracije, ki naj bi znašala $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dobro napovedal. Izmerjena vrednost je znašala $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najvišja izmerjena

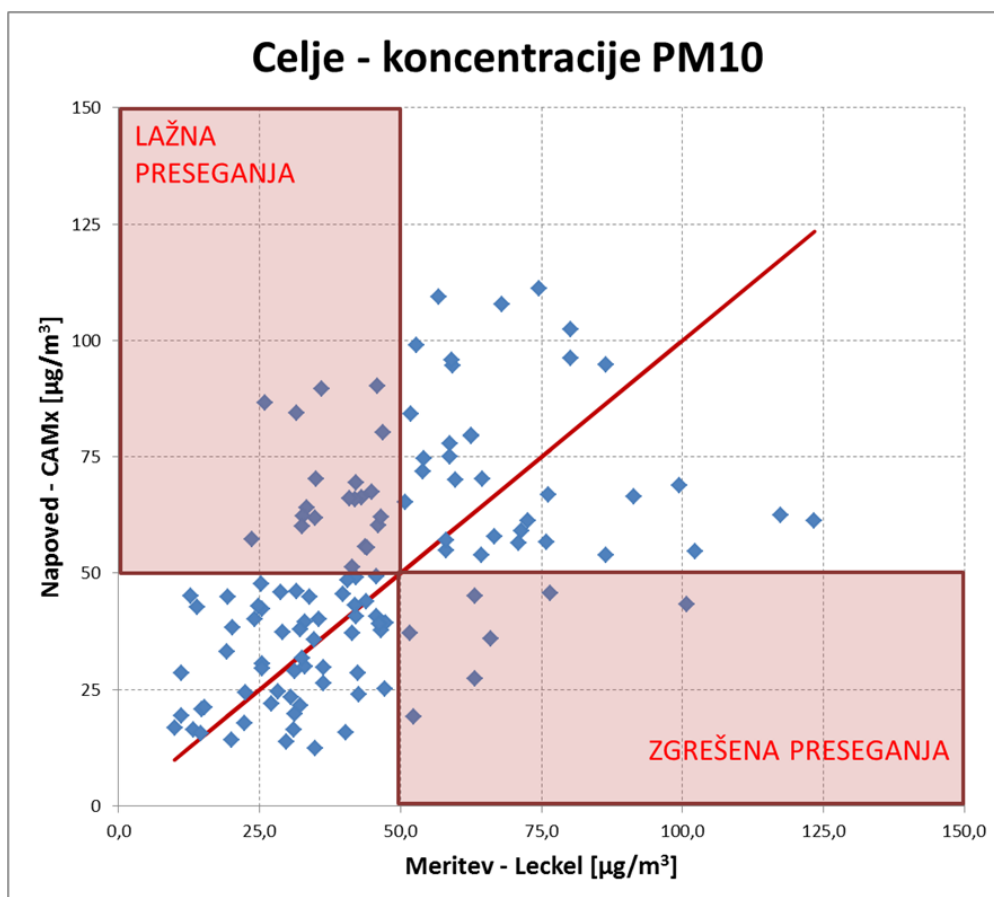
koncentracija v tem obdobju je bila 15. februarja 2013, $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A model je napoved nekoliko precenil, saj je napovedal povišanje koncentracije na $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Konec februarja je prišlo do preseganj dnevnih mejnih koncentracij še dvakrat in sicer 25. februarja 2013 ($59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in 28. februarja 2013 ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Napovedani vrednosti sta bili precenjeni, dne 25. februarja 2013 na $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 28. februarja 2013 na $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Maksimum koncentracije v petem obdobju, od 1. marca do 6. marca 2013, je model najbolje napovedal in ta napoved presežene koncentracije je bila najbližje izmerjeni v celotnem štirimesečnem obdobju in sicer 3. marca 2013. Napovedana koncentracija je bila $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z referenčnim merilnikom Leckel izmerjena $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in z merilnikom TEOM izmerjena, natančno napovedanih, $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zadnja izmerjena presežena mejna dnevna koncentracija PM10 je bila 29. marca 2013 in sicer $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Merilnik CAMx je koncentracijo podcenil in napovedal $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V Celju je bilo v celotnem štirimesečnem obdobju zabeleženih 41 preseganj mejne dnevne koncentracije PM10, na podlagi napovedi z modelom CAMx naj bi bilo takšnih preseganj 55.

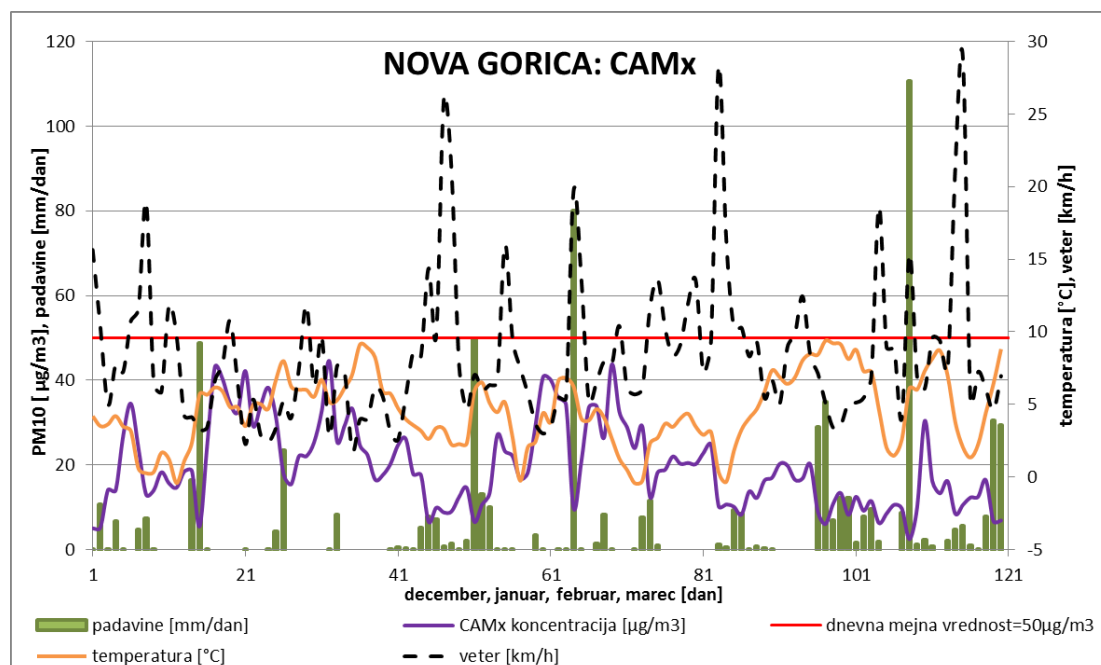
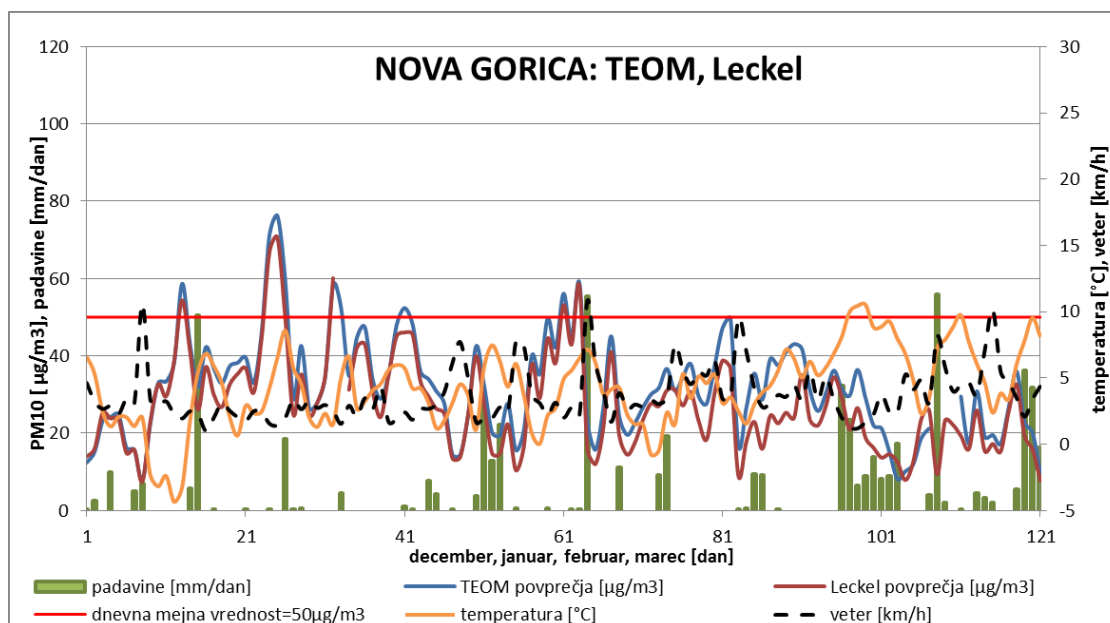


