

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Tomislav Andrić

Odziv koncentracija atmosferskih lebdećih čestica i
ozona na meteorološke uvjete

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Zvezdane Bencetić Klaić i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

Popis i objašnjenja kratica:

PM – lebdeće čestice (eng. *particular matter*)

PM₁ – lebdeće čestice aerodinamičkog promjera manjeg ili jednakog 1 mikrometar

PM_{2.5} – lebdeće čestice aerodinamičkog promjera manjeg ili jednakog 2.5 mikrometra

PM₁₀ – lebdeće čestice aerodinamičkog promjera manjeg ili jednakog 10 mikrometara

O₃ – ozon

r – koeficijent korelacije (eng. *correlation coefficient*)

RT – vrijeme odziva (eng. *response time*)

Sadržaj rada:

1. Uvod.....	1
2. Ciljevi rada.....	2
3. Mjerenje.....	2
4. Metode.....	4
5. Rezultati.....	5
6. Rasprava.....	15
7. Zaključci.....	17
8. Zahvale.....	18
9. Popis literature.....	19
10. Sažetak.....	21
11. Summary.....	22

1. Uvod

Kvaliteta zraka ovisi o koncentracijama onečišćujućih tvari (polutanata) koje su prisutni u atmosferi. Polutanti se u atmosferi mogu naći u plinovitoj fazi ili kao tekuće i/ili krute raspršene čestice (*eng. particulate matter, PM*). Viši stupanj onečišćenja nazivamo zagađenjem. Zagađenje zraka je definirano kao stanje u kojem plinovitih, tekućih ili krutih onečišćujućih tvari u atmosferi ima toliko da uzrokuju direktnu ili indirektnu štetu biljkama, životinjama, drugim formama života, ekosustavima, nacionalnom nasljeđu (zgradama, spomenicima i sličnom), ljudskom zdravlju (dišni problemi, alergije, tumori) te regionalnoj klimi. Procjena Svjetske zdravstvene organizacije je da 2.4 milijuna ljudi umre godišnje zbog loše kvalitete zraka. U Europskoj Uniji 21 400 preranih smrti je vezano uz preveliku koncentraciju O₃. (Monks i sur., 2009.). Loša kvaliteta zraka se primjećivala još u doba prve industrijske revolucije, no tek unatrag 50-ak godina joj se pridaje veća pažnja. Gledajući na različitim vremensko-prostornim skalama kvaliteta zraka je i lokalni i globalni problem. Poznato je da atmosferski polutanti utječu na ljudsko zdravlje (npr., Pope III, 2000.; Pope III i Dockerey, 2006.), ljudske aktivnosti, i okoliš općenito te na vrijeme (nastanak oblaka, vidljivost, nastanak magle) i klimu (naoblaka i radijacijsko-apsorpcijska svojstva atmosfere).

Zbog njihovog nepovoljnog djelovanja na okoliš, posljednjih desetljeća dosta istraživanja bavilo se onečišćenjem atmosfere lebdećim česticama i ozonom (O₃) (npr., Klaić i sur., 2003.; Weber i sur., 2006.; Querol i sur., 2009.; Hrust i sur., 2009.; Borrego-Hernandez i sur., 2014.; Sadanaga i sur., 2008.; Jelić i Klaić, 2010.; Mues i sur., 2011.). Tako je ustanovljeno da je smanjenje korištenja ugljena i drva za grijanje u razvijenijim društvima rezultiralo današnjim manjim onečišćenjem atmosfere lebdećim česticama nego u prošlosti (Jones, 1999.). Istovremeno, pojačan promet u urbanim sredinama doprinosi fotokemijskim procesima i u skladu s tim pojavi fotokemijskog smoga, čiji su važni sastojci ozon te dušikovi oksidi NO i NO₂ (npr. Monks i sur., 2015).

Dio istraživanja vezanih uz PM i O₃ bavio se utjecajem meteoroloških uvjeta na te polutante. Tako su, na primjer, Hussein i sur. (2005.) pokazali da su temperatura i lokalni vjetar najvažniji faktori koji kontroliraju koncentraciju atmosferskih lebdećih čestica. Prethodno istraživanje veze između kratkotrajnih masenih koncentracija

atmosferskih lebdećih čestica aerodinamičkog promjera do 1 μm (PM_{10}) i meteoroloških uvjeta pokazala su jasnu ovisnost minutnih koncentracija PM_{10} o istovremenoj relativnoj vlažnosti, brzini i smjeru vjetra i tlaku zraka (Klaić i sur., 2012.). Također, ustanovljena je i ovisnost kratkotrajnih masenih koncentracija PM_{10} u zatvorenom prostoru o vanjskim meteorološkim uvjetima (Klaić i sur., 2015). Ozon, koji igra važnu ulogu u atmosferskim fotokemijskim procesima kao inicijator, propagator i produkt fotokemijskih reakcija također ovisi o meteorološkim i klimatskim uvjetima (npr., Lelieveld i sur., 2009.; Prtenjak i sur., 2013.; Monks i sur., 2015.).

2. Ciljevi rada

Glavni cilj ovog rada jest odrediti vremena odziva 1-minutnih masenih koncentracija atmosferskih lebdećih čestica aerodinamičkih promjera od 1, 2.5 i 10 μm (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10}) i 1-minutne volumne koncentracije ozona na meteorološko forsiranje temperaturom zraka, relativnom vlažnošću, oborinom, globalnim zračenjem, tlakom zraka i horizontalnim vjetrom, što prema mojim saznanjima do sada nije bilo učinjeno. Nadalje, kako su u ranijem istraživanju (Klaić i sur., 2015) određivana vremena odziva masenih koncentracija PM_{10} u zatvorenom prostoru na vanjske meteorološke uvjete, drugi cilj je usporediti vremena odziva vanjskih koncentracija PM_{10} s vremenima odziva dobivenih za koncentracije PM_{10} izmjerene u zatvorenom prostoru.

3. Mjerenje

Minutni srednjaci masenih koncentracija PM_{10} i O_3 su mjereni na travnjaku Instituta Ruđer Bošković (u daljnjem tekstu IRB, slika 1.) u razdoblju od 4.7.2013. do 17.9.2013. godine. Mjerno mjesto nalazi se u sjevernom, rezidencijalnom dijelu Zagreba, otprilike 2.5 km sjeverno sjeverno-istočno od središta grada i 8-9 km sjeverozapadno od zagrebačke industrijske zone. Instrumenti su postavljeni dvjestotinjak metara istočno od Bijeničke ceste na kojoj je promet srednje gustoće.

Oba instrumenta smještena su tako da je okolni zrak u njih ulazio na visini 3.4 m nad tlom. Laserski fotometar (slika 2., DustTrak™ Aerosol Monitor Model 8533, TSI,

SAD), koji je bilježio jednogminutne masene koncentracije lebdećih čestica, u vlasništvu je Geofizičkog odsjeka PMF-a. Monitor IRB-a (Environnement S.A., tip O3 41M, broj 1476, Francuska), koji je bilježio jednogminutne volumne koncentracije ozona, nalazio se u kontejneru, dok mu je usisna cijev bila smještena vani, na krovu kontejnera (slika 1.). Tijekom eksperimenta tehničari Geofizičkog odsjeka PMF-a i IRB-a redovito su održavali oba instrumenta prema preporukama proizvođača, čisteći ulaze i mijenjajući filtre.



Slika 1. Lokacija mjerenja lebdećih čestica i ozona na travnjaku Instituta Ruđer Bošković (IRB). Ulaz zraka u instrument za mjerenje volumnih koncentracija ozona (Environnement S.A., tip O3 41M, broj 1476, Francuska) naznačen je crvenom elipsom, a položaj instrumenta za mjerenje masenih koncentracija lebdećih čestica (laserski fotometar DUSTTRAK™ AEROSOL MONITOR MODEL 8533, TSI, SAD) plavim pravokutnikom.



Slika 2. DustTrak Aerosol Monitor Model 8533 (TSI, SAD) korišten u ovoj studiji za mjerenje masenih koncentracija lebdećih čestica PM_1 , $PM_{2.5}$ i PM_{10} .

