

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet

Kristijan Ružman, Ivan Smiljanić, Miran Stojnić
Utjecaj gustoće prometa i meteoroloških čimbenika na
koncentraciju PM1.0 čestica u zraku

Zagreb, 2009.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku pod vodstvom dr. sc. Zvezdane Ben-
cetić Klaić, izv. prof., i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u
akademskej godini 2008./2009.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Podaci i meteorološki uvjeti	2
3	Rezultati i diskusija	8
3.1	Utjecaj pojedinačnih varijabli	10
3.1.1	Gustoća prometa	10
3.1.2	Temperatura zraka	11
3.1.3	Relativna vlažnost zraka	12
3.1.4	Globalno zračenje	12
3.1.5	Tlak zraka	13
3.1.6	Horizontalna brzina vjetra	13
3.1.7	Vertikalna brzina vjetra	14
3.1.8	Smjer vjetra	14
3.2	Višestruka regresija	14
4	Zaključak	17
	Literatura	18
	Sažetak	22
	Summary	23
	Prilozi	24

1 Uvod

Mnogi raniji radovi ukazali su na štetnost polutanata u zraku po ljudsko zdravlje, što posebno dolazi do izražaja u urbanim područjima (Pope i dr., 1995; Seaton i dr., 1995). Njihov utjecaj najviše se manifestira neuravnoteženim funkcioniranjem dišnog sustava, pri čemu se pokazalo da je osim kemijskog sastava važna i veličina lebdećih čestica (Schwartz i dr., 1996; Neuberger i dr., 2004). To je dovelo do podjele na PM10, PM2.5 i PM1.0 čestice prema njihovim aerodinamičkim promjerima koji su redom manji od 10, 2.5 i 1 μm (PM je kratica za *particulate matter*). Aerodinamički promjer neke čestice definiran je kao promjer sferne čestice jedinične gustoće koja se taloži jednakom brzinom kao i promatrana čestica. PM2.5 čestice još se nazivaju i fine čestice.

Nadalje se fine čestice dijele prema EPA¹ (1997) na nukleidni (0.001 do 0.1 μm) i akumulacijski (0.1 do 2.5 μm) mod. Nukleidni mod traje vrlo kratko i sadrži najviše čestica mada je većina ukupne mase finih čestica sadržana u akumulacijskom modu. Čestice u nukleidnom modu nastaju fotokemijskim reakcijama (uz prisutnost Sunčevog zračenja) na atmosferskim plinovima ili izgaranjem, dok akumulacijske čestice nastaju reakcijama plinova koji se u atmosferu emitiraju pri izgaranju fosilnih goriva (tj. plinova koji sadrže sumpor, dušik i organske sastojke). Ovdje valja napomenuti da se akumulacijski mod dijeli na kondenzacijski i kapljični mod. Kondenzacijski mod nastaje kondenzacijom plinova, koja može biti direktna, ili indirektno, koagulacijom plinova s česticama nukleidnog moda. Kapljični mod nastaje kemijskim reakcijama u tekućoj fazi u kojima sudjeluje i sumpor. Nukleidni mod je zbog svog kratkog životnog vijeka važan jedino u neposrednoj blizini izvora tih čestica (John, 2001).

Sve lebdeće čestice mogu se udisanjem nataložiti u dišnom sustavu, no pretpostavlja se da PM2.5 i PM1.0 čestice predstavljaju veću opasnost za zdravlje budući da prodiru dublje u pluća (Donaldson i dr., 1998; Pope, 2000; Calcabrini i

¹U.S. Environmental Protection Agency

dr., 2004). Izloženost tim finim česticama povezuje se s promjenama u kardiovaskularnom sustavu, kao i s općenitim povećanjem stope smrtnosti (Neas, 1999; Peters, 2000).

Uz stacionarne industrijske objekte koji emitiraju najviše lebdećih čestica u atmosferu, utvrđeno je da značajnu ulogu imaju i pokretni izvori onečišćenja, tj. promet. To se primarno odnosi na emitiranje čestica manjih od 1 μm (PM1.0), i to u urbanim područjima gdje je otkrivena povezanost koncentracije čestica u zraku i gustoće prometa (Shi i dr., 1999; Gertler i dr., 2000; Longley i dr., 2003; Bešlić i dr., 2005). Također postoje indicije o vezi između izloženosti zraku zagađenom isključivo prometom i povećanog rizika od obolijevanja od raznih bolesti (Raaschou-Nielsen i dr., 2001; Pedersen i dr., 2004).

Upravo zbog prijetnje koju našem zdravlju predstavljaju PM1.0 čestice i zbog relativno malog broja radova koji se bave tom problematikom (prema našim saznanjima to su prva mjerenja PM1.0 u Hrvatskoj s tako finom vremenskom rezolucijom), odlučili smo se na istraživanje ovisnosti koncentracije tih čestica o intenzitetu prometa. Konkretno, analizirali smo podatke prikupljene uz Bijeničku cestu u Zagrebu, ispred zgrade Fizičkog odsjeka PMF-a. Zbog neposredne blizine automatizirane meteorološke postaje na Geofizičkom odsjeku bili smo u mogućnosti istovremeno pratiti utjecaj različitih meteoroloških elemenata (tlaka, relativne vlažnosti i temperature zraka, horizontalne i vertikalne brzine vjetera i globalog zračenja) na koncentraciju lebdećih čestica PM1.0.

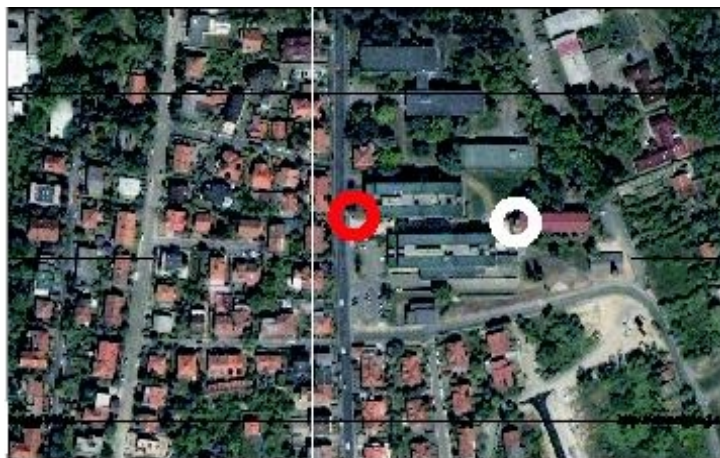
2 Podaci i meteorološki uvjeti

Tijekom tjedan dana u veljači 2009. godine (13.02., 16.02., 17.02. i 19.02.) izvršeno je deset zasebnih mjerenja koncentracije PM1.0 čestica na lokaciji Bijenička cesta 32. Promet ulicom teče u oba smjera, prema gradskom groblju Mirogoj i prema centru grada Zagreba te se uglavnom odvija pri nižim brzinama (do 50 km/h), dok mu gustoća varira od vrlo niske do umjerene. Položaj mjernog mjesta prika-

zan je na Slikama 1 i 2.

Mjerenja su vršena mjernim uređajem DustTrak Aerosol Monitor (TSI, Inc. Shoreview, MN, SAD), model 8520. Uređaj koristi senzor s laserskom diodom širine raspršenja od 90°. Raspon mjerljive koncentracije je između 0.001 do 100 mg/m³ (kalibracija po standardu ISO 12103-1, A1 test), rezolucije ±0.1% očitavanja ili ±0.001 mg/m³ (ovisno o tome koji je podatak veći). Protok čestica unutar uređaja bio je 1.7 L/min. Uređaj je postavljen na pločniku (0.5 metara od ruba kolnika) pored trake u smjeru gradskog groblja Mirogoj, na visini od 1.70 m iznad tla. Tu visinu smo odabrali tako da približno odgovara visini na kojoj prolaznici udišu zrak.

Istovremeno, meteorološki podaci s vremenskom rezolucijom od 1 minute prikupljani su u automatskoj meteorološkoj postaji META 2000 (AMES, Brezovica, Slovenija). Meteorološka postaja udaljena je oko 50 m od mjernog mjesta (Slika 1).



Slika 1: Satelitska snimka mjernog mjesta. Crveno je zaokružen položaj mjernog uređaja, a bijelo obližnje automatske meteorološke postaje na Geofizičkom odsjeku PMF-a. Izvor: Google Maps.



Slika 2: Satelitska snimka šire okolice mjernog mjesta. Crveno je zaokruženi položaj mjernog uređaja. Izvor: Google Maps.

Deset mjerenja s rezolucijom prikupljanja uzoraka od jedne sekunde vršeno je u intervalima od 45 minuta. Gustoća prometa snimana je digitalnom kamerom, a zatim su vozila prebrojana i razvrstana u sljedeće klase: osobni automobili, terenci, kombiji, kamioni i autobusi, sa odgovarajućim težinskim faktorima 1, 1.5, 2, 3.125 i 3.75, redom. Težinski faktori za određenu klasu vozila odabrani su na temelju sugestija g. Zorana Kalauza (2009) iz Centra za vozila Hrvatske. Gustoća prometa predstavlja ponderirani zbroj vozila po minuti. Detaljan opis testova slijedi u Tablici 1. Tijekom trećeg dana mjerenja (testovi 6 i 7) gustoća prometa bila je povećana zbog uobičajenih jutarnjih prometnih gužvi, dok je u ostalim mjerenjima prilično ujednačena. U četvrtom i šestom testu nedostaju redom prvih četiri i sedam minuta mjernih podataka zbog privremene neispravnosti digitalne kamere.