Slika 25: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Celju v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

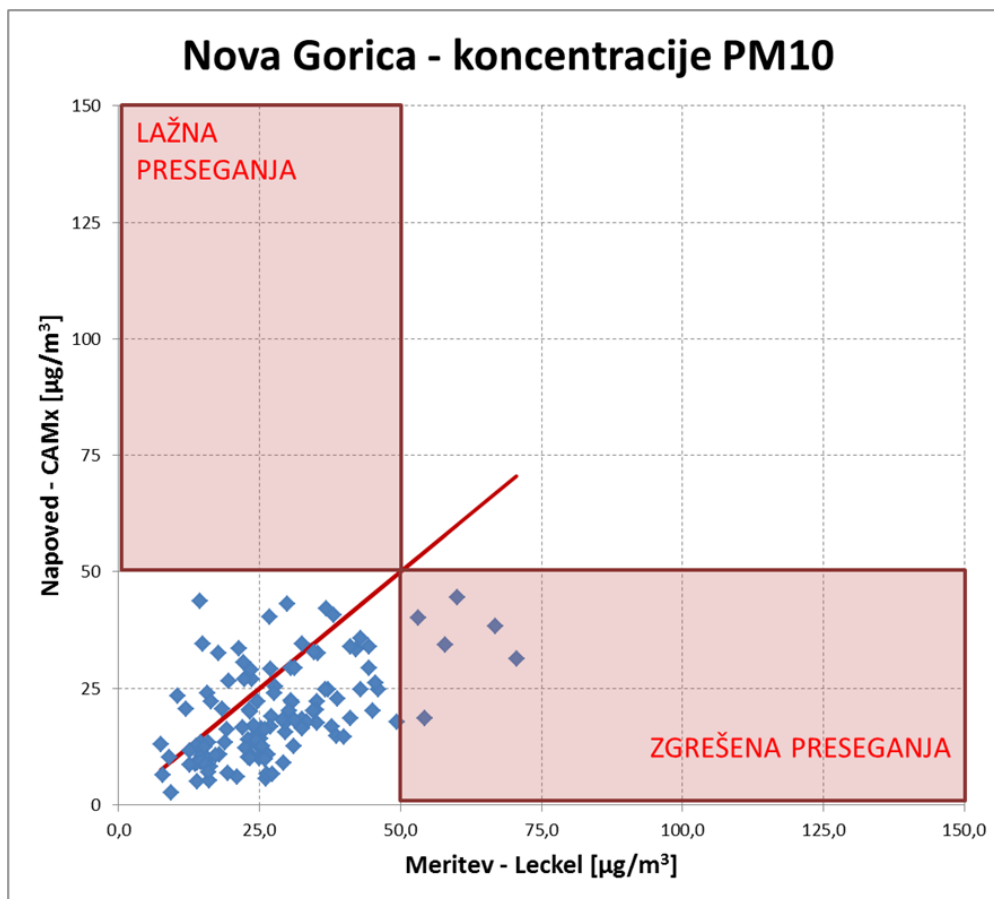
V primeru Celja je bil model dokaj dober, čeprav je prihajalo do nekaj odstopanj, podobno kot v primeru Ljubljane, vendar z manjšim številom lažnih preseganj. Preseganj, do katerih je dejansko prišlo in niso bila napovedana, je bilo v celotnem štirimesečnem obdobju le 7 (slika 25). Med zgrešenimi preseganji velja posebej izpostaviti izmerjeno vrednost blizu $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ki jo je model ocenil pod dnevno mejno vrednost na okoli $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izpostavila bi še meritev okrog $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ki jo model napovedal le malo nad $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in meritev malo nad $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ki jo je model napovedal le okrog $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Po drugi strani lahko vidimo, da je model v kar velikem številu primerov napovedal vrednosti med $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ter samo v petih primerih preko $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, medtem ko so bile dejansko izmerjene vrednosti pod $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.5 Nova Gorica

Pogoji za širjenje onesnaženosti zraka na območju merilnega mesta Nova Gorica so boljši kot v notranjosti države, saj je območje bolj prevetreno, pa tudi temperaturnih obratov je malo. Postaja za spremljanje kakovosti zraka je postavljena blizu dveh prometnih cest, po katerih je povprečni dnevni promet 47.000 vozil. Merilno mesto Nova Gorica uvrščamo v tip mestnega ozadja. V bližnji okolici postaje (150 m) je krožišče in velik nakupovalni center (Atlas okolja, 2014).