Jednominutni meteorološki srednjaci (temperatura zraka, tlak zraka, relativna vlažnost, globalno zračenje i horizontalni vjetar) te ukupna oborina akumulirana tijekom svake minute mjereni su na automatskoj meteorološkoj stanici Geofizičkog odsjeka (META 2000, AMES, Brezovica, Slovenija) na Horvatovcu. Postaja se nalazi u blizini zgrade Geofizičkog odsjeka, oko 200 m južno od mjernog mjesta na IRB-u.

U slučaju kvara i popravka instrumenata podaci nisu skupljani. Mjerenja su također povremeno zaustavljena zbog skidanja podataka sa instrumenata na računalo. Tijekom trajanja eksperimenta (ukupno 108048 minuta) nedostajale su po 2 minute meteoroloških podataka, 1463 minute srednjih koncentracija PM_1 , $PM_{2.5}$ i PM_{10} te 229 minutnih srednjaka ozona.

4. Metode

Prije analize, nedostajući podaci su aproksimirani vrijednostima izračunatim linearnom interpolacijom iz podataka koji prethode i podataka koji slijede nakon nedostajućih podataka. Tako je linearnom interpolacijom ukupno dobiveno 0.002%

meteoroloških podataka, 1.354% podataka o koncentracijama PM₁, PM_{2.5} i PM₁₀ te 0.212% podataka za O₃.

Poprečna korelacija je standardna metoda utvrđivanja stupnja povezanosti dvaju vremenskih nizova podataka, gdje je jedan od njih u posmaknut u vremenu u odnosu na drugi. Uzimajući u obzir dva niza podataka $x(i)$ i $y(i)$ gdje je $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, koeficijent poprečne korelacije (eng. *cross-correlation coefficient*) je definiran ovako:

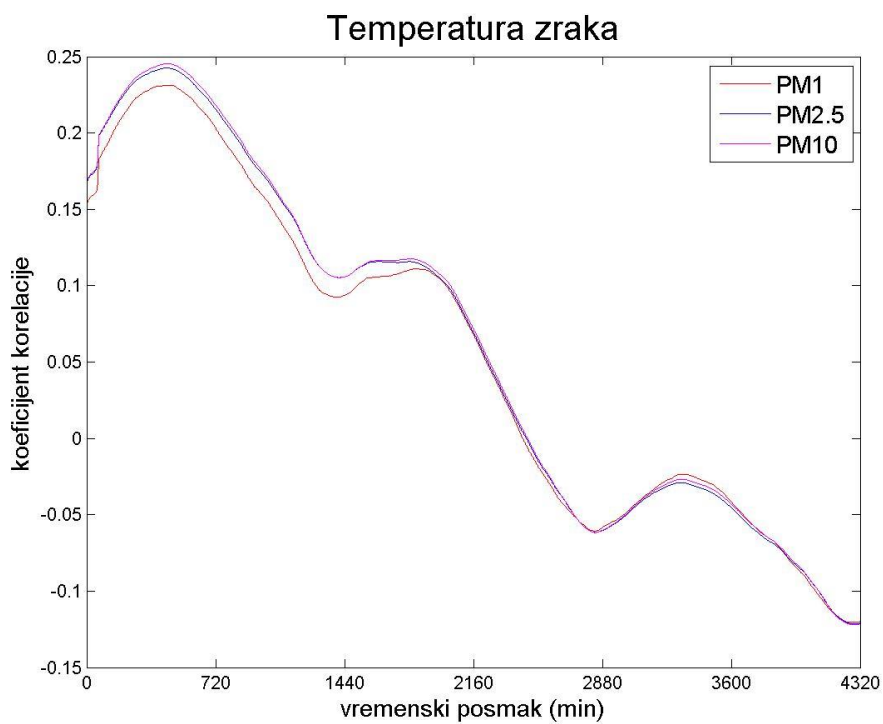
$$r(d) = \frac{\sum_i [(x(i) - mx)(y(i + d) - my)]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - mx)^2} \sqrt{\sum_i (y(i + d) - my)^2}}$$

gdje su mx i my srednjaci pripadnih nizova, a $d = 0, 1, 2, \dots, N-1$ su vremenski posmaci u odnosu na i -ti mjereni podatak.

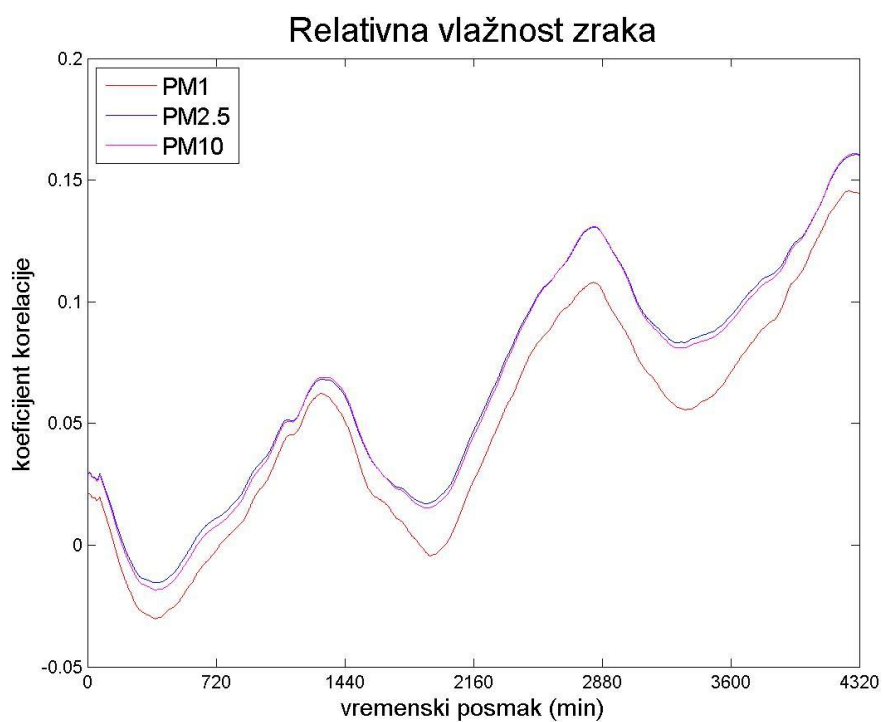
Da bih istražio postoji li vremenski posmaknuti odziv masenih koncentracije PM i volumnih koncentracija O₃ s obzirom na meteorološke uvjete računao sam poprečnu korelaciju između meteoroloških nizova podataka i vremenski posmaknutih PM i O₃ nizova podataka za posmake od 0 do 108047 minuta.

5. Rezultati

Premda su koeficijenti korelacije izračunati za dulje posmake, grafovi (slike 3 – 7) prikazuju vrijednosti za posmake do tri dana.

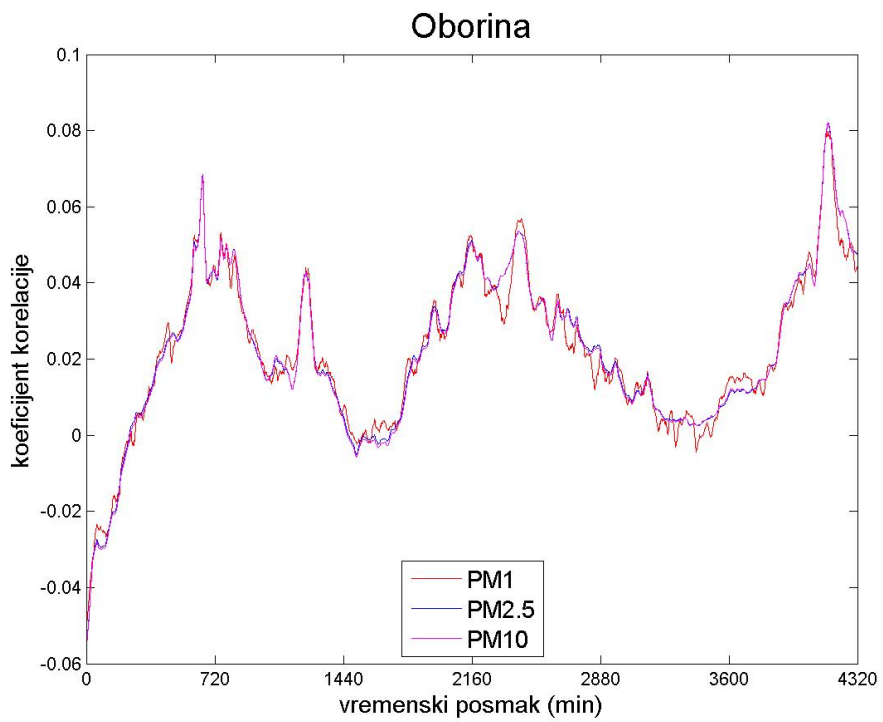


a)