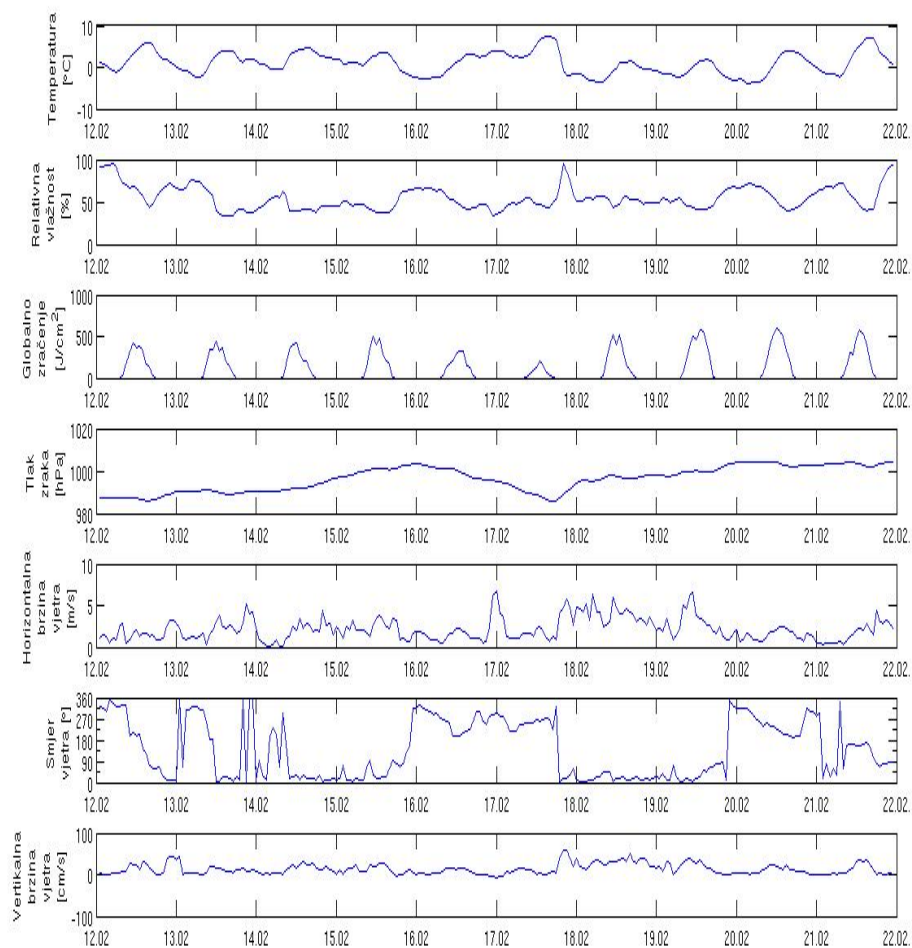
Tablica 1: Opis svih testova. Navedene vrijednosti su srednjaci pripadnih veličina kroz mjereni period (45 min, osim za 4. i 6. test, gdje se mjerilo 41 i 38 min, redom).

Broj testa	Datum	Vrijeme	Otežani srednjak prometa	Temp. zraka [°C]	Rel. vlažnost [%]	Glob. zračenje [J/cm ²]	Tlak zraka [hPa]	Horiz. vjetar [m/s]	Vert. vjetar [cm/s]	Konc. PM1.0 [µg/m ³]
1.	13.02.	15:00 do 15:45	15.32	4.0	33	144	989.1	3.7	9.9	14.6
2.	13.02.	16:15 do 17:00	15.58	3.9	33	30	989.1	2.7	5.9	16.4
3.	16.02.	12:30 do 13:15	14.37	1.9	46	383	999.3	2.4	19.5	39.9
4.	16.02.	13:30 do 14:15	14.27	2.8	42	257	998.3	2.5	8.5	44.6
5.	16.02.	14:30 do 15:15	12.75	3.0	41	126	997.7	1.3	15.6	25.1
6.	17.02.	07:15 do 08:00	17.67	2.2	52	0	990.4	1.9	15.3	48.6
7.	17.02.	08:15 do 09:00	16.21	2.6	55	22	989.8	1.7	13.1	62.5
8.	17.02.	09:15 do 10:00	13.45	3.4	53	50	989.4	1.6	10.8	69.1
9.	19.02.	14:00 do 14:45	13.88	1.8	43	444	999.5	3.2	15.3	38.7
10.	19.02.	15:00 do 15:45	14.46	1.7	43	306	999.6	3.5	13.5	29.3

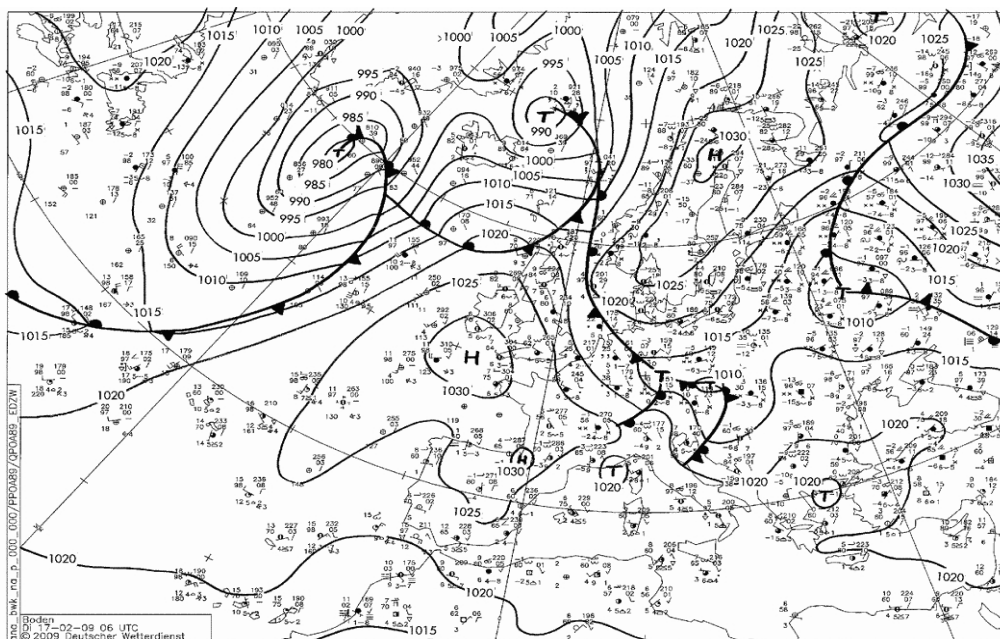
Tijekom mjerenja zabilježena je uglavnom stabilna sinoptička situacija nad našim krajevima. Na Slici 3 prikazani su dnevni hodovi meteoroloških parametara (izmjerenih na automatskoj postaji Geofizičkog odsjeka) od 12. do 22. veljače 2009. Za 16. i 17. veljače može se primjetiti prolazak kratkotrajnog frontalnog poremećaja nad našim područjem (Slika 4). To se najbolje uočava iz pada tlaka zraka i povećanja naoblake (vidljivo iz smanjenog globalnog Sunčevog zračenja) te poremećaja dnevnog hoda temperature.

Grafički prikazi ponašanja minutnih vrijednosti mjerenih meteoroloških veličina za pojedine testove dani su u Prilogu.

Vjetar je na mjernom mjestu za vrijeme mjerenja bio promjenjiv, intenziteta od približno 1 do 7 m/s. Raspon temperatura tijekom mjerenja je bio od 1.4°C do 4.2°C. Za vrijeme čitavog mjerenja kolnik je bio suh, što je omogućavalo podizanje nataloženih čestica s kolnika u zrak.



Slika 3: Dnevni hodovi pojedinih meteoroloških elemenata u razdoblju od 12.02. do 22.02.



<http://www.wetter3.de/fax>

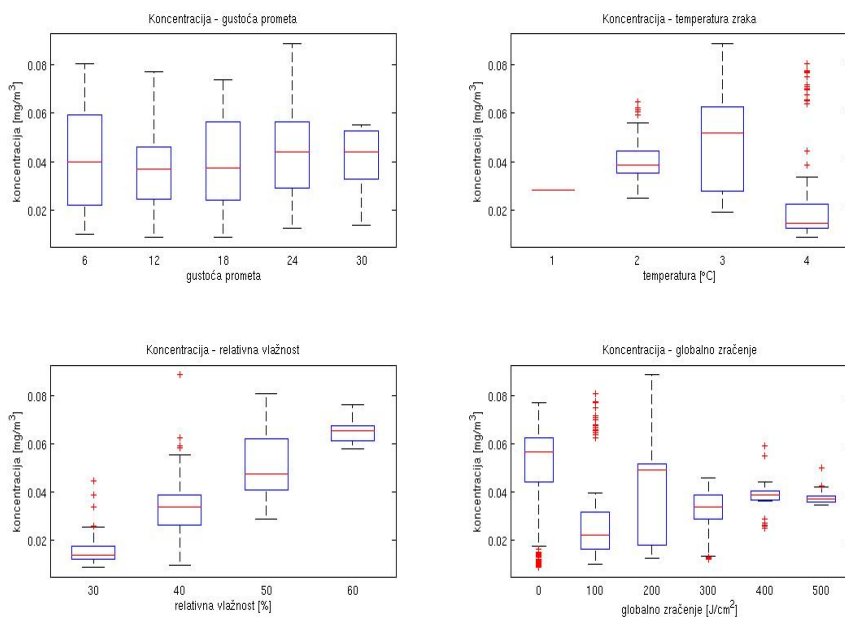
Slika 4: Sinoptička karta Europe 17.02. u 06:00 h (UTC). Izvor:

<http://www.wetter3.de/fax>

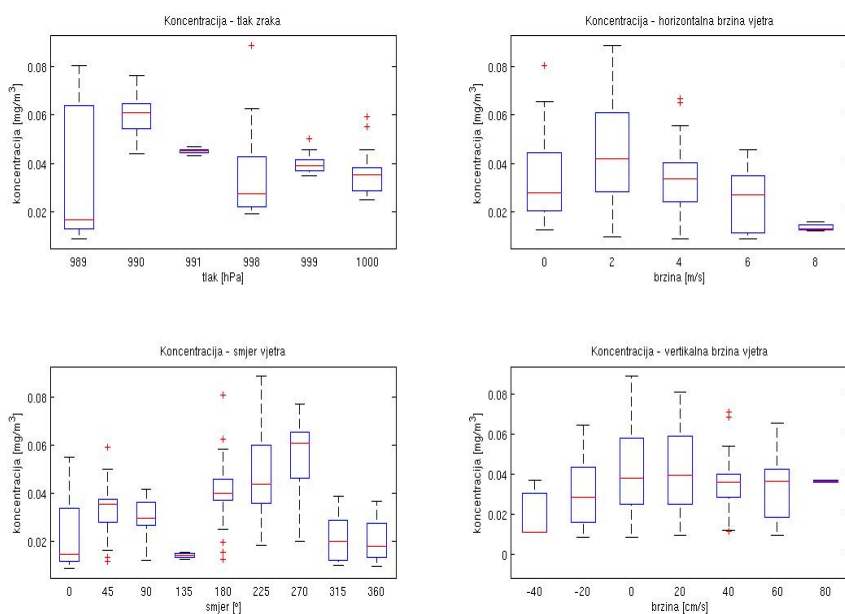
3 Rezultati i diskusija

Sekundno prikupljene podatke o koncentraciji čestica minutno smo usrednjavali. Za meteorološke podatke također smo koristili minutne srednjake pa smo stoga i ponderiranu gustoću prometa promatrali u minutnim intervalima. Ovisnost ukupne koncentracije čestica (za sve testove) o gustoći prometa i meteorološkim parametrima prikazana je na Slikama 5 i 6². Koeficijenti korelacije između koncentracije PM1.0 čestica i gustoće prometa te pojedinih meteoroloških parametara nalaze su u Tablici u Prilogu. Slijedi razmatranje pojedinih čimbenika i njihovog utjecaja na koncentraciju PM1.0.

²Napomena: u nedostatku odgovarajućeg hrvatskog naziva, za takav grafički prikaz koristit ćemo engleski naziv *box-plot*.



Slika 5: Koncentracija u ovisnosti o gustoći prometa, temperaturi, relativnoj vlažnosti i globalnom zračenju. Veličine na x -osi su podijeljene u tipične klase. Gornja i donja stranica pravokutnika prikazuju 75%-tni i 25%-tni percentil, a unutar pravokutnika prikazan je medijan. Vodoravne crte izvan pravokutnika pokazuju najveći (gore) i najmanji (dolje) podatak unutar intervala $M \pm 1.5 IR$, gdje je M medijan, a IR interkvartilni raspon. Križići iznad pravokutnika prikazuju podatke veće od $M + 1.5 IR$, a oni ispod pravokutnika podatke manje od $M - 1.5 IR$.



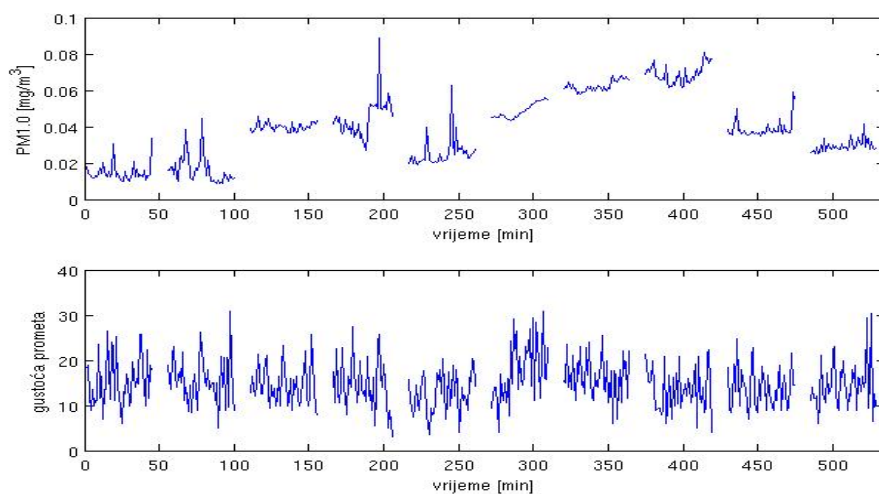
Slika 6: Koncentracija u ovisnosti o tlaku zraka, horizontalnoj brzini, smjeru i vertikalnoj brzini vjetra. Veličine na x -osi su podijeljene u tipične klase. Prikazani su isti statistički pokazatelji kao na prethodnoj slici.

3.1 Utjecaj pojedinačnih varijabli

3.1.1 Gustoća prometa

Na Slici 7 usporedno je prikazana ovisnost koncentracije PM1.0 čestica o ukupnom prometu za sve testove zajedno. Vidljiv je porast koncentracije s porastom gustoće prometa za vrijeme testova 6 i 7 (oko 300.–350. min na Slici 7), ali i visoka koncentracija u testu 8 kad je gustoća prometa bila manja. Isto se može uočiti razmatranjem Tablice 1.

Iz *box-plot*-a na Slici 5 vidljiv je općeniti porast koncentracije s intenzitetom prometa, ali tek kad je taj intenzitet (gustoća) značajan, tj. oko 25 vozila po minuti



Slika 7: Promjena koncentracije i ponderirane gustoće prometa u vremenu. Pojedini testovi odvojeni su prazninama.

i više. Kad je gustoća prometa mala, nema znatnog utjecaja prometa na koncentraciju PM1.0 čestica.

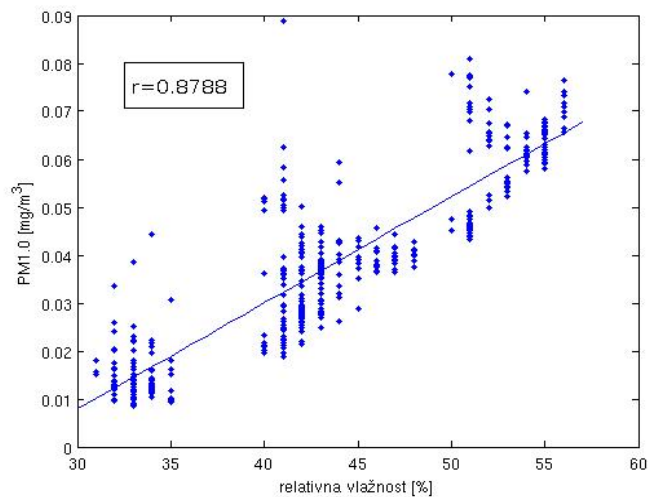
Također se može uočiti i relativno visoka koncentracija za najmanju gustoću prometa. Očito je u takvim situacijama koncentracija lebdećih čestica odraz advekcije čestica iz udaljenih izvora onečišćenja.

3.1.2 Temperatura zraka

Iako iz *box-plot* prikaza nije uočljiv utjecaj temperature na koncentraciju PM1.0 čestica, koeficijent korelacije je negativan ($r = -0.23$). To ukazuje na porast koncentracije s opadanjem temperature. Moguće je da je ta ovisnost posljedica ovisnosti koncentracije čestica o relativnoj vlažnosti, koja općenito raste s opadanjem temperature, a što je opisano u idućem poglavlju.

3.1.3 Relativna vlažnost zraka

Najveći i najpravilniji porast koncentracije PM1.0 čestica uočen je pri porastu relativne vlažnosti, što se jasno može vidjeti iz *box-plot*-a (Slika 5) i dijagrama raspršenja na Slici 8, gdje su prikazani i pripadni pravac regresije i koeficijent korelacije. Koeficijent korelacije između koncentracije i bilo koje druge izmjerene veličine najveći je upravo za relativnu vlažnost ($r = 0.87$). To je u skladu s nas-tankom kapljičnog moda reakcijama mokre faze uz prisustvo sumpora (Vajdić i Gentilizza, 1985).



Slika 8: Dijagram raspršenja za koncentraciju i relativnu vlažnost. Prikazan je i koeficijent korelacije na nivou značajnosti 0.05.

3.1.4 Globalno zračenje

Pomoću *box-plot* prikaza ukupnog skupa podataka ne vidi se pravilan porast koncentracije čestica u ovisnosti o porastu globalnog zračenja. Koeficijent korelacije nije statistički značajan. Ipak, analiza pojedinačnih smjerova, koja je opisana u poglavlju 3.2, pokazuje vrlo velik utjecaj globalnog zračenja na koncentraciju

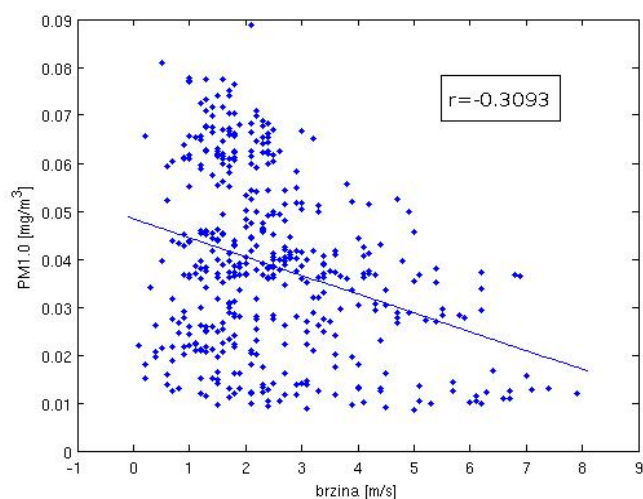
PM1.0 čestica.