Slika 26: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Novi Gorici v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013



Slika 27: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Novi Gorici v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

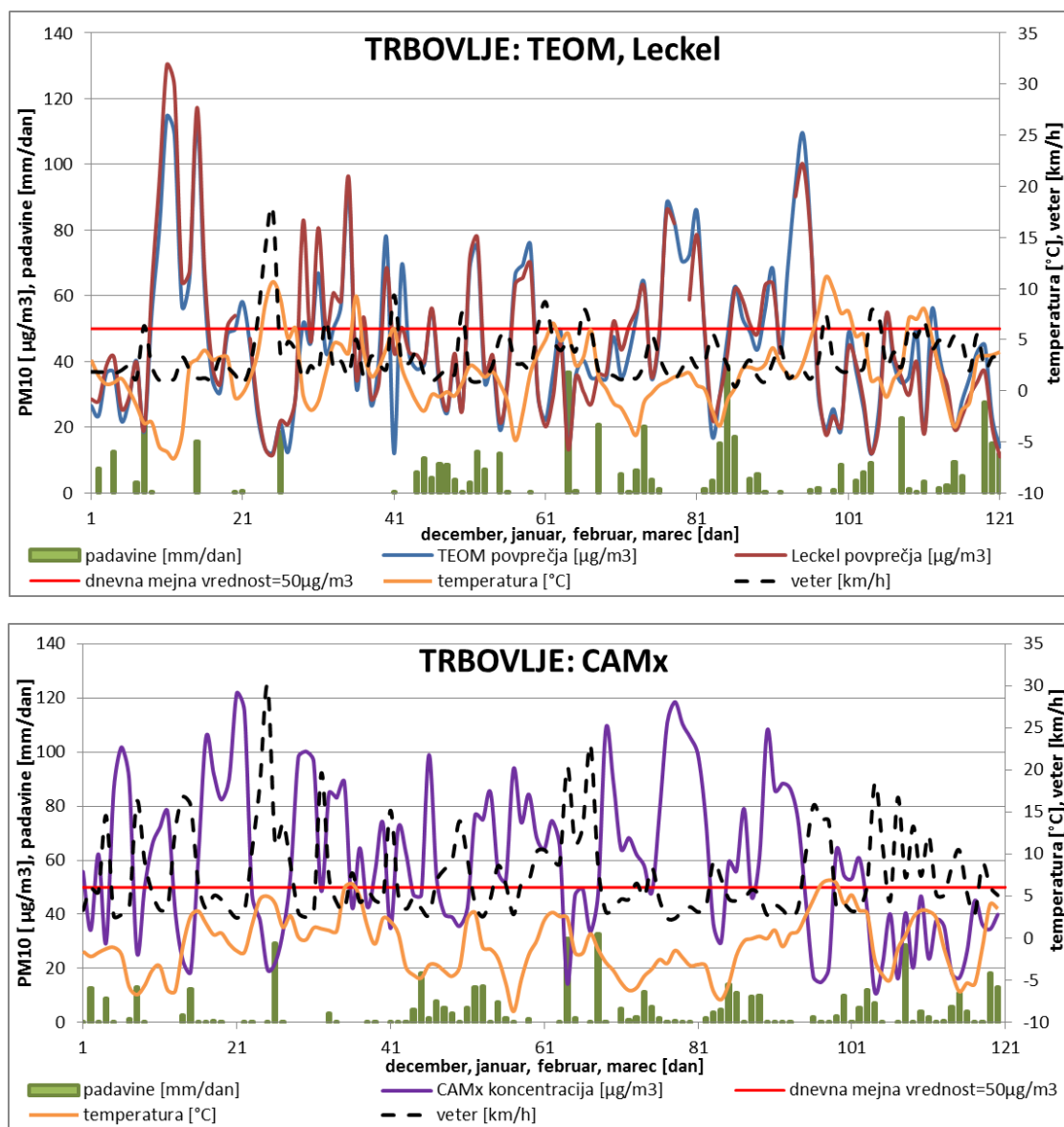
V Novi Gorici je v celotnem štirimesečnem obdobju koncentracija PM10 presegla dnevno mejno vrednost samo šestkrat. Model CAMx ni nikoli napovedal, da bo prišlo do presegevanj (slika 26 in slika 27). Najvišja izmerjena koncentracija je bila 25. decembra 2012, $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Napovedana je bila za kar $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ manjša, $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Napoved za 1. januar 2013 je bila podcenjena na $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, saj je bila izmerjena vrednost koncentracije $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Model ALADIN/SI je za merilno mesto Nova Gorica dokaj dobro napovedal temperaturne in padavinske razmere, čeprav lahko opazimo tudi nekaj posameznih večjih odstopanj. Predvsem pa so izrazito precenjene modelske napovedi vetra, kar bi lahko bil eden od vzrokov za praktično stalno podcenjene vrednosti koncentracij PM10. Po drugi strani bi bil lahko dodaten vzrok, podobno kot pri Murski Soboti, tudi v primeru Nove Gorice neustrezen opis emisij delcev v modelu CAMx, predvsem, kar se tiče prometa in malih kurišč.

Delci PM10 v Novi Gorici niso večji ekološki in zdravstveni problem, kar je razvidno tudi iz podatkov za testno obdobje, saj je bilo presegevanj dnevne mejne koncentracije ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) zelo malo v primerjavi z ostalimi obravnavanimi kraji. To pojasnjuje, zakaj za Mestno občino Nova Gorica ni bil sprejet poseben odlok o načrtu za kakovost zraka, kot so bili sprejeti za Ljubljano, Maribor, Mursko Soboto, Celje, Novo Mesto, Kranj in Zasavje.

3.3.6 Trbovlje

Naselje Trbovlje leži v ozkih stranski dolini reke Save. Meritve višine temperaturnih obratov v preteklosti so pokazale, da se inverzna plast največkrat nahaja 200 m nad dnom doline. Vetrovi v dolini so zelo šibki, onesnaženost z delci pa posledično zelo velika. Lega merilnega mesta je predmestnega tipa z vplivom industrije in delno prometa ter predvsem v zimskem času individualnih kurišč (Atlas okolja, 2014).



Slika 28: Izmerjena (zgoraj) in napovedana (spodaj) koncentracija delcev PM10 in meteorološki podatki (padavine, temperature zraka, hitrost vetra) v Trbovljah v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

Preglednica 7: Pregled obdobj z izmerjenimi povišanimi koncentracijami PM10 za mesec december 2012 ter januar, februar in marec 2013 na merilnem mestu Trbovlje skupaj s številom preseganj (meritve in napovedi) dnevnih mejnih koncentracij v posameznem obdobju

TRBOVLJE		število preseganj	
mesec	obdobje povišanih koncentracij	meritve Leckel	napoved CAMx
december	09.12.2012 - 21.12.2012	10	8
januar	29.12.2012 - 06.01.2013	6	7
	20.01.2013 - 28.01.2013	5	8
februar	08.02.2013 - 19.02.2013	8	11
	24.02.2013 - 28.02.2013	4	4
marec	01.03.2013 - 06.03.2013	4	4

Najvišja izmerjena koncentracija delcev PM10 v celotnem štirimesečnem obdobju je bila 11. decembra 2012, torej v prvem obdobju povišanih koncentracij PM10, od 9. decembra do 21. decembra 2012 (preglednica 7). Z referenčnim merilnikom Leckel je bila ta dan izmerjena koncentracija PM10 $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z merilnikom TEOM pa $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (slika 28). Napovedana vrednost modela CAMx je bila podcenjena na $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 15. decembra 2012 je model CAMx koncentracije PM10 v celotnem štirimesečnem obdobju najslabše napovedal (podcenil) in sicer z vrednostjo le $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Izmerjena vrednost z merilnikom Leckel je bila za $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ višja ($117 \mu\text{g}/\text{m}^3$), z merilnikom TEOM pa je znašala $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model je napovedal visoke koncentracije pred tem obdobjem, ki pa dejansko niso bile izmerjene (podobno kot v Ljubljani in v Celju).