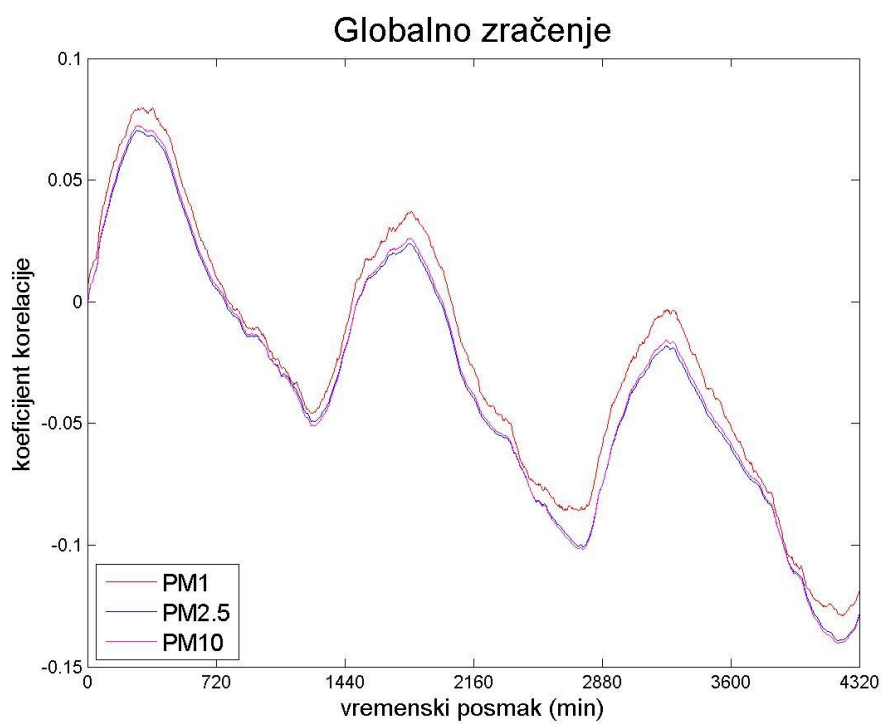


b)

Slika 3. Koeficijenti poprečne korelacije između a) temperature b) relativne vlažnosti c) oborine d) globalnog zračenja e) tlaka zraka f) horizontalnog vjetera i masenih koncentracija lebdećih čestica za vremenske posmake od 0 min. do 3 dana.

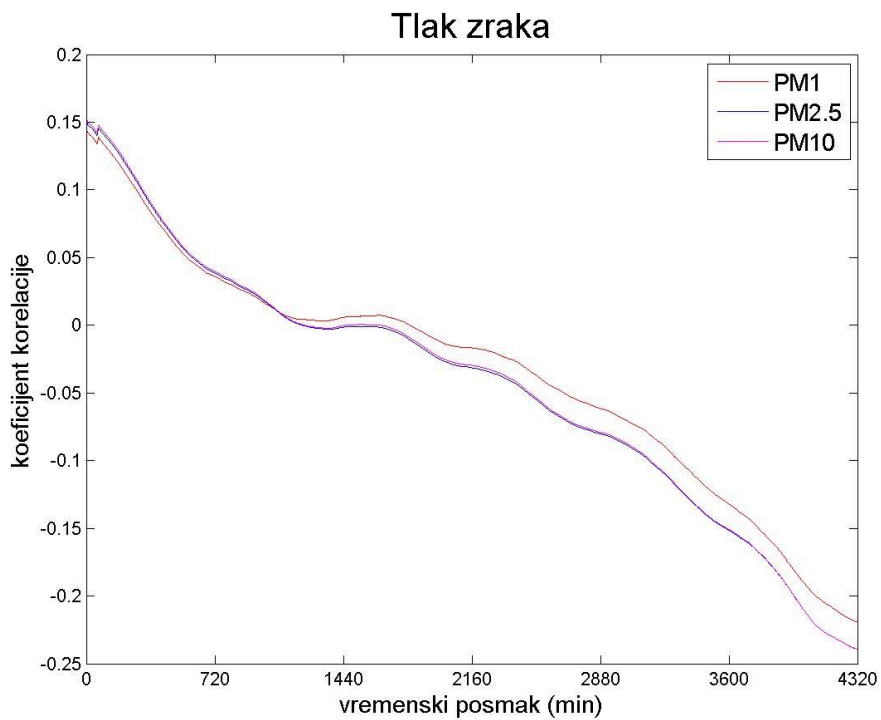


c)

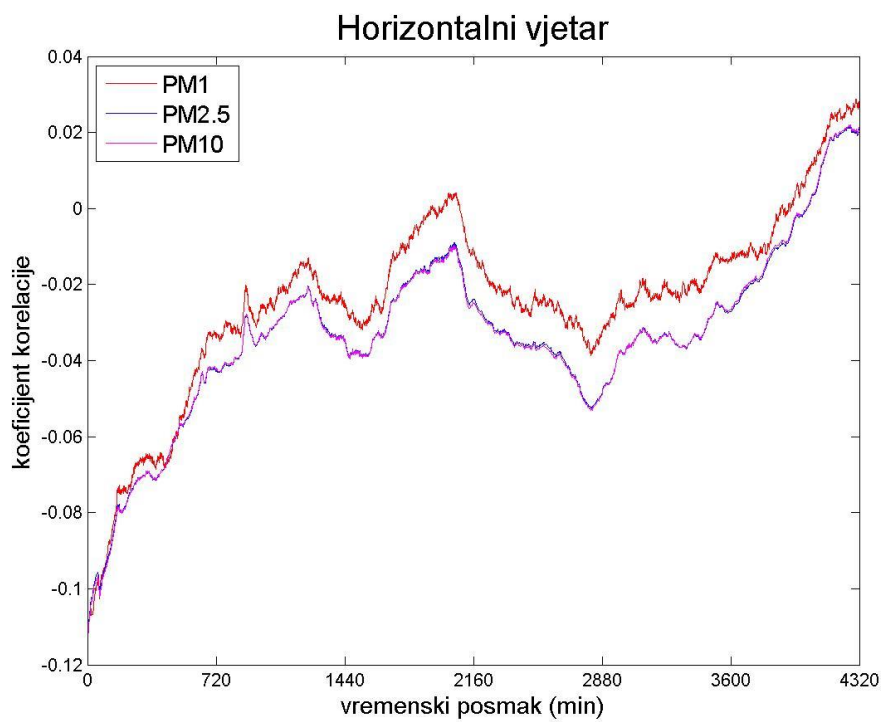


d)

Slika 3. Nastavak.



e)



f)

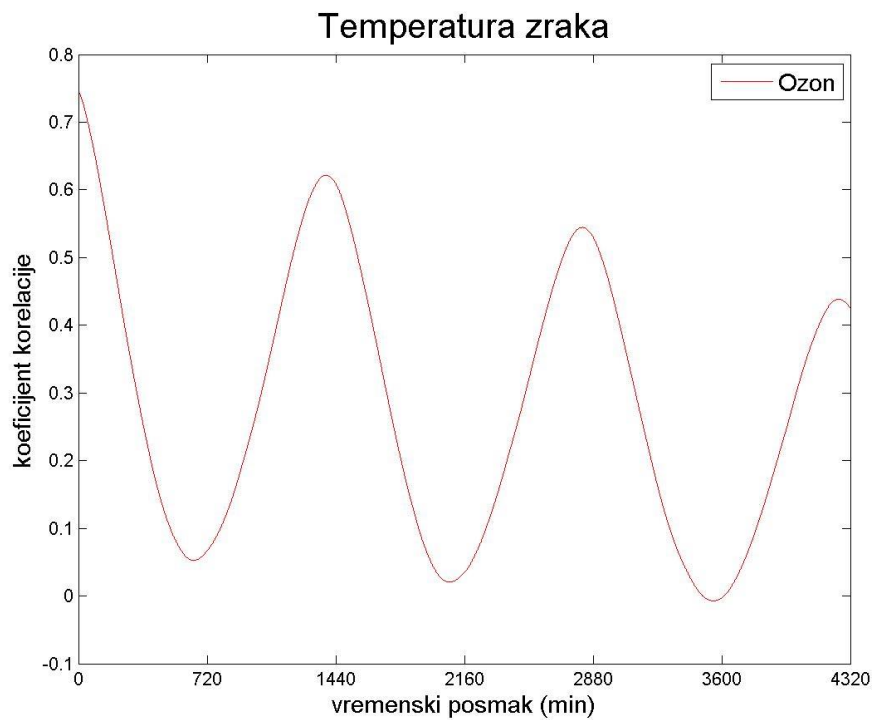
Slika 3. Nastavak.