3.1.5 Tlak zraka

Tijekom mjerenja tlak se kretao između 989 i 1000 hPa. Na Slici 6 uočava se trend smanjenja koncentracije PM1.0 čestica s povećanjem tlaka. Porastom tlaka dolazi do pojave subsidencije (silaznog gibanja) zraka, koja sprječava dizanje čestica s kolnika u zrak.

3.1.6 Horizontalna brzina vjetra

Uz *box-plot* na Slici 6 valja proučiti i pripadni dijagram raspršenja na Slici 9 s koeficijentom korelacije i pravcem regresije. Možemo zaključiti da pri nižim brzinama horizontalni vjetar pridonosi povećanju koncentracije PM1.0 čestica, i to već spomenutim procesom advekcije. Međutim, kada brzina vjetra postane veća, provjetranje je jače i učinkovitije, a koncentracija čestica je sve manja.



Slika 9: Dijagram raspršenja za koncentraciju i horizontalnu brzinu vjetra. Prikazan je i koeficijent korelacije na nivou značajnosti 0.05.

3.1.7 Vertikalna brzina vjetra

Obrada podataka ukazuje na uglavnom neznačajnu korelaciju vertikalne brzine i koncentracije čestica. Iz *box-plot*-a na Slici 6 je vidljivo da prilikom supsidencije zraka (negativna vertikalna brzina) dolazi do smanjivanja izmjerne koncentracije čestica jer su čestice nisko uz tlo, niže od visine na kojoj se nalazio usisnik instrumenta. Uzlazna gibanja (pozitivna vertikalna brzina) podižu čestice u zrak te time nakratko povećavaju njihovu koncentraciju koja za daljnja povećanja vertikalne brzine ostaje manje-više konstantna (vidi *box-plot*). Najviše vrijednosti koncentracije opažaju se za slaba vertikalna gibanja.

3.1.8 Smjer vjetra

Iz Slike 6 lako je vidljiv porast koncentracije PM1.0 čestica za vjetar južnih i zapadnih smjerova i relativno niska koncentracija za sjeverni vjetar. Razlog za to leži u činjenici da vjetar koji puše s juga, jugozapada i zapada advektira (transportira) čestice iz centra grada i šire okolice te time povećava koncentraciju PM1.0 čestica. Nasuprot tome, vjetar sjevernih smjerova rezultira smanjenjem izmjerne koncentracije jer puše iz smjera Medvednice gdje nema industrijskih zona i postrojenja, kao ni značajnog prometa. Nažalost, slučajeva s jugoistočnim vjetrom, koji općenito donosi česticama onečišten zrak iz zagrebačke industrijske zone (Bešlić i dr., 2007), bilo je premalo, a očekivalo se da bi imali najveći utjecaj na povećanje koncentracije PM1.0 čestica.

3.2 Višestruka regresija

Budući da se pokazalo kako smjer vjetra ima velik utjecaj na mjerenu koncentraciju, sve smo podatke podijelili u osam klasa prema pripadnih osam smjerova vjetra (po 45°), jer je iz različitih smjerova advekcija polutanata različita. Za svaki smjer, osim za jugoistočni zbog malog broja podataka, ponovno smo crtali dijagrame raspršenja koncentracije i svakog od promatranih meteoroloških para-

metara, kao i prometa (nisu ovdje prikazani). Nakon toga smo računali pripadne koeficijente korelacije, koji su dani u Tablici u Prilogu, te proveli račun višestruke regresije. Na taj način dobili smo sljedeće jednadžbe, po jednu za svaki smjer vjetra:

$$\begin{aligned} \text{S: } c = & -2.19 + 7.64 \cdot 10^{-3}T + 3.08 \cdot 10^{-4}u + 3.36 \cdot 10^{-5}G + 2.19 \cdot 10^{-3}p \\ & - 1.31 \cdot 10^{-3}V_h - 6.45 \cdot 10^{-5}V_v + 3.36 \cdot 10^{-4}P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SII: } c = & 2.74 - 3.92 \cdot 10^{-4}T + 3.07 \cdot 10^{-3}u + 6.37 \cdot 10^{-5}G - 2.86 \cdot 10^{-3}p \\ & - 1.27 \cdot 10^{-3}V_h - 1.17 \cdot 10^{-5}V_v + 4.34 \cdot 10^{-4}P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{II: } c = & -5.37 + 1.76 \cdot 10^{-2}T + 4.11 \cdot 10^{-4}u + 1.36 \cdot 10^{-5}G + 5.36 \cdot 10^{-3}p \\ & - 3.69 \cdot 10^{-4}V_h + 1.97 \cdot 10^{-5}V_v - 2.63 \cdot 10^{-5}P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{JJ: } c = & -1.46 + 1.57 \cdot 10^{-2}T + 3.11 \cdot 10^{-3}u - 1.80 \cdot 10^{-5}G + 1.32 \cdot 10^{-3}p \\ & + 4.35 \cdot 10^{-3}V_h - 5.71 \cdot 10^{-5}V_v - 4.54 \cdot 10^{-4}P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{JJZ: } c = & 0.77 + 1.22 \cdot 10^{-2}T + 2.48 \cdot 10^{-3}u + 4.83 \cdot 10^{-5}G - 8.91 \cdot 10^{-4}p \\ & + 1.04 \cdot 10^{-3}V_h - 1.58 \cdot 10^{-4}V_v + 3.30 \cdot 10^{-4}P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Z: } c = & 3.05 + 6.81 \cdot 10^{-3}T + 2.09 \cdot 10^{-3}u + 1.18 \cdot 10^{-4}G - 3.15 \cdot 10^{-3}p \\ & - 5.93 \cdot 10^{-4}V_h - 1.05 \cdot 10^{-5}V_v + 7.57 \cdot 10^{-5}P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SZ: } c = & -2.20 - 3.75 \cdot 10^{-4}T - 4.68 \cdot 10^{-3}u + 9.98 \cdot 10^{-5}G + 2.39 \cdot 10^{-3}p \\ & - 1.38 \cdot 10^{-3}V_h - 1.61 \cdot 10^{-4}V_v + 7.03 \cdot 10^{-4}P, \end{aligned}$$

pri čemu je c koncentracija PM1.0 čestica izražena u mg/m^3 , dok su T , u , G , p , V_h , V_v i P redom temperatura u $^{\circ}\text{C}$, relativna vlažnost u %, globalno zračenje u J/cm^2 , tlak u hPa, horizontalna brzina vjetra u m/s, vertikalna brzina vjetra u cm/s i ponderirana gustoća prometa.

Potrebno je uočiti da koeficijent korelacije sugerira opadanje koncentracije čestica s temperaturom, dok koeficijent višestruke regresije sugerira porast koncentracije.

Relativna vlažnost gotovo uvijek djeluje u smislu povećanja koncentracije. Jedino se za sjeverozapadni vjetar koncentracija smanjuje povećanjem relativne vlažnosti. Razmatrajući spregu tih dvaju veličina po smjerovima vjetra uočen je najbrži porast koncentracije PM1.0 čestica za južnu komponentu vjetra, dok je za istočnu komponentu vjetra taj porast najslabiji.

Razmatranjem višestruke regresije i dijagrama raspršenja po smjerovima vjetra, zamijećen je značajan porast koncentracije čestica u ovisnosti o porastu globalnog zračenja. Iz Tablice u Prilogu može se vidjeti kako je koeficijent korelacije statistički značajan za sve smjerove vjetra osim za južni. To je u skladu s nastankom nukleidnog moda fotokemijskim reakcijama na ispušnim plinovima.

Što se tiče horizontalne brzine vjetra, usporedbom koeficijenata uz V_h za različite smjerove vjetra vidljivo je dominantno povećanje koncentracije prilikom južnog strujanja te smanjenje prilikom sjeverozapadnog strujanja.

Metoda višestruke regresije za pojedinačne smjerove strujanja pokazala je zanemarivu ovisnost koncentracije o vertikalnoj brzini.

4 Zaključak

Mjerenja koncentracije PM1.0 čestica na otvorenom prostoru pod velikim su utjecajem meteoroloških elemenata. Rezultati obrade podataka pokazali su najveću korelaciju između koncentracije PM1.0 čestica i vlažnosti zraka, što je u slaganju s nekim prijašnjim rezultatima (Vajdić i Gentilizza, 1985), te o globalnom zračenju. U suprotnosti s rezultatima Bešlića i dr. (2005), a u skladu s Abu-Allaban i dr. (2003) i Martuzevicius i dr. (2004) nije dobivena izražena korelacija između gustoće prometa i koncentracije čestica. Ovdje treba napomenuti da se rad Bešlića i dr. temelji na tunelskim mjerenjima, gdje nema utjecaja meteoroloških čimbenika, te na podacima s vremenskom rezolucijom od nekoliko sati. Radovi Abu-Allabana i dr. te Martuzeviciusa i dr., kao i ovaj rad, opisuju mjerenja koncentracije čestica na otvorenim površinama. Također je potrebno spomenuti razliku između dva posljednje spomenuta rada, tj. da je rad Abu-Allabana i dr. temeljen na sekundnim mjerenjima, a rad Martuzeviciusa i dr. na dnevnim, koji su povezani sa malim varijacijama u gustoći prometa.

Može se uočiti povećana koncentracija čestica za južni, jugozapadni i zapadni smjer vjetra (Slika 6), gdje taj vjetar advektira čestice iz urbanog područja grada Zagreba, gdje je velika gustoća prometa. Minimumi koncentracije povezani su uz sjeverni vjetar koji puše iz smjera rijetko naseljenog područja te služi za provjetranje atmosfere, doprinoseći smanjenju koncentracije. Za jugoistočni vjetar prikupljeno je samo pet podataka, koji nisu uzeti u obzir, te time nije zabilježen očekivani maksimum koncentracije čestica zbog utjecaja zagrebačke industrijske zone i većih regionalnih izvora onečišćenja (poput Kutine i Siska).