Model CAMx najvišjih koncentracij PM10 ($130 \mu\text{g}/\text{m}^3$) v tem obdobju ni ustrezno zaznal, saj je najvišjo koncentracijo $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ napovedal za 21. december 2012, izmerjena z merilnikom je TEOM pa $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije PM10 v drugem obdobju, od 29. decembra 2012 do 6. januarja 2013, je model dobro napovedal, samo koncentracijo pa nekoliko podcenil. Izmerjena koncentracija je bila namreč najvišja 4. januarja 2013 in sicer $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, napovedana pa $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

9. januar 2013 in 15. januar 2013 sta »osamelca«, ki nista vključena v nobeno daljše obdobje s povišanimi koncentracijami. Izmerjena koncentracija je bila obakrat presežena in sicer je znašala $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model CAMx je koncentraciji precenil. Za 9. januar 2013 je napovedal koncentracijo v vrednosti $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 15. januarja 2013 pa naj bi bila po napovedi koncentracija visoko nad dnevno mejno vrednostjo, $99 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pojav najvišje koncentracije v tretjem obdobju, od 20. januarja do 28. januarja 2013, je model najbolje napovedal. Napoved visoke koncentracije je bila v tem obdobju najbližje izmerjeni v celotnem štirimesečnem obdobju in sicer 21. januarja 2013. Napovedana koncentracija je bila $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, z referenčnim merilnikom Leckel izmerjena $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in z merilnikom TEOM $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Maksimum koncentracije v četrtem obdobju, od 8. februarja do 19. februarja 2013, je bil izmerjen 15. februarja 2013 in sicer v vrednosti $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Model CAMx je vrednost koncentracije precenil na $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

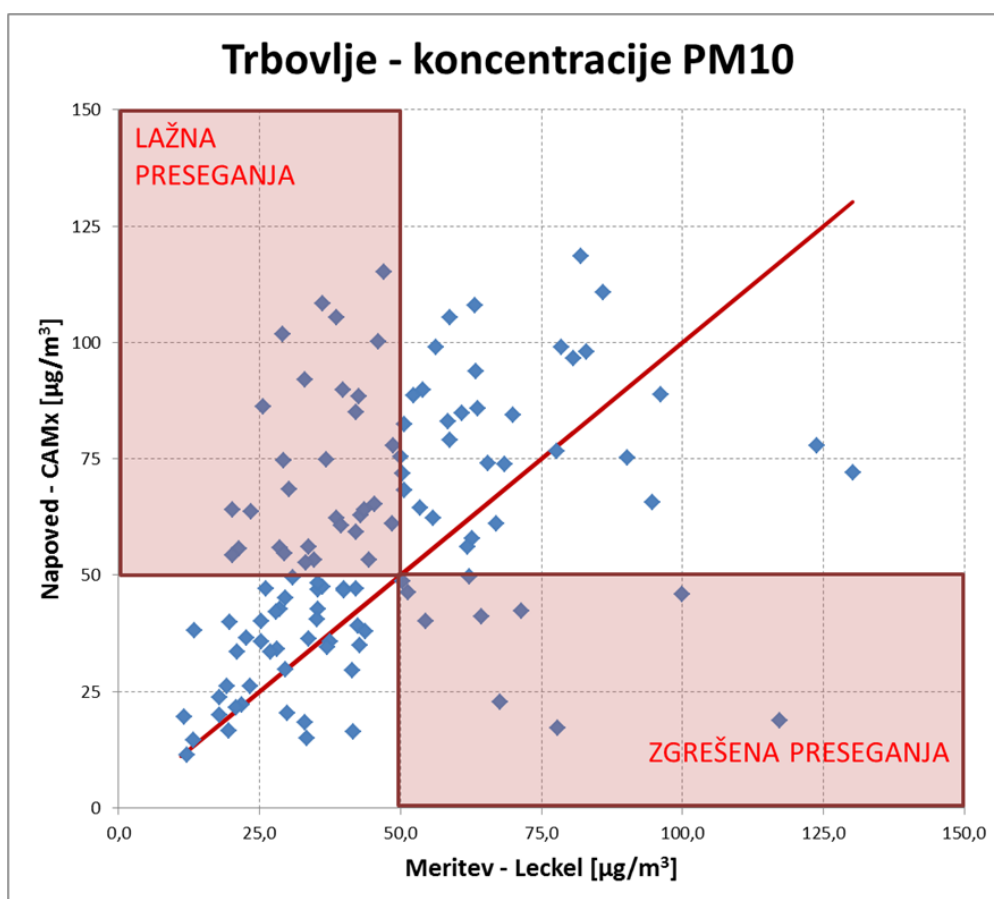
Dnevne mejne vrednosti koncentracije delcev PM10 v petem obdobju, od 24. februarja do 28. februarja 2013, so bile presežene štirikrat. 28. februarja 2013 je model CAMx

povišanje koncentracije, ki naj bi znašala $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$, precenil. Izmerjena vrednost z merilnikom Leckel je bila $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Izmerjeno najvišjo koncentracijo PM10 v šestem obdobju, od 1. marca do 6. marca 2013, je model podcenil z vrednostjo $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Merilnik Leckel je izmeril 26. februarja 2013 vrednost $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, merilnik TEOM pa še višjo, $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zadnji dan presežene dnevne mejne koncentracije v mesecu marcu je bil 16. marca 2013 s povprečno dnevno koncentracijo PM10 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Napoved modela CAMx je bila podcenjena na $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V Trbovljah je bilo v celotnem štirimesečnem obdobju zabeleženih 43 preseganj mejne dnevne koncentracije PM10, na podlagi napovedi z modelom CAMx naj bi bilo takšnih preseganj 67.



Slika 29: Primerjava izmerjenih in napovedanih koncentracij PM10 v Trbovljah v obdobju od 01.12.2012 do 31.03.2013

V splošnem je model CAMx večinoma precenil koncentracije PM10, kar je razvidno tudi iz slike 29. Model je sicer nekaj izmerjenih zelo visokih vrednosti koncentracij PM10 tudi podcenil (desni spodnji kot grafa: izmerjeno vrednost okrog $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ je model ocenil na blizu $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vrednost okoli $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pa pod $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Po drugi strani pa lahko vidimo, da je model v kar precejšnjem številu primerov napovedal vrednosti preko $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ko so bile dejansko izmerjene vrednosti pod $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Model ALADIN/SI je za merilno mesto Trbovlje dokaj dobro napovedal temperaturne razmere in slabše vetrovne razmere, saj so bile hitrosti vetra precej precenjene. Kljub temu so bile tudi koncentracije PM10 večinoma precenjene. Padavinskih razmer na merilnem mestu Trbovlje ne merijo, zato sem uporabila podatke iz najbližje merilne postaje Hrastnik, ob predpostavki, da so padavinske razmere podobne. Padavine so bile dobro napovedane.