U tablicama su uzimani oni maksimumi koji se prvi pojavljuju (ili maksimumi koji su najviše fizikalno opravdani). Koeficijenti korelacije dobiveni za velike posmake

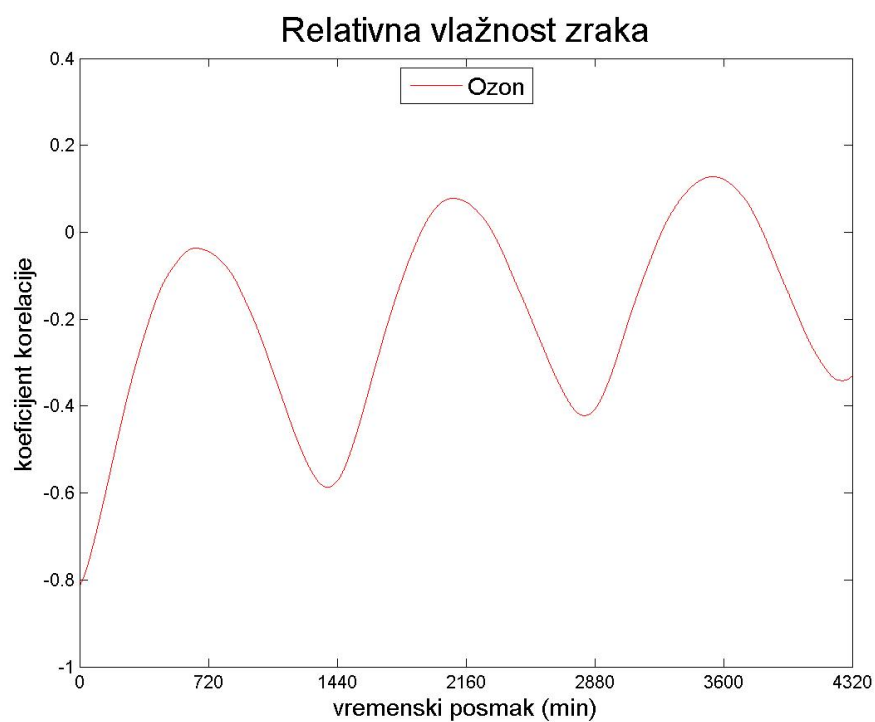
većinom su teško fizikalno objašnjivi (osim eventualno maksimuma koeficijenta korelacije za tlak sa vremenskim posmakom od otprilike 21 dan) pa su zato grafovi crtani do vremenskog posmaka od 3 dana (4320 minuta), sa oznakama na x-osi svakih pola dana (720 minuta).

Tablica 1. Ekstremi koeficijenta korelacije između meteoroloških parametara i posmaknutih masenih koncentracija lebdećih čestica te odgovarajuće vrijeme odziva.

Poprečno korelirani vremenski nizovi	r_{\max}	RT(min)
Temperatura zraka i PM ₁	0.2313	473
Temperatura zraka i PM _{2.5}	0.2426	443
Temperatura zraka i PM ₁₀	0.2454	443
Relativna vlažnost i PM ₁	0.0212	11
Relativna vlažnost i PM _{2.5}	0.0299	11
Relativna vlažnost i PM ₁₀	0.0298	11
Oborina i PM ₁	-0.0501	0
Oborina i PM _{2.5}	-0.0551	0
Oborina i PM ₁₀	-0.0558	0
Globalno zračenje i PM ₁	0.0798	312
Globalno zračenje i PM _{2.5}	0.0704	277
Globalno zračenje i PM ₁₀	0.0723	277
Tlak zraka i PM ₁	0.1441	0
Tlak zraka i PM _{2.5}	0.1500	0
Tlak zraka i PM ₁₀	0.1518	0
Horizontalni vjetar i PM ₁	-0.1123	0
Horizontalni vjetar i PM _{2.5}	-0.1124	0
Horizontalni vjetar i PM ₁₀	-0.1133	0

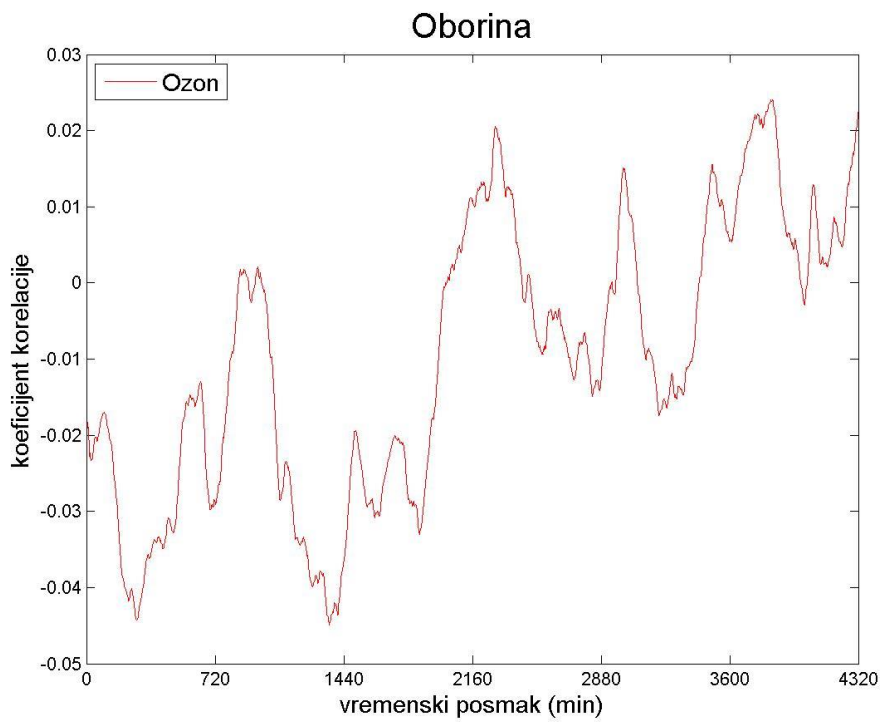


a)

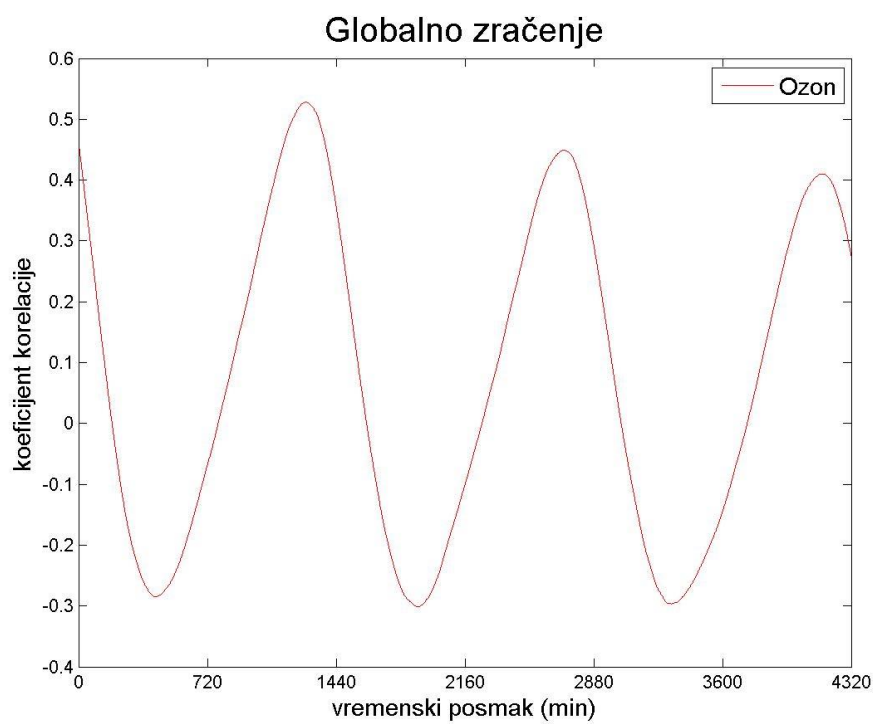


b)

Slika 4. Koeficijenti poprečne korelacije između a) temperature b) relativne vlažnosti c) oborine d) globalnog zračenja e) tlaka zraka f) horizontalnog vjetera i volumnih koncentracija ozona za vremenske posmake od 0 min. do 3 dana.