Rezultati ovog rada u skladu su s dosadašnjim saznanjima. Nadalje, mjerene koncentracije i njihova ovisnost o prometu i meteorološkim parametrima pokazali su se fizikalno utemeljenima. To potvrđuje da je eksperimentalni dio rada proveden korektno.

Dobiveni rezultati potvrđuju važnost globalnog zračenja pri formiranju nuk-

leidnog moda te vlažnosti zraka pri nastanku kapljičnog moda. Upravo ti modovi od nukleidnog do kapljičnog sadržani su u mjerenjima PM_{1.0}. Uz to, jasno se pokazalo da je utjecaj prometa značajan tek kad je njegova gustoća dovoljno velika te da inače prevladava utjecaj advekcije iz udaljenih izvora.

Također bismo željeli primijetiti da ovaj rad može poslužiti kao temelj za daljnje proučavanje utjecaja meteoroloških elemenata na koncentraciju čestica, kao i za preciznije utvrđivanje emisijskih faktora automobila i njihovog utjecaja na ljudsko zdravlje.

Literatura

- [1] Abu-Allaban, M., Gillies, J.A. i Gertler, A.W., 2003. Application of a multi-lag regression approach to determine on-road PM₁₀ and PM_{2.5} emission rates. *Atmospheric Environment* 37, 5157–5164.
- [2] Bešlić, I., Šega, K., Šišović, A. i Klaić, Z.B., 2005. PM₁₀, CO and NO_x concentrations in the Tuhobić tunnel, Croatia. *Int. J. Environment and Pollution* 25, Nos. 1/2/3/4, 251–262.
- [3] Bešlić, I., Šega, K., Čačković, M., Klaić, Z.B. i Vučetić, V., 2007. Influence of weather types on concentrations of metallic components in airborne PM₁₀ in Zagreb, Croatia. *Geofizika* 24, No. 2, 93–107.
- [4] Calcabrini, A., Meschini, S., Marra, M., Falzano, L., Colone, M., De Berardis, B., Paoletti, L., Arancia, G. i Fiorentini, C., 2004. Fine Environmental particulate engenders alteration in human lung epithelial A549 cells. *Environmental Research* 95, 82–91. (Citirano prema: Bešlić, I., Šega, K., Šišović, A. i Klaić, Z.B., 2005. PM₁₀, CO and NO_x concentrations in the Tuhobić tunnel, Croatia. *Int. J. Environment and Pollution* 25, Nos. 1/2/3/4, 251–262.)
- [5] Donaldson, K., Li, X.Y. i MacNee, W., 1998. Ultrafine (nanometer) particle mediated lung injury. *Journal of Aerosol Science* 29, 553–560. (Citirano prema: Kumar, P., Fennell, P. i Britter, R., 2008. Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment* 390, 437–447.)
- [6] Gertler, A.W., Gillies, J.A. i Pierson, W.R., 2000. An assessment of the mobile source contributions to PM₁₀ and PM_{2.5} in the United States. *Water, Air and Soil Pollution* 123,

- 203–214. (Citirano prema: Gertler, A., Kuhns, H., Abu-Allaban, M., Damm, C., Gillies, J., Etyemezian, V., Clayton, R. i Proffitt, D., 2006. A case study of the impact of Winter road sand/salt and street sweeping on road dust re-entrainment. *Atmospheric Environment* 40, 5976–5985.)
- [7] John, W., 2001. Size distribution characteristics of aerosols. (U: *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*, 2. izdanje. Baron, P.A. i Willeke, K., urednici. New York, Wiley-InterScience, Inc., 99–116.)
- [8] Kalauz, Z., 2009. (osobna komunikacija)
- [9] Longley, I.D., Gallagher, M.W., Dorsey, J.R., Flynn, M., Allan, J.D., Alfarra, D. i dr., 2003. A case study of aerosol ($4.6 \text{ nm} < D_p < 10 \mu\text{m}$) number and mass size distribution measurements in a busy street canyon in Manchester. U.K. *Atmospheric Environment* 37, 1563–1571. (Citirano prema: Kumar, P., Fennell, P. i Britter, R., 2008. Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment* 390, 437–447.)
- [10] Martuzevicius, D., Grinshpun, S.A., Reponen, T., Gorny, R.L., Shukla, R., Lockey, J., Hu, S., McDonald, R., Biswas, P., Kliucininkas, L. i LeMasters, G., 2004. Spatial and temporal variations of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and composition throughout an urban area with high freeway density — the Greater Cincinnati study. *Atmospheric Environment* 38, 1091–1105. (Citirano prema: Bešlić, I., Šega, K., Šišović, A. i Klaić, Z.B., 2005. PM_{10} , CO and NO_x concentrations in the Tuhobić tunnel, Croatia. *Int. J. Environment and Pollution* 25, Nos. 1/2/3/4, 251–262.)
- [11] Neas, L.M., 1999. A case-crossover analysis of air pollution and mortality in Philadelphia. *Environmental Health Perspectives* 107, 629–631. (Citirano prema: Yanosky, J.D., Williams, P.L., MacIntosh, D.L., 2002. A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for $\text{PM}_{2.5}$ in indoor air. *Atmospheric Environment* 36, 107–113.)
- [12] Neuberger, M., Schimek, M.G., Horak, F., Moshhammer, H., Kundi, M., Frischer, T., Gomiscek, B., Puxbaum, H., Hauck, H. i AUPHEP-Team, 2004. Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP). *Atmospheric Environment*

- 38, 3971–3981. (Citirano prema: Bešlić, I., Šega, K., Šišović, A. i Klaić, Z.B., 2005. PM10, CO and NO_x concentrations in the Tuhobić tunnel, Croatia. *Int. J. Environment and Pollution* 25, Nos. 1/2/3/4, 251–262.)
- [13] Pedersen, C.B., Raaschou-Nielsen, O., Hertel, O. i Mortensen, P.B., 2004. Air pollution from traffic and schizophrenia risk. *Schizophrenia Research* 66, 83–85. (Citirano prema: Bešlić, I., Šega, K., Šišović, A. i Klaić, Z.B., 2005. PM10, CO and NO_x concentrations in the Tuhobić tunnel, Croatia. *Int. J. Environment and Pollution* 25, Nos. 1/2/3/4, 251–262.)
- [14] Peters, A., 2000. Air pollution and incidence of cardiac arrhythmia. *Epidemiology* 11, 11–17. (Citirano prema: Yanosky, J.D., Williams, P.L., MacIntosh, D.L., 2002. A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for PM_{2.5} in indoor air. *Atmospheric Environment* 36, 107–113.)
- [15] Pope, C.A. III, 2000. Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards. *Aerosol Science and Technology* 32, 4–14. (Citirano prema: Kumar, P., Fennell, P. i Britter, R., 2008. Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment* 390, 437–447.)
- [16] Pope, III C.A., Dockery, D.W., Schwartz J., 1995. Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution. *Inhal Toxicol* 7, 1–18. (Citirano prema: Kumar, P., Fennell, P. i Britter, R., 2008. Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment* 390, 437–447.)
- [17] Raaschou-Nielsen, O., Hertel, O., Thomsen, B.L. i Olsen, J.H., 2001. Air pollution from traffic at the residence of children with cancer. *American Journal of Epidemiology* 153, 433–443. (Citirano prema: Bešlić, I., Šega, K., Šišović, A. i Klaić, Z.B., 2005. PM10, CO and NO_x concentrations in the Tuhobić tunnel, Croatia. *Int. J. Environment and Pollution* 25, Nos. 1/2/3/4, 251–262.)
- [18] Schwartz, J., Dockery, D.W., Neas, L.M., 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of the Air and Waste Management Association* 46, 927–939. (Citirano prema: Yanosky, J.D., Williams, P.L., MacIntosh, D.L., 2002. A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for PM_{2.5} in indoor air. *Atmospheric Environment* 36, 107–113.)

- [19] Seaton, A., MacNee, N., Donaldson, K., Godden, D., 1995. Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet* 345, 176–178. (Citirano prema: Kumar, P., Fennell, P. i Britter, R., 2008. Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment* 390, 437–447.)
- [20] Shi, P.J., Khan, A.A., Harrison, R.M., 1999. Measurements of ultra fine particle concentration and size distribution in the urban atmosphere. *The Science of the Total Environment* 235, 51–64. (Citirano prema: Kumar, P., Fennell, P. i Britter, R., 2008. Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment* 390, 437–447.)
- [21] U.S. Environmental Protection Agency, 1997. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. *Fed. Reg.* 62 (138), July 18. (Citirano prema: John, W., 2001. Size distribution characteristics of aerosols. (U: *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*, 2. izdanje. Baron, P.A. i Willeke, K., urednici. New York, Wiley-InterScience, Inc., 99–116.))
- [22] Vajdić, V. i Gentilizza, M., 1985. The effects of MnO₂ and some manganese salts on the behaviour of sulphur dioxide in the air investigated on model systems. *The Science of the Total Environment* 44, 245–251.

Sažetak

Kristijan Ružman, Ivan Smiljanić, Miran Stojnić: Utjecaj gustoće prometa i meteoroloških čimbenika na koncentraciju PM1.0 čestica u zraku

Tijekom razdoblja od tjedan dana (veljača 2009.) izvršeno je deset mjerenja koncentracije lebdećih čestica aerodinamičkog promjera do 1 μm (PM1.0) uz Bijeničku cestu u Zagrebu. Ovom studijom željeli smo utvrditi utjecaj gustoće prometa i meteoroloških prilika na koncentraciju PM1.0 u zraku. Proučavali smo čestice promjera do 1 μm budući da su upravo one, zbog svoje male veličine, najštetnije za ljudsko zdravlje. Rezultati su pokazali određenu ovisnost koncentracije čestica o gustoći prometa. Međutim, utjecaj meteoroloških elemenata na koncentraciju PM1.0, prvenstveno sunčevog zračenja, relativne vlažnosti zraka i horizontalnog vjetra, puno je veći od utjecaja prometa.