Vzrok za precenjene hitrosti vetra lahko iščemo v tem, da model ALADIN/SI zaradi omejene prostorske ločljivosti ni sposoben dobro opisati razmer na dejanskem merilnem mestu, kjer je nameščena ekološka postaja. Odstopanja CAMx napovedi koncentracij PM10 od izmerjenih vrednosti težko povežemo s slabimi ALADIN-ovimi napovedmi vetra, saj bi precenjene hitrosti vetra morale voditi do podcenjenih koncentracij PM10. Zato je vzrok za odstopanja napovedi in meritev koncentracije PM10 verjetno, podobno kot pri Murski Soboti in Novi Gorici, tudi v primeru Trbovelj neustrezen opis emisij delcev v modelu CAMx, predvsem, kar se tiče prometa, malih kurišč in industrije.

3.4 Povzetek razmer v zimi 2012/2013

Koncentracije delcev PM10 so v decembru 2012 prekoračile mejno dnevno vrednost na vseh merilnih mestih. Največ prekoračitev, v Trbovljah kar 12, je bilo na zaprtem območju Zasavja zaradi vpliva industrije in delno prometa ter v zimskem času tudi zaradi individualnih kurišč. Glede na onesnaženost zraka z delci PM10 sta bili merilni mesti Celje in Murska Sobota na drugem mestu. Izmerjeno je bilo 11 preseganj dnevne mejne koncentracije PM10. Sledilo je merilno mesto Ljubljana (8), Maribor (4) in nazadnje najmanj onesnaženo mesto, Nova Gorica (3).

Onesnaženost zraka se je v januarju 2013 glede na december 2012 nekoliko povečala, predvsem zaradi več suhega in stabilnega vremena (povišanih temperatur). Januarja 2013 je bila mejna dnevna koncentracija delcev PM10 prav tako prekoračena na vseh merilnih mestih in večkrat kot v mesecu decembru 2012. Največkrat, 15-krat, je bila mejna dnevna vrednost presežena na merilnem mestu Murska Sobota, ki je pod vplivom individualnih kurišč in prometa. Izredno se je povišala koncentracija na merilnem mestu Maribor, prekoračena je bila kar 13-krat (v decembru le 4 prekoračitev). V Trbovljah je bila ena prekoračitev več kot mesec prej, skupaj 13 prekoračitev. Prekoračitev na merilnem mestu Celje je bilo enako število kot decembra (11). Manj prekoračitev kot v mesecu decembru pa je bilo le na merilnem mestu Ljubljana (6) in Nova Gorica (2). Velike koncentracije so bile predvsem posledica individualnih kurišč, ki so v času mrzlega vremena glavni vir delcev PM10.

Februarske prekoračitve dnevni mejni koncentracij delcev PM10 so se povišale na merilnem mestu Celje (13). V Trbovljah je bilo prekoračitev enako število kot meseca januarja (13). Prekoračitve na merilnem mestu Murska Sobota so se zmanjšale na 8. Mesti Ljubljana in Maribor sta zabeležili vsaka 6 prekoračitev. V »najčistejši« Novi Gorici pa je bila mejna dnevna koncentracija PM10 presežena le enkrat.

Onesnaženost zraka v marcu se je zmanjšala glede na vse prejšnje mesece (december, januar in februar). Temperature so se začele dvigati, posledično je bilo manj kurjenja, s tem pa manj izpustov. Zabeleženih prekoračitev koncentracije 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na merilnem mestu Celje je bilo 6. V mestih Maribor in Trbovlje je bilo izmerjenih prekoračitev 5. Dvakrat je bila zabeležena presežena dnevna mejna koncentracija delcev PM10 na merilnih mestih Murska Sobota in Ljubljana. Nova Gorica pa je

dosegala v marcu že prav prijetne spomladanske temperature in vpliv onesnaženosti zraka se je zelo zmanjšal, saj ni bilo zabeleženega preseganja dnevnih mejnih koncentracij.

V testnem štirimesečnem obdobju je bilo največ izmerjenih prekoračitev dnevnih mejnih koncentracij delcev PM10 z merilnikom Leckel na merilnem mestu Trbovlje in sicer kar 43, vsota, ki je dovoljena za celo leto pa je le 35. Sledi merilno mesto Celje z 41 prekoračitvami, Murska Sobota pa je dosegla 36 prekoračitev. Ostala merilna mesta v štirih mesecih niso presegla letne dovoljene prekoračitve: Maribor 28 preseganj, Ljubljana 22 preseganj in merilno mesto Nova Gorica, ki je zabeležilo le 6 preseganj mejne dnevne koncentracije delcev PM10.

Preglednica 8: Število preseganj dnevne mejne koncentracije v celotnem štirimesečnem obdobju na vseh merilnih mestih, napovedanih koncentracij z modelom CAMx in izmerjenih z merilnikom Leckel

merilno mesto	število preseganj dnevne mejne koncentracije [50 µg/m ³]		ocena modela
	CAMx	Leckel	
Ljubljana	50	22	precenil
Maribor	47	28	precenil
Murska Sobota	14	36	podcenil
Celje	55	41	precenil
Nova Gorica	0	6	podcenil
Trbovlje	67	43	precenil
SKUPAJ	233	176	PRECENIL

V štirih mesecih je bilo na šestih merilnih mestih izvedenih 715 meritvev. Dejanskih izmerjenih preseganj dnevnih mejnih koncentracij delcev PM10 z merilnikom Leckel je bilo 176, model CAMx pa je napovedal 233 preseganj (preglednica 8).

4 ZAKLJUČKI

Z diplomskim delom sem potrdila prvo hipotezo, da obdobja z visokimi koncentracijami delcev PM10 v zunanem zraku sledijo daljšim, nekajdnevnim obdobjem stabilnega vremena in se prekinejo s spremembo vremenske situacije. Obdobja s povišanimi koncentracijami PM10 v zimi 2012/2013 je spremljala prisotnost temperaturnih obratov na območju Slovenije, zato so se pojavile približno istočasno na vseh merilnih mestih. Podobno velja tudi za »osamelce« s preseženimi dnevnimi mejnimi vrednostmi koncentracije PM10. Obdobja s povišanimi koncentracijami PM10 je prekinila povečana vetrovnost oziroma pojav padavin.

Deloma sem potrdila drugo hipotezo, da model CAMx v večini primerov zadovoljivo opiše koncentracije delcev PM10 v zunanem zraku v obdobjih s povečano onesnaženostjo zraka na območju Slovenije. Ujemanje med modelskimi napovedmi in meritvami je bilo dokaj dobro v primeru Celja, tudi v primeru Trbovelj in Maribora, že nekoliko manj v primeru Ljubljane. Za vse štiri naštetje kraje je CAMx sicer precenil

število preseganj dnevne mejne vrednosti, vendar dokaj dobro opredelil obdobja s povišanimi koncentracijami PM10. Po drugi strani pa je v primeru Murske Sobote in Nove Gorice CAMx izrazito podcenil izmerjene koncentracije PM10.