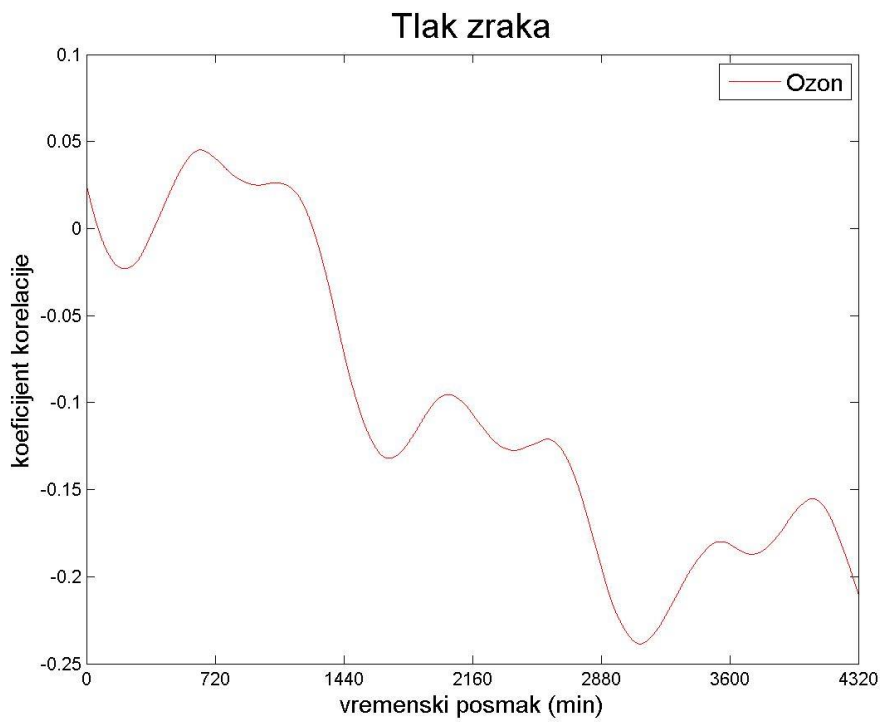


c)

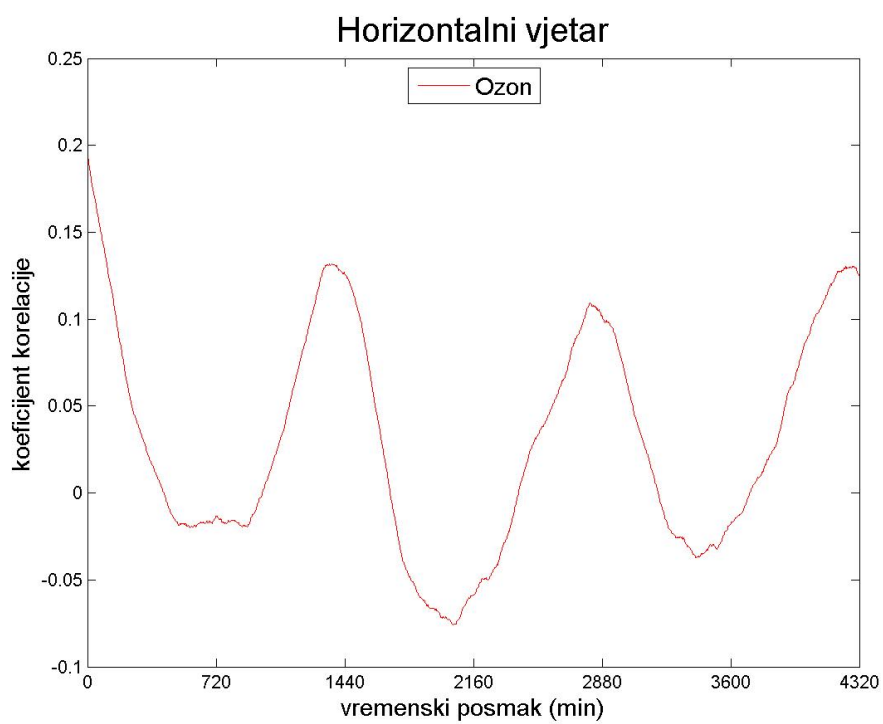


d)

Slika 4. Nastavak.



e)



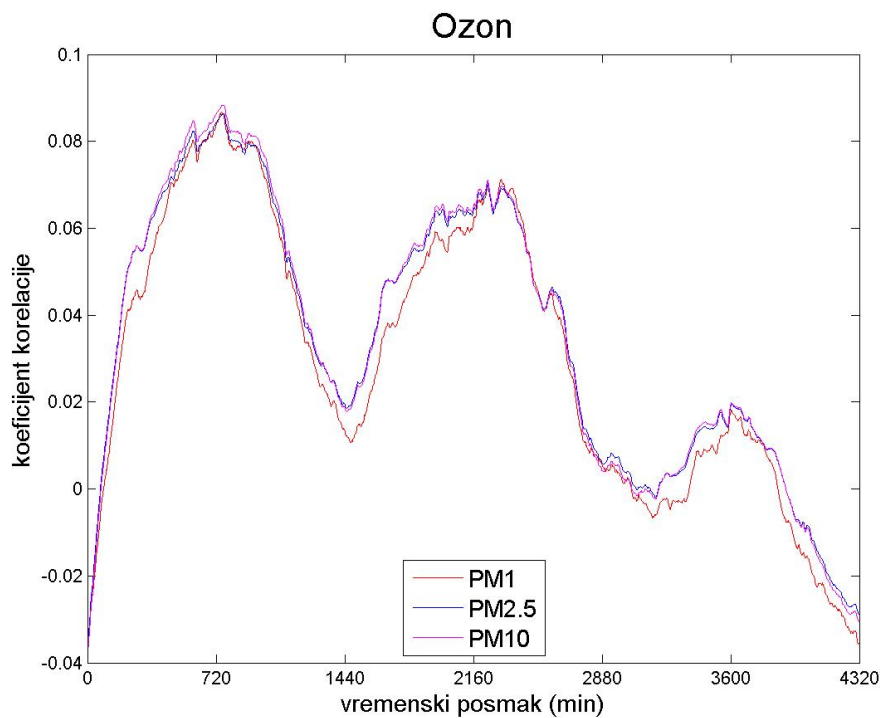
f)

Slika 4. Nastavak.