Ključne riječi: PM1.0 čestice, gustoća prometa, globalno zračenje, relativna vlažnost, horizontalni vjetar

Summary

Kristijan Ružman, Ivan Smiljanić, Miran Stojnić: Traffic and meteorological influence on the PM1.0 concentration

During one week in February 2009 ten measurements of particulate matter with aerodynamic diameter less than 1 μm (PM1.0) were carried out at Bijenička road in Zagreb. The objective of this study was to determine the traffic and meteorological influence on the PM1.0 concentration in air. Particles with diameter less than 1 μm were studied because of their adverse effects on human health due to their small size. Results have shown some dependence between traffic density and particle concentration. However, meteorological influences on PM1.0 concentration, mainly the impact of global radiation, relative humidity and horizontal wind, are much larger than the traffic influence.

Keywords: PM1.0 particles, traffic density, global radiation, relative humidity, horizontal wind

Prilozi

Tablica 2: Koeficijenti korelacije između PM1.0 koncentracije čestica i meteoroloških parametara te gustoće prometa. Masno su otisnute varijable i pripadni koeficijenti korelacije koji su u danom skupu podataka statistički značajni (na nivou 0.05).

Varijabla	Koef. korelacije	Broj podataka	Napomena
Temp.	-0.237	439	
Rel. vlažnost	0.879	439	
Glob. zračenje	-0.182	439	
Tlak	-0.139	439	Svi podaci
Horiz. vjetar	-0.309	439	
Vert. vjetar	0.011	439	
Gustoća prometa	0.052	439	
Temp.	-0.765	83	
Rel. vlažnost	0.790	83	
Glob. zračenje	0.806	83	
Tlak	0.797	83	Sjeverni vjetar
Horiz. vjetar	-0.279	83	
Vert. vjetar	0.312	83	
Gustoća prometa	-0.072	83	
Temp.	-0.672	36	
Rel. vlažnost	0.704	36	
Glob. zračenje	0.833	36	
Tlak	0.704	36	Sjeveroistočni vjetar
Horiz. vjetar	0.053	36	
Vert. vjetar	0.114	36	
Gustoća prometa	0.211	36	
Temp.	-0.827	41	

nastavak na idućoj stranici

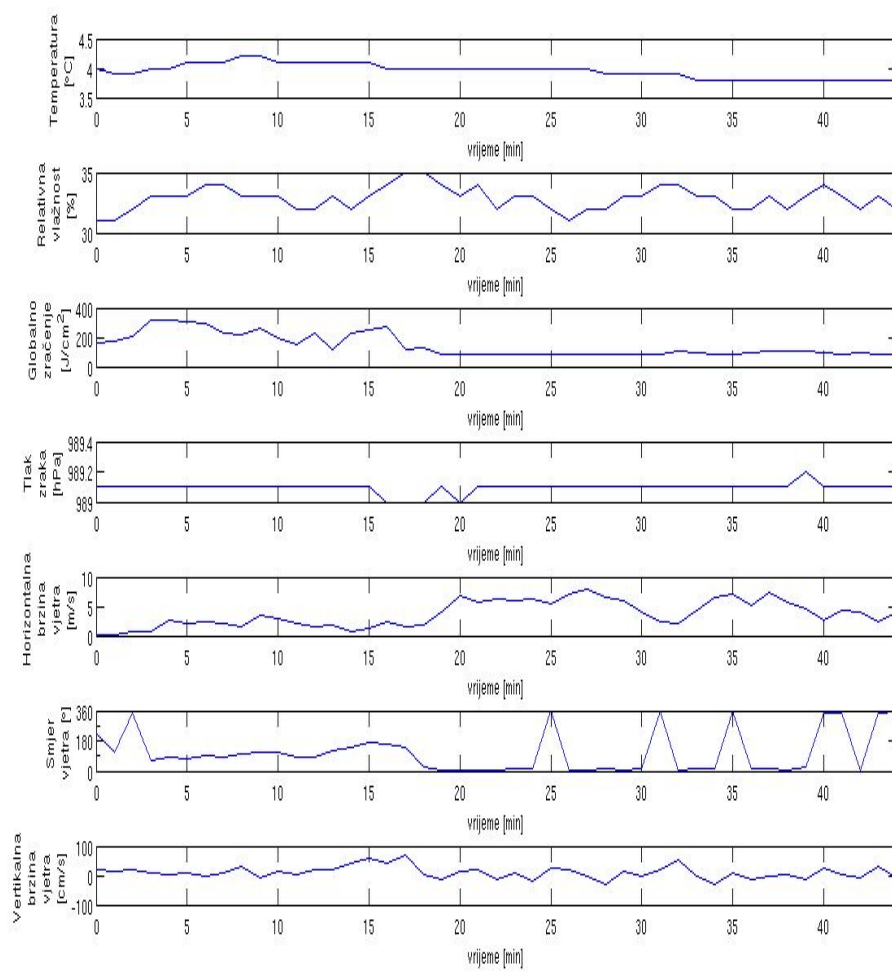
nastavak s prethodne stranice

Varijabla	Koef. korelacije	Broj podataka	Napomena
Rel. vlažnost	0.872	41	
Glob. zračenje	0.624	41	
Tlak	0.864	41	Istočni vjetar
Horiz. vjetar	0.384	41	
Vert. vjetar	0.062	41	
Gustoća prometa	0.139	41	
Temp.	0.067	56	
Rel. vlažnost	0.264	56	
Glob. zračenje	-0.264	56	
Tlak	0.070	56	Južni vjetar
Horiz. vjetar	0.316	56	
Vert. vjetar	-0.288	56	
Gustoća prometa	-0.251	56	
Temp.	0.174	107	
Rel. vlažnost	0.784	107	
Glob. zračenje	-0.384	107	
Tlak	-0.689	107	Jugozapadni vjetar
Horiz. vjetar	0.033	107	
Vert. vjetar	-0.225	107	
Gustoća prometa	0.208	107	
Temp.	0.180	99	
Rel. vlažnost	0.877	99	
Glob. zračenje	-0.508	99	
Tlak	-0.867	99	Zapadni vjetar
Horiz. vjetar	0.142	99	