Razlago za zaznana odstopanja napovedanih od izmerjenih vrednosti lahko iščem predvsem v odstopanjih dejanskih izpustov od podatkov emisijske baze, ki jo uporablja CAMx. Model ALADIN/SI namreč večinoma dokaj dobro napove vremenske razmere za izbrane kraje kljub slabšim napovedim koncentracij PM10. Izjema je Nova Gorica, kjer bi bil vzrok za velika odstopanja napovedi od meritev lahko tudi precenjena napoved hitrosti vetra s strani modela ALADIN/SI in posledično precenjena prevetrenost merilnega mesta. Potrebno se je zavedati, da meritve tako koncentracij PM10 kot meteoroloških spremenljivk podajajo stanje na dejanskem merilnem mestu, modelska napoved pa prestavlja oceno povprečnih razmer na območju velikosti približno 4 km × 4 km. Različna prostorska reprezentativnost je lahko dodaten vzrok za razlike med modelskimi napovedmi in izmerjenimi vrednostmi. Glede na dobro ujemanje meritev z dvema različnima merilnikoma, Leckel in TEOM, pa odstopanj napovedi od meritev zagotovo ne morem pripisati napaki zaradi merilne metode za določanje koncentracij delcev na izbranem merilnem mestu. Tako sem deloma potrdila tudi tretjo hipotezo.

Rezultati analize kažejo, da bi z nadaljnjimi izboljšavami, predvsem emisijske baze, model CAMx v prihodnje lahko predstavljal uporabno in zanesljivo operativno orodje za napovedovanje koncentracije delcev PM10 na območju Slovenije. Zaenkrat pa se je pri uporabi napovedi modela CAMx potrebno zavedati, da so napovedi uporabnejše pri napovedovanju koncentracije delcev PM10 v kotlinah (npr. Celje, Trbovlje, Maribor, Ljubljana), v primeru bolj odprtih krajev (npr. Murska Sobota, Nova Gorica) pa se na napovedi modela CAMx še ne moremo zanesti.

5 VIRI

arb.ca.gov - Air Resources Board. California Environmental protection agency. Ambient Air Quality Standards (AAQS) for Particulate Matter, 2009. Pregledano na spletu dne 8.7.2014: arb.ca.gov

ARSO/Bilteni Naše okolje, 2012/2013. Markošek J. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje. ARSO. Ljubljana

ARSO/KOS, 2013. Kazalci okolja v Sloveniji. Ministrstvo za okolje in prostor. ARSO. Ljubljana. Pregledano na spletu dne 8.5.2014: kazalci.arso.gov.si

ARSO/Meteo, 2014. Državna meteorološka služba. Ljubljana. Pregledano na spletu dne 21.6.2014: meteo.arso.gov.si

ARSO, 2014. Napovedi modela CAMx, meritve merilnikov TEOM in Leckel ter podatki o emisijah in meteoroloških parametrih za Slovenijo. Ljubljana

Atlas okolja, 2014. ARSO. Pregledano na spletu dne 14.8.2014: http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso

Bergant K., 2014. Teorija iz predavanj pri predmetu meteorologija in ustni vir.

Bolte T., Koleša T., Komar Z., Murovec M., Gjerek M., Kranjc I., Groselj D., Cegnar T., Planinšek A., Rode B., Logar M., Rus M., Močnik G., 2013. Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2012. ISSN 1855-0827. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje. ARSO. Ljubljana.

Bolte T., 2009. Meritve PM10 in primerjava z referenčnim merilnikom. Oznaka: PRO-KAZ-015. Verzija: 3.0. Ministrstvo za okolje in prostor. ARSO. Urad za hidrologijo in stanje okolja. Ljubljana

Cedilnik J. in Štrajhar M., 2012. Razvoj modela ALADIN v zadnjih letih skozi prizmo napovedovanja nekaterih vremenskih dogodkov. Vetrnica 0412. ISSN 1855-7457. Slovensko meteorološko društvo. Ljubljana: 25

Dennis R., Fox T., Fuentes M., Gilliland A., Hanna S., Hogrede C., Irwin J., Rao T.S., Scheffe R., Schere K., Steyn D., Venkatram A., 2010. A Framework for Evaluating Regional-Scale Numerical Photochemical Modeling Systems. Environmental Fluid Mechanics (Dordr), vol. 10(4): 417–489. Doi: 10.1007/s10652-009-9163-2.

Direktiva EU, 2008. Air quality directive. Directive 2008/50/EC

ENVIRON, 2013. CAMx User's Guide. Comprehensive Air quality Model with Extensions Version 6.00. ENVIRON International Corporation. Novato. California

Hinds W.C., 1999. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurements of Airborne Particles, Second Edition. New York, John Wiley & Sons, Inc.

IPCC, 2013. Boucher, O. and coo. (2013). Clouds and Aerosols (chapter 7). In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 574

Katsouyanni K., Schwartz J., Spix C., Touloumi G., Zmirou D., Zanobetti A., Wojtyniak B., Vonk J.M., Tobias A., Pönkä A., Medina S., Bachárová L., Anderson H.R., 1996. Short Term Effect of Air Pollution on Health: A European Approach Using Epidemiologic Time Series Data: The APHEA Protocol. *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol. 50 (supplement 1): 12–18.

Koleša T., 2010. Primerjava koncentracij delcev PM10 vzorčenih z visoko volumskim merilnikom Digital in z referenčnim merilnikom Leckel. Oznaka: PRO-KAZ-018. Verzija: 1.0. Ministrstvo za okolje in prostor. ARSO. Urad za hidrologijo in stanje okolja. Ljubljana

Kranjc I., 2014. Osebna komunikacija.

Leckel S., 2008 in Enviro Technology Services plc., 2014: Sequential sampler SEQ47/50. Pregledano na spletu dne 8.5.2014: www.leckel.de

Meteolab, 2014. Avtomatska meteorološka postaja Ilirska Bistrica-Trnovo. Podatki o meteorološki postaji. Pregledano na spletu dne 25.3.2014: http://www.meteolab.si/amp/o_postaji.php

MeteoModem. Sonde M2K2-DC. Francija. Pregledano na spletu dne 24.6.2014: <http://www.meteomodem.com/rproduit.php?nom=M2K2-DC>

NIJZ. Vpliv prašnih delcev na zdravje (12.01.2010). Nacionalni inštitut za javno zdravje RS. Ljubljana

Nopmongcol U., Koo B., Tai E., Jung J., Piyachaturawat P., Emery C., Yarwood G., Pirovano G., Mitsakou C., Kallos G., 2011. Modeling Europe with CAMx for the Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII). *Atmospheric Environment* (2012), vol. 53: 177–185.

Pohar M., 2014. Kakovost zraka in zdravje ljudi (dokument pdf.). Nacionalni inštitut za javno zdravje. Ljubljana

Poročilo EEA, 2013. EEA SIGNALI 2013. Kakšen zrak dihamo: kakovost zraka v Evropi. Luxembourg: Urad za publikacije Evropske unije

Pristov N., Cedilnik J., Jerman J., Strajnar B., 2012. Priprava numerične meteorološke napovedi ALADIN. Vetrnica 0412. ISSN 1855-7457. Slovensko meteorološko društvo. Ljubljana: 17–22

Radiosonde Museum of North America. What is a Radiosonde? Pregledano na spletu dne 19.5.2014: <http://radiosondemuseum.org/what-is-a-radiosonde/>

Rao T.S., Galmarini S., Puckett K. 2011. Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII): Advancing the State of the Science in Regional Photochemical Modeling and Its Applications. *Bulletin of American Meteorological Society*, vol. 92: 23–30.