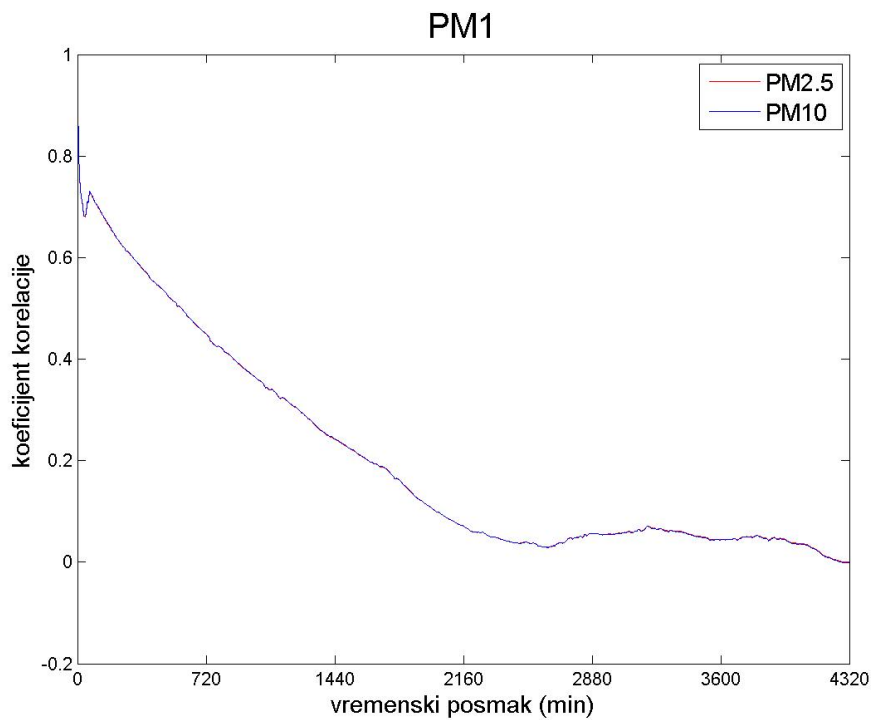
Tablica 2. Ekstremi koeficijenta korelacije između meteoroloških varijabli i vremenski posmaknutih volumnih koncentracija ozona te odgovarajuće vrijeme odziva.

Poprečno korelirani vremenski nizovi	r_{\max}	RT(min)
Temperatura i O ₃	0.7462	0
Relativna vlažnosti i O ₃	-0.8115	0
Oborina i O ₃	-0.0443	279
Globalno zračenje i O ₃	0.4599	0
Tlak zraka i O ₃	0.0452	637
Horizontalni vjetar i O ₃	-0.0173	od 506 do 899

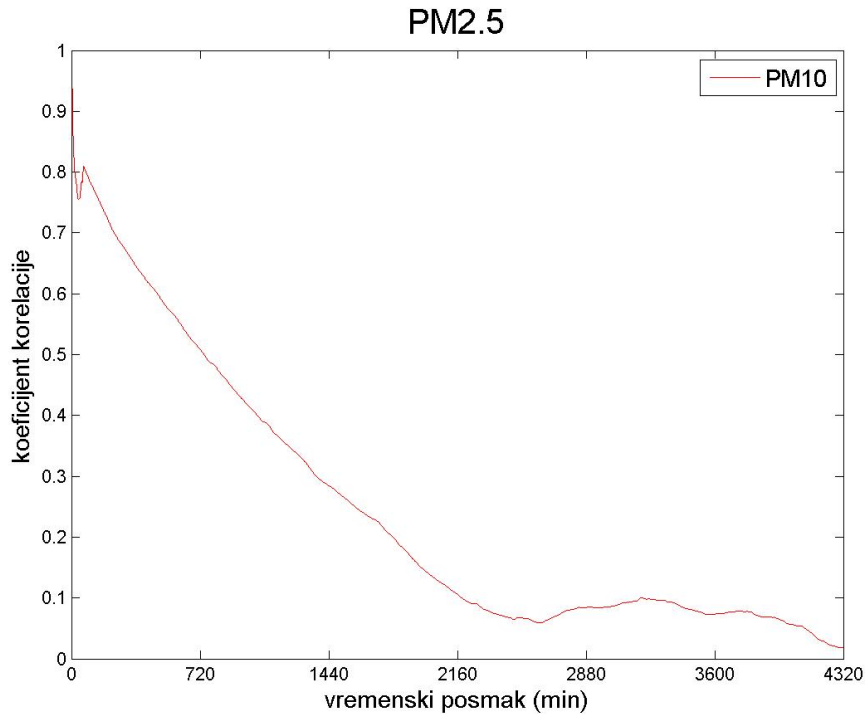
Vrijednosti koeficijenta korelacije vezanih za horizontalni vjetar u danom intervalu poprimaju bliske minimalne vrijednosti, stoga sam naveo rubove intervala i srednju vrijednost koeficijenta korelacije na tom intervalu.



Slika 5. Koeficijent poprečne korelacije između koncentracija ozona i lebdećih čestica, gdje su koncentracije lebdećih čestica posmaknute u vremenu (od 0 min. do 3 dana) u odnosu na ozon.



Slika 6. Koeficijent poprečne korelacije između PM_1 i $PM_{2.5}$ i PM_{10} gdje su $PM_{2.5}$ i PM_{10} posmaknute u vremenu (od 0 min. do 3 dana) u odnosu na PM_1 .



Slika 7. Koeficijent poprečne korelacije između $PM_{2.5}$ i PM_{10} , gdje je PM_{10} posmaknut u vremenu (od 0 min. do 3 dana) u odnosu na $PM_{2.5}$.

Tablica 3. Ekstremi koeficijentna korelacije između koncentracije ozona i koncentracije lebdećih čestica i između koncentracija pojedinih frakcija lebdećih čestica te odgovarajuća vremena odziva.

O ₃ i PM ₁	-0.0377	0
O ₃ i PM _{2.5}	-0.0358	0
O ₃ i PM ₁₀	-0.0375	0
PM ₁ i PM _{2.5}	0.9130	0
PM ₁ i PM ₁₀	0.9123	0
PM _{2.5} i PM ₁₀	0.9920	0

6. Rasprava

Iz slike 3. i tablice 1. vidi se da su koeficijenti korelacije između vremenski posmaknutih koncentracija PM i temperature zraka, relativne vlažnosti zraka i globalnog zračenja veći nego koeficijenti korelacije između istovremenih (vremenski posmak od 0 minuta) koncentracija i meteoroloških uvjeta. Brzi odziv koncentracija PM (posmak od 0 minuta) dobiven je za oborinu, tlak i horizontalni vjetar. Odziv je najjači za temperaturu i tlak zraka, dok je najslabiji za relativnu vlažnost. Vrijeme odziva PM na relativnu vlažnost je 11 minuta. Vrijeme odziva PM₁ na temperaturu zraka je 7.9 sati dok je za PM_{2.5} i PM₁₀ 7.4 sati. Vrijeme odziva PM₁ na globalno zračenje je 5.2 sati, dok je za PM_{2.5} i PM₁₀ 4.6 sati. Koeficijenti korelacije vezani za horizontalni vjetar i oborinu idu iz negativnih dobivenih za kraće vremenske posmake ka pozitivnim dobivenim za dulje vremenske posmake. Koeficijent korelacije između koncentracije PM i oborine je očekivano negativan za kraće vremenske posmake, jer oborina ispire PM iz atmosfere i tako smanjuje koncentraciju. Nakon otprilike 3 dana koeficijent korelacije vezan za oborinu dostiže pozitivni maksimum. Nagađam da je za ovu pozitivnu korelaciju zaslužno intenzivnije isparavanje nakon oborine - zbog oborine ima više vode u tlu dostupne za isparavanje, te u skladu s tim raste relativna vlažnosti zraka koja je pozitivno korelirana sa PM. Horizontalni vjetar je negativno koreliran sa lebdećim česticama za manje vremenske posmake, jer vjetar raspuhuje, odnosi lebdeće čestice te tako smanjuje njihovu koncentraciju na mjernom mjestu. Nakon otprilike 3 dana vidi se pozitivni maksimum. Moguće je da slabljenjem vjetrova lebdećih čestica ima opet u većoj količini. Također, druga mogućnost visokog koeficijenta korelacije za vremenski posmak od otprilike 3 dana jest da su visoke

razine koncentracija uzrokovane donošenjem onečišćenja iz velikih udaljenosti (tzv. daljinskim transportom polutanata). Ono što sam uvidio u vezi tlaka, no nije prikazano na slici 3. e) je to da koeficijent korelacije između koncentracija PM i tlaka postiže pozitivni maksimum za vremenski posmak od oko 3 tjedna te se tu krije moguća veza sa Rossbyjevim valovima što je u skladu s hipotezom Klaić i sur. (2015). Posljednje tri hipoteze zaslužuju daljnje istraživanje. Također se na slici 3. a), b) i d) primjećuje dnevna (period od 24 sata) periodičnost koeficijenata korelacije za temperaturu zraka, relativnu vlažnost zraka i globalno zračenje (što se još bolje vidi na slikama gdje je prikazan vremenski posmak do 20 dana koje nisu prikazane u ovom radu). Ova periodičnost je i očekivana budući da te tri meteorološke varijable imaju izraženi dnevni hod.