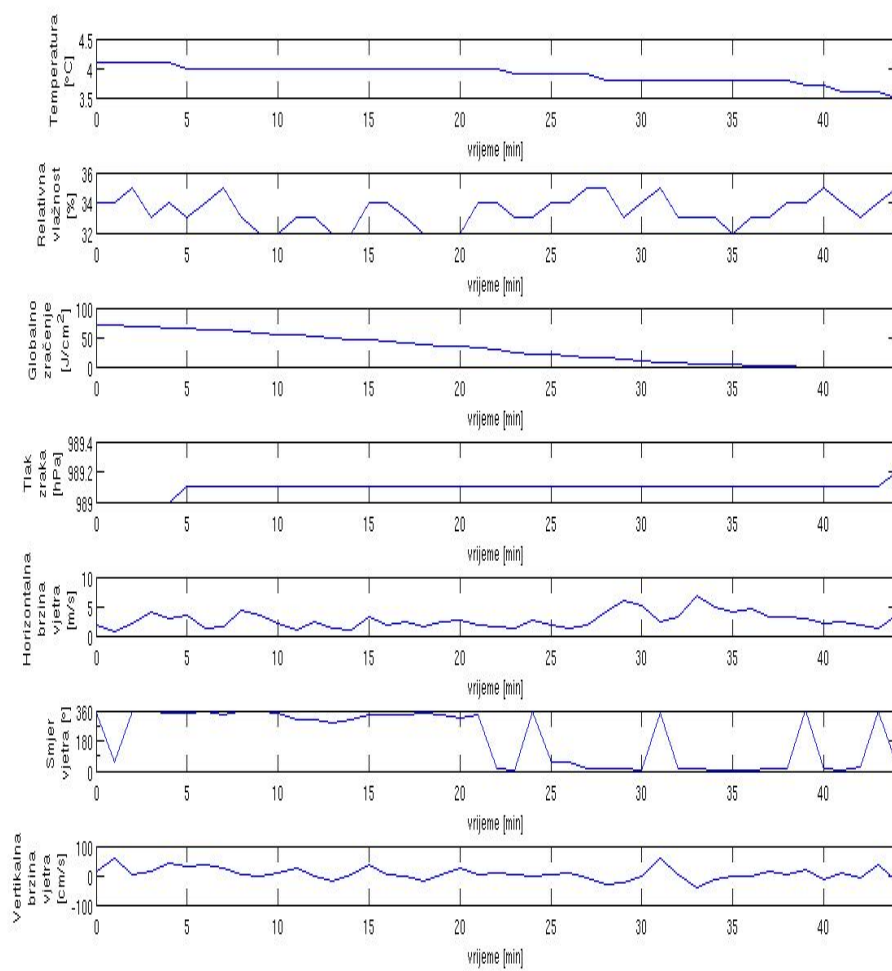
nastavak na idućoj stranici

nastavak s prethodne stranice

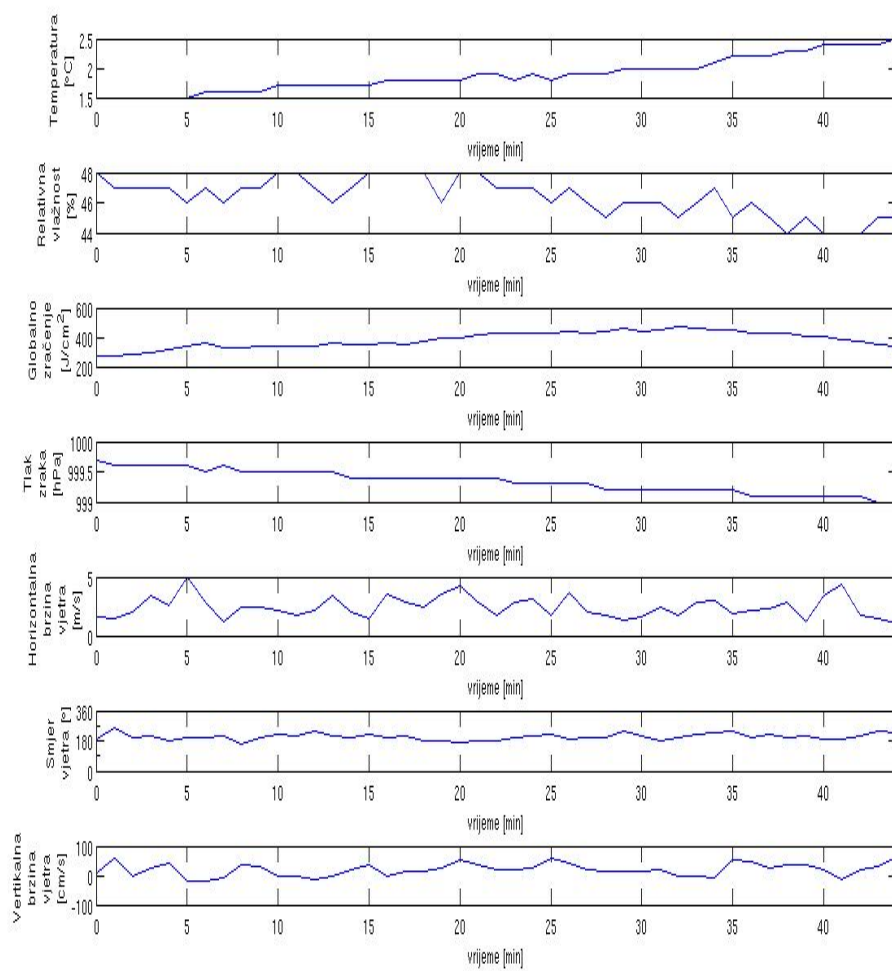
Varijabla	Koef. korelacije	Broj podataka	Napomena
Vert. vjetar	-0.116	99	
Gustoća prometa	0.141	99	
Temp.	-0.584	12	
Rel. vlažnost	0.451	12	
Glob. zračenje	0.574	12	
Tlak	0.565	12	Sjeverozapadni vjetar
Horiz. vjetar	0.123	12	
Vert. vjetar	0.382	12	
Gustoća prometa	0.289	12	



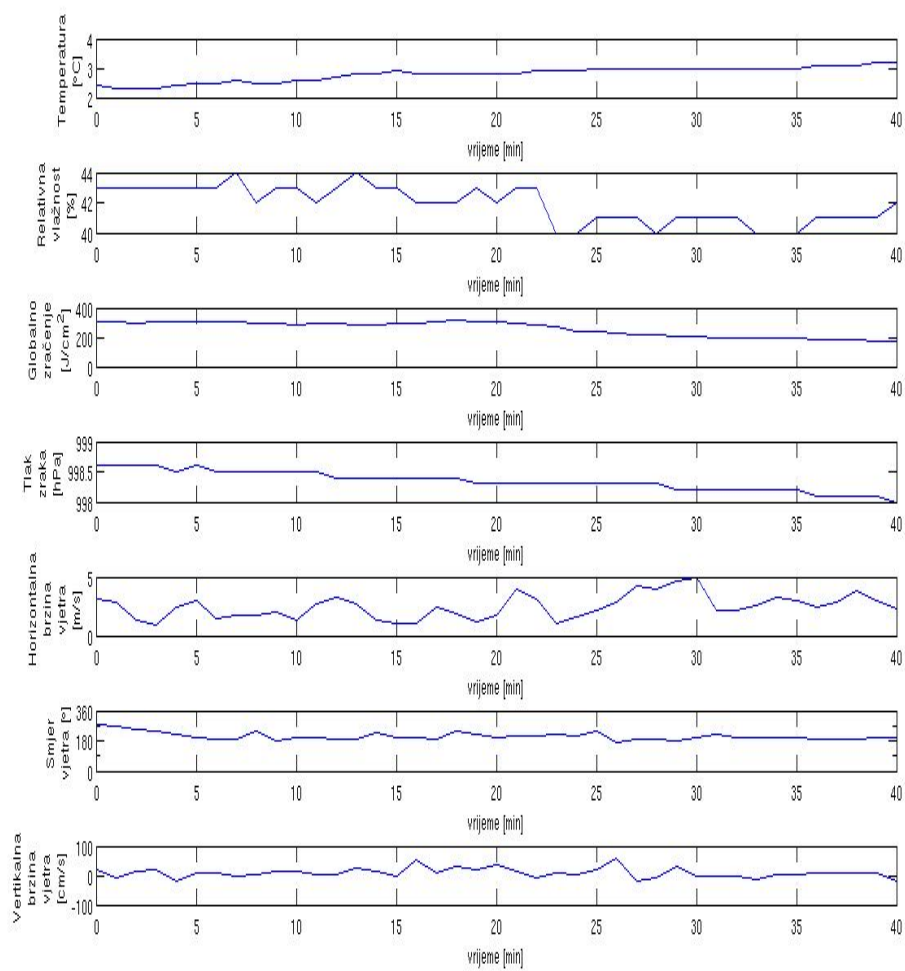
Slika 10: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 1. testa



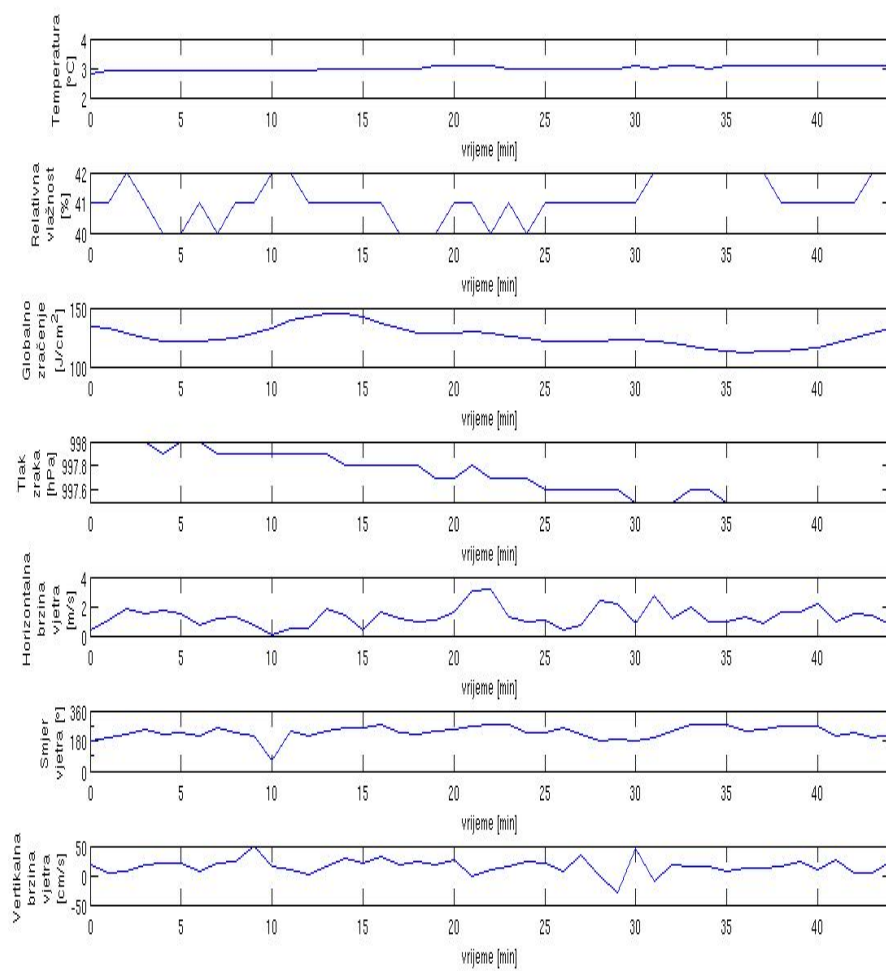
Slika 11: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 2. testa



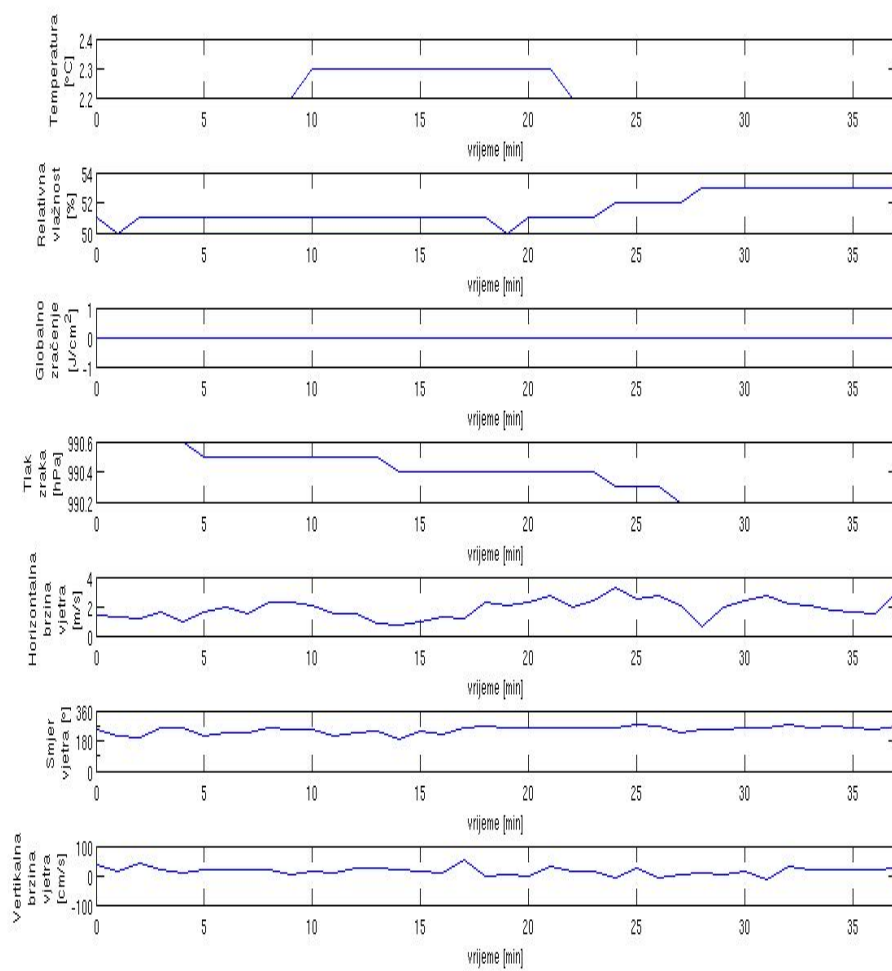
Slika 12: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 3. testa