Reynolds R., 2004. Vremenski vodnik. Tehniška založba Slovenije, d.d., Ljubljana

Rus M., Žabkar R., Rakovec J., 2011. Modeliranje ozona in delcev za območje Slovenije z modelskim sistemom ALADIN-CAMx. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. ISBN: 9789616884006. Ljubljana: 45–55

Uradni list RS, št. 24/2014: Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Mestne občine Ljubljana

Uradni list RS, št. 88/2013: Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Mestne občine Murska Sobota

Uradni list RS, št. 108/2013: Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Zasavja. Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Mestne občine Celje. Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Mestne občine Maribor. Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Mestne občine Novo Mesto

Uradni list RS, št. 9/2011: Uredba o kakovosti zunanjega zraka

Vautard R., Moran M.D., Solazzo E., Gilliam R.C. Matthias V., Bianconi R., Chemel C., Ferreira J., Geyer B., Hansen A.B., Jericevic A., Prank M., Segers A., Silver J.D., Werhahn J., Wolke R., Rao T.S., Galmarini S., 2012. Evaluation of the Meteorological Forcing Used For the Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII) Air Quality Simulations. Atmospheric Environment (2011) Elsevier, vol. 53: 15 – 37

Vudrag M., 2014. Osebna komunikacija.

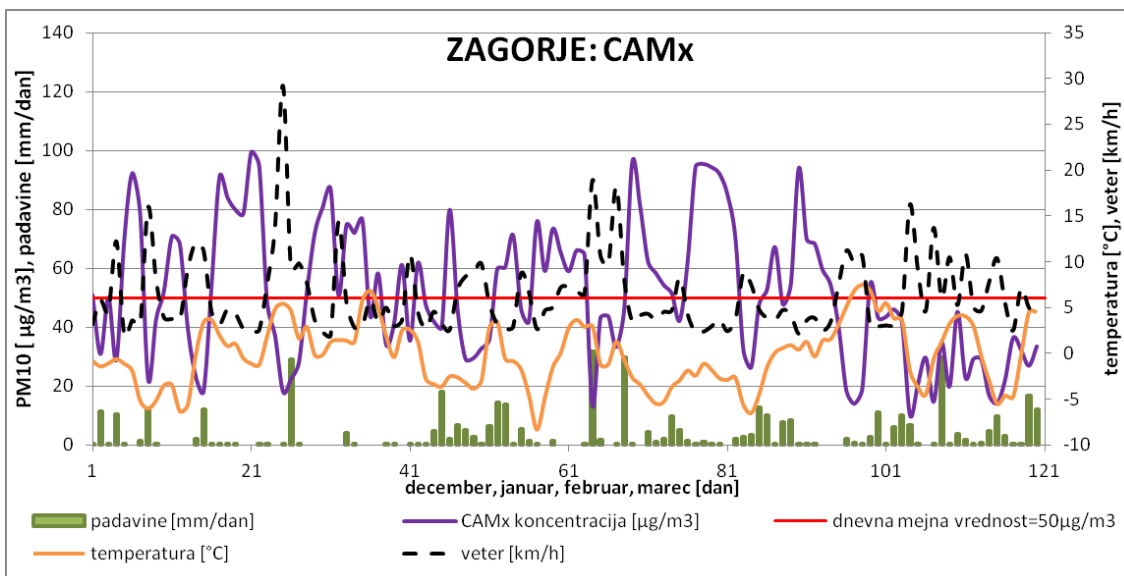
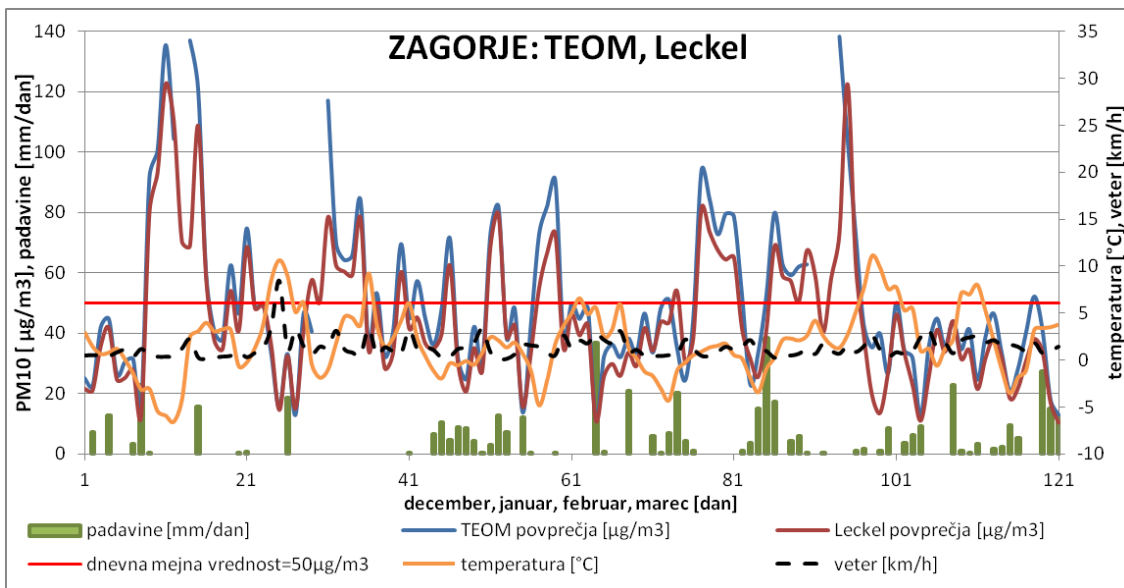
WHO. Environmental Health Criteria Documents. 1994 (170), 1995 (165), 1996 (171; 180).

WHO. Media Centre, Ambient (outdoor) air quality and health. 2014. Pregledano na spletu dne 14.6.2014: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>

PRILOGE (ANNEXES)