Što se tiče ozona (slika 4. i tablica 2.) vidi se da odzivi koncentracije ozona na forsiranje oborinom, tlakom i horizontalnim vjetrom kasne u vremenu za oborinom, tlakom i horizontalnim vjetrom. Za ostale meteorološke varijable (temperatura, relativna vlažnost i globalno zračenje) korelacija između koncentracija O_3 i meteoroloških varijabli je najjača za istovremene (vremenski posmak od 0 minuta) vrijednosti. Odziv je dosta jak za temperaturu, relativnu vlažnost i globalno zračenje, dok je poprilično slab za oborinu, tlak i horizontalni vjetar. Vrijeme odziva koncentracije O_3 na oborinu je 4.7 sati, na tlak 10.6 sati te na horizontalni vjetar između 8.5 i 15 sati. Koeficijenti korelacije vezani za temperaturu i globalno zračenje smanjuju se s vremenskim posmakom. Pri izraženijem Sunčevu zračenju stvaranje O_3 u fotokemijskim procesima koji uključuju dušikove okside je pojačano, te se onda tijekom noći, a i sljedećih dana taj ozon raspada čime je objašnjena takva tendencija. Nasuprot tome, koeficijent korelacije između O_3 i relativne vlažnosti je negativan te raste idući ka većim vremenskim posmacima (točnije ravnotežni položaj osciliranja raste), jer povećana relativna vlažnost usporava procese stvaranja ozona. Ono što se i u ovom slučaju uviđa u vezi tlaka, no nije prikazano na slici 4. e) je to da koeficijent korelacije između koncentracije O_3 i tlaka postiže pozitivni maksimum za vremenski posmak od oko 3 tjedna te se tu opet krije moguća veza sa Rossbyjevim valovima. Također se na slici 4. a), b), d), e) i f) primjećuje dnevna periodičnost koeficijenata korelacije za temperaturu zraka, relativnu vlažnost zraka, globalno zračenje, tlak zraka i horizontalni vjetar (što se još bolje vidi na slikama gdje je prikazan vremenski posmak do 20 dana koje nisu prikazane u ovom radu). Periodičnost vezana za

globalno zračenje i temperaturu je uvjetovana dnevnim hodom tih meteoroloških veličina.

Iz slike 5. i tablice 3. se vidi da su ozon i lebdeće čestice negativno korelirani (povećanjem koncentracije ozona smanjuje se koncentracija lebdećih čestica i obratno) što je i očekivano, jer se PM u tom slučaju ponaša kao dušični oksidi (povećanjem koncentracije ozona smanjuje se koncentracija dušičnih oksida i obratno (fotodisocijacijski procesi)). Ti su procesi jako brzi pa imamo vremenski posmak od 0 minuta.

Iz slika 6. i 7. te tablice 3. se vidi da su lebdeće čestice najviše korelirane za vremenski posmak od 0 minuta (nema izražene vremenski posmaknute veze između PM_1 i $PM_{2.5}$, PM_1 i PM_{10} te $PM_{2.5}$ i PM_{10}). Koeficijente korelacije sam računao za PM_1 u odnosu na posmaknute koncentracije $PM_{2.5}$ i PM_{10} , jer je poznato da lebdeće čestice većih aerodinamičkih promjera nastaju od lebdećih čestica manjih aerodinamičkih promjera. Iz istog razloga sam radio i koeficijent korelacije između koncentracije $PM_{2.5}$ i vremenski posmaknute koncentracije PM_{10} .

7. Zaključci

Istraživanje utjecaja vanjskih, ljetnih, minutnih srednjaka atmosferskih veličina na vanjske koncentracije PM u rezidencijalnom dijelu Zagreba pokazalo je smanjenje koncentracija PM s povećanjem količine oborine i porastom brzine horizontalnog vjetrova, dok se PM koncentracija povećavala s temperaturom, globalnim zračenjem, relativnom vlažnošću i tlakom.

Usporedbom dobivenih rezultata sa rezultatima dobivenih za odziv unutarnjih PM_1 koncentracija na meteorološke varijable (Klaić i sur., 2015.) vidi se očekivano kraće vrijeme odziva vanjskih PM koncentracija na meteorološke varijable u odnosu na odziv PM_1 koncentracija u zatvorenom prostoru.

Istraživanje je otkrilo odgođeni odgovor vanjskih PM koncentracija na sljedeće vanjske meteorološke uvjete: temperatura, relativna vlažnost i globalno zračenje; te simultani odgovor vanjskih PM koncentracija na sljedeće vanjske meteorološke uvjete: oborina, tlak i horizontalni vjetar. Ovaj odgovor je najveći za tlak i

temperaturu, a najslabiji za relativnu vlažnost. Vrijeme odziva PM na meteorološko forsiranje varira od 0 minuta (za oborinu, tlak i horizontalni vjetar) do skoro 8 sati (za temperaturu). Periodični koeficijenti korelacije (za temperaturu, relativnu vlažnost i globalno zračenje) imaju period od 24 sata. To je primjećeno i u ranijim istraživanjima (Tschepele i Borrego, 2010.). Moguća veza između koncentracija PM i planetarnih (Rossbyjevih) valova (uviđeno kod tlaka) sa periodom od 21 dan je primjećena i u ranijim istraživanjima (Klaić i sur., 2015.). Daljnje istraživanje uloge Rossbyjevih valova u onečišćenju atmosfere lebdećim česticama je poželjno.

Istraživanje utjecaja vanjskih ljetnih minutnih srednjaka atmosferskih uvjeta na koncentraciju O₃ u rezidencijalnom dijelu Zagreba pokazalo je smanjenje koncentracije O₃ sa povećanjem relativne vlažnosti, količine oborine, te pojačanjem horizontalnog vjetra, dok se koncentracija O₃ povećavala s temperaturom, globalnim zračenjem i tlakom.

Istraživanje je otkrilo odgođeni odgovor vanjskih koncentracija O₃ na sljedeće vanjske meteorološke uvjete: oborina, tlak i horizontalni vjetar; te simultani odgovor vanjskih koncentracija O₃ na sljedeće vanjske meteorološke uvjete: temperatura, relativna vlažnost i globalno zračenje. Ovaj odgovor je najjači za temperaturu i relativnu vlažnost, a najslabiji za horizontalni vjetar. Vrijeme odziva varira od 0 minuta (za temperaturu, relativnu vlažnost i globalno zračenje) do 15 sati (za horizontalni vjetar). Periodični koeficijenti korelacije (za temperaturu, relativnu vlažnost, globalno zračenje, tlak i horizontalni vjetar) imaju period od 24 sata, što je u skladu s periodičnošću tih meteoroloških varijabli.

Koeficijenti korelacije vezani za ozon su po apsolutnoj vrijednosti veći od onih vezanih za lebdeće čestice. To je i očekivano, jer više faktora utječe na PM, imaju veće raspršenje nego O₃. Procesi koji utječu na nastanak i život O₃ su jednostavniji od onih koji utječu na nastanak i život lebdećih čestica.

8. Zahvale

Iskreno se zahvaljujem prof. dr. sc. Zvezdani Bencetić Klaić na svestranoj pomoći i susretljivosti bez koje ovaj rad ne bi ugledao svjetlo dana. Također se zahvaljujem dr.

sc. Gledni Herjavić s Instituta Ruđer Bošković na ustupljenim podacima o koncentracijama ozona te na fotografiji mjernog mjesta.

9. Popis literature

Borrego-Hernandez O., Garcia-Reynoso J. A., Ojeda-Ramirez M. M., Suarez-Lastra M. (2014.): Retrospective health impact assessment for ozone pollution in Mexico City from 1991 to 2011, *Atmósfera*, **27**, 261-271.

Hrust L., Klaić Z. B., Križan J., Antonić O., i Hercog P. (2009.): Neural network forecasting of air pollutants hourly concentrations using optimised temporal averages of meteorological variables and pollutant concentrations, *Atmos. Environ.*, **43**, 5588-5596.

Hussein T., Karppinen A., Kukkonen J., Harkonen J., Aalto P. P., Hameri K., Kerminen V. M., Kulmala M. (2005): Meteorological dependence of size-fractionated number concentrations of urban aerosol particles, *Atmospheric Environment*, **40**, 1427–1440.

Jelić D. i Klaić Z. B. (2010.): Air quality in Rijeka, Croatia, *Geofizika*, **27**, 147-167.

Jones A. P., (1999): Indoor air quality and health, *Atmospheric Environment*, **33**, 4535–4564.

Klaić Z. B., Belušić D., Bulić I. H., Hrust L. (2003.): Mesoscale modeling of meteorological conditions in the lower troposphere during a winter stratospheric ozone intrusion over Zagreb, Croatia, *J. Geophys. Res.*, **108**, 4720.

Klaić Z. B., Ružman K., Smiljanić I., Erbe P. (2012): The influence of meteorological conditions and weak to moderate traffic density on PM₁ levels in a residential area of Zagreb, Croatia, *Geofizika*, **29**, 69-102.

Klaić Z. B., Ollier S. J., Babić K., Bešlić I. (2015): Influences of outdoor meteorological conditions on indoor wintertime short-term PM₁ levels. *Geofizika*, **32**, 237-263.

Lelieveld J., Hoor P., Jöckel P., Pozzer A., Hadjinicolaou P., Cammas J.-P., Beirle S. (2009): Severe ozone air pollution in the Persian Gulf region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 1393–1406.

Monks P.S., Granier C., Fuzzi S., Stohl A., Williams M.L., Akimoto H., Amann M., Baklanov A., Baltensperger U., Bey I., Blake N., Blake R.S., Carslaw K., Cooper O.R., Dentener F., Fowler D., Fragkou E., Frost G.J., Generoso S., Ginoux P., Grewe V., Guenther A., Hansson H.C., Henne S., Hjorth J., A. Hofzumahaus A., Huntrieser H., Isaksen I.S.A., Jenkin M.E., Kaiser J., Kanakidou M., Klimont Z., Kulmala M., Laj P., Lawrence M.G., Lee J.D., Liousse C., Maione M., McFiggans G., Metzger A., Mieville A., Moussiopoulos N., Orlando J.J., O'Dowd C.D., Palmer P.I., Parrish D.D., Petzold A., Platt U., Poschl U., Prevot A.S.H., Reeves C.E., Reimann S., Rudich Y., Sellegri K., Steinbrecher R., Simpson D., ten Brink H., Theloke J., van der Werf G.R., Vautard R., Vestreng V., Vlachokostas C., von Glasow R. (2009.): Atmospheric composition change – global and regional air quality, *Atmospheric Environment*, **43**, 5268–5350.

Monks P. S., Archibald A. T., Colette A., Cooper O., Coyle M., Derwent R., Fowler D., Granier C., Law K. S., Mills G. E., Stevenson D. S., Tarasova O., Thouret V., von Schneidmesser E., Sommariva R., Wild O., Williams M. L. (2015.): Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 8889–8973, 2015.

Mues A., Manders A., Schaap M., Kerschbaumer A., Stern R., Builtjes P. (2011.) : Impact of the extreme meteorological conditions during the summer 2003 in Europe on particulate matter concentrations, *Atmospheric Environment*, **55**, 377-391.

Pope C. A. III (2000.): Epidemiology of Fine Particulate Air Pollution and Human Health: Biologic Mechanisms and Who's at Risk? *Environ. Health Perspect.*, **108**, 713-723.

Pope C. A. III, Dockery D. W. (2006.): Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *J. Air Waste Manage.*, **56**, 709-742.

- Prtenjak M. T., Jeričević A., Klaić Z. B., Alebić-Juretić A., Bulić I. H. (2013.): Atmospheric dynamics and elevated ozone concentrations in the northern Adriatic. *Meteorological Applications*, **20**, 482–496.
- Querol X., Alastuey A., Pey J., Cusack M., Perez N., Mihalopoulos N., Theodosi C., Gerasopoulos E., Kubilay N., Kocak M. (2009.): Variability in regional background aerosols within the Mediterranean. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 4575–4591.
- Sadanaga J., Shibata S., Hamana M., Takenaka N., Bandow H. (2008.): Weekday/weekend difference of ozone and its precursors in urban areas of Japan, focusing on nitrogen oxides and hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, **42**, 4708–4723.
- Tchepel, O., Borrego, C. (2010.): Frequency analysis of air quality time series for traffic related pollutants, *J. Environ. Monitor.*, **12**, 544–550.
- Weber S., Kuttler W., Weber K. (2006.): Flow characteristics and particle mass and number concentration variability within a busy urban street canyon, *Atmospheric Environment*, **40**, 7565–7578.

10. Sažetak

Tomislav Andrić

Odziv koncentracija atmosferskih lebdećih čestica i ozona na meteorološke uvjete

U ovom radu istraživala se veza između ljetnih minutnih masenih koncentracija PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ i volumnih koncentracija O₃ u urbanoj sredini te vanjskih meteoroloških uvjeta (temperature, relativne vlažnosti, oborine, globalnog zračenja, tlaka i horizontalnog vjetrova). Alat korišten za istraživanje povezanosti spomenutih varijabli je koeficijent poprečne korelacije. Koncentracije PM su mjerene laserskim fotometrom, a koncentracije ozona ozonometrom. Oba instrumenta nalazila su se na travnjaku Instituta Ruđer Bošković u blizini ceste sa srednje gustim prometom u rezidencijelnoj četvrti Zagreba. Ulaz zraka u oba instrumenta bio je na 3.4 m od tla. Površinski meteorološki podaci su skupljeni na lokaciji udaljenoj 200 m u smjeru juga od mjernog mjesta. Rezultati pokazuju da je ovisnost vanjskih koncentracija PM na

meteorološke uvjete najjača za temperaturu i tlak zraka, dok je najslabija za relativnu vlažnost. Vrijeme odziva varira od 0 minuta (za oborinu, tlak i horizontalni vjetar) do skoro 8 sati (za temperaturu). Za O₃ ovisnost je najjača za temperaturu, relativnu vlažnost i globalno zračenje dok je skoro zanemariva za oborinu, tlak i horizontalni vjetar. Vrijeme odziva varira od 0 minuta (za temperaturu, reletivnu vlažnost i globalno zračenje) do 15 sati (za horizontalni vjetar). Koeficijenti korelacije vezani za PM i O₃ pokazuju dnevnu periodičnost.

Ključne riječi: minutni srednjaci, poprečna korelacija, rezidencijalna, urbana atmosfera, vrijeme odziva

11. Summary

Tomislav Andrić

Response of particular matter and ozone concentrations to meteorological conditions

In this work the relationship between summertime, 1-min mean, urban, outdoor PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ mass concentrations and O₃ volume concentrations and outdoor atmospheric conditions (temperature, relative humidity, precipitation, global radiation, air pressure and horizontal wind) was investigated. Tool used for investigation of this relationship was cross-correlation coefficient. PM concentrations were measured by laser photometer and O₃ concentrations by ozonemeter. Instruments were placed above a grass surface, near Institute Ruđer Bošković, close to the road with moderate traffic in residential area of Zagreb, Croatia. Inlets of both instruments were at height of 3.4 m above the surface. Surface meteorological data were collected at a 200 m distant location, south from the measuring point. Results show that the dependence of outdoor PM on outdoor meteorology is the strongest for temperature and air pressure, but the weakest for relative humidity. Response times varies from 0 minutes (for precipitation, pressure and horizontal wind) to almost 8 hours (for temperature). For O₃ the strongest dependence is found for temperature, relative humidity and global radiation while it is almost negligible for precipitation, air pressure and horizontal wind. Response times varies from 0 minutes (for temperature, relative humidity and

global radiation) to 15 hours (for horizontal wind). Cross-correlation coefficients for PM and O₃ exhibit diurnal periodicity.

Keywords: cross-correlation, residential, response time, urban atmosphere, 1-min mean