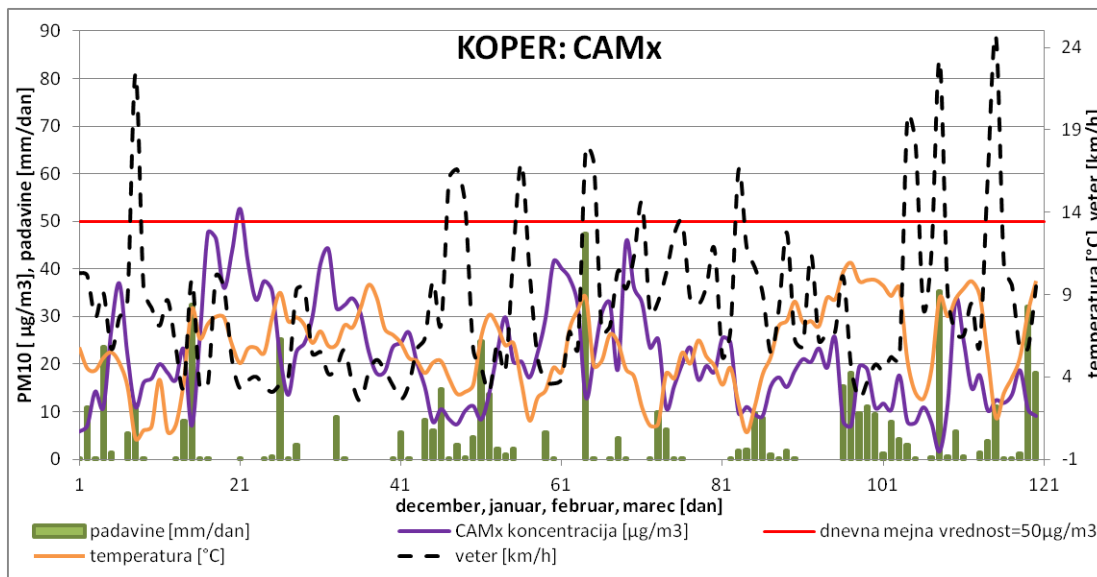
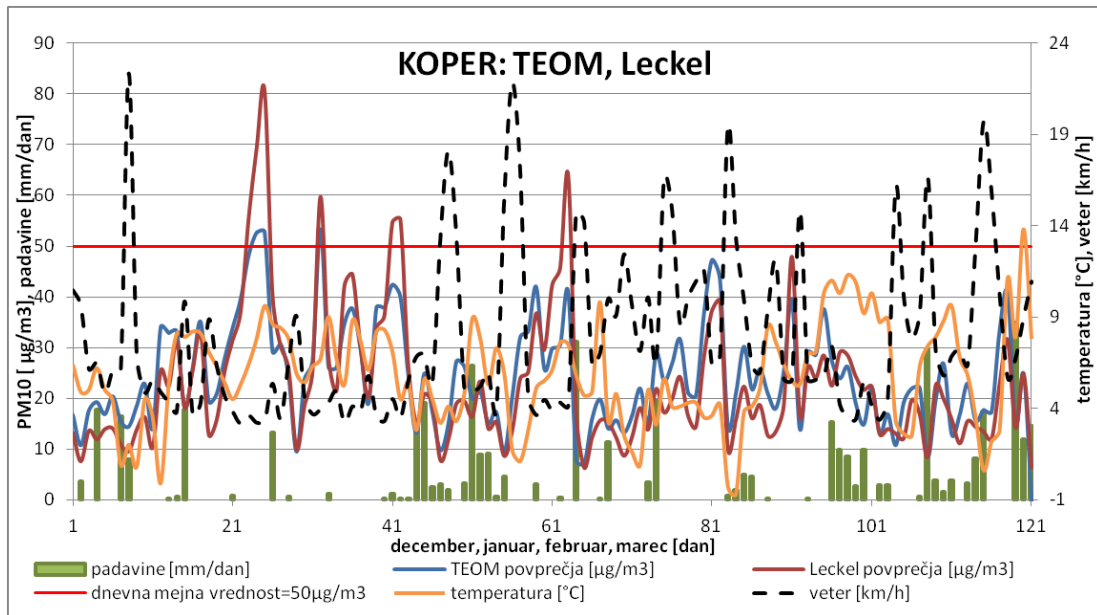
Priloga A

Merilno mesto Zagorje: TEOM, Leckel in CAMx



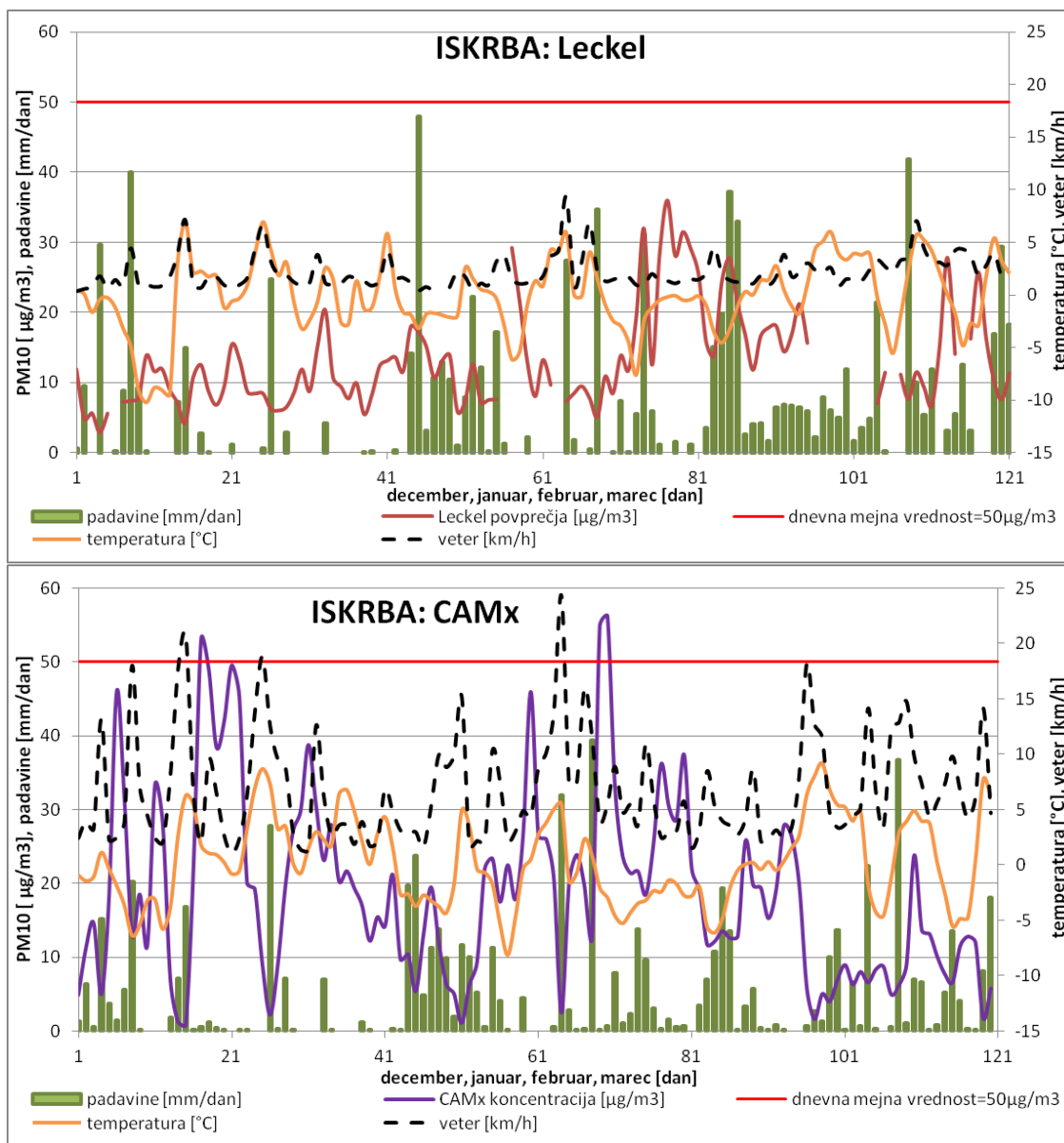
Priloga B

Merilno mesto Koper: TEOM, Leckel in CAMx



Priloga C

Merilno mesto Iskrba: Leckel in CAMx



Priloga D

Merilno mesto Novo Mesto: Leckel in CAMx