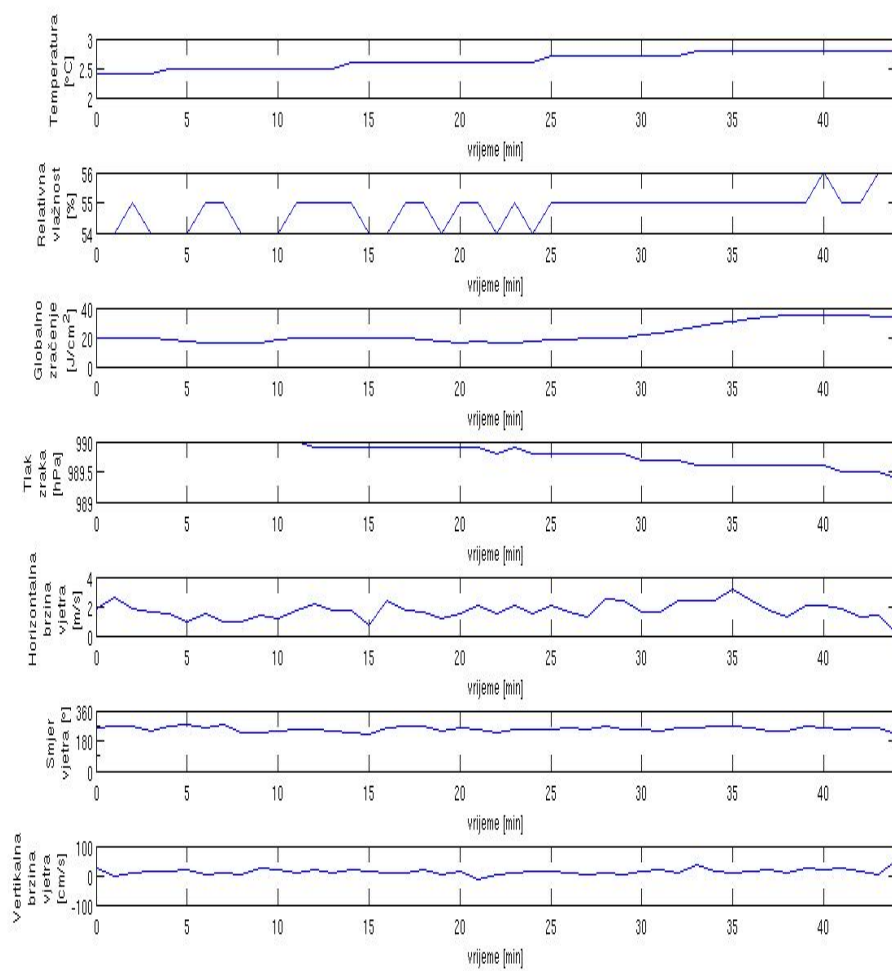
Slika 13: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 4. testa



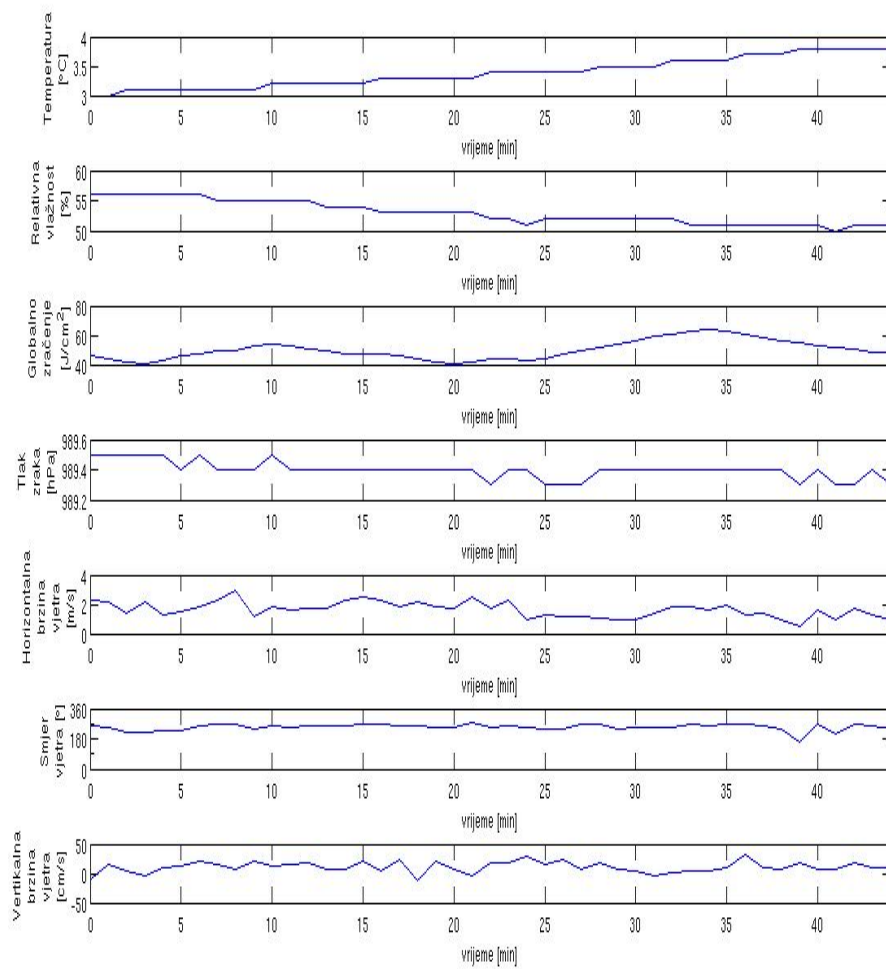
Slika 14: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 5. testa



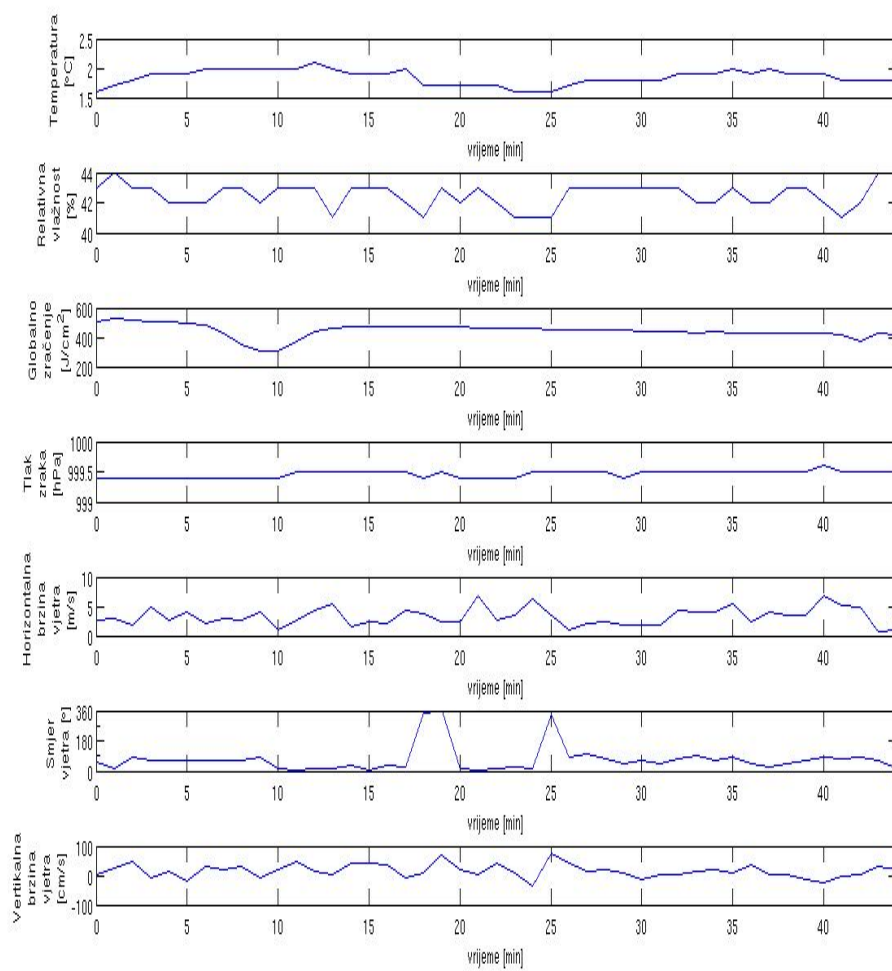
Slika 15: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 6. testa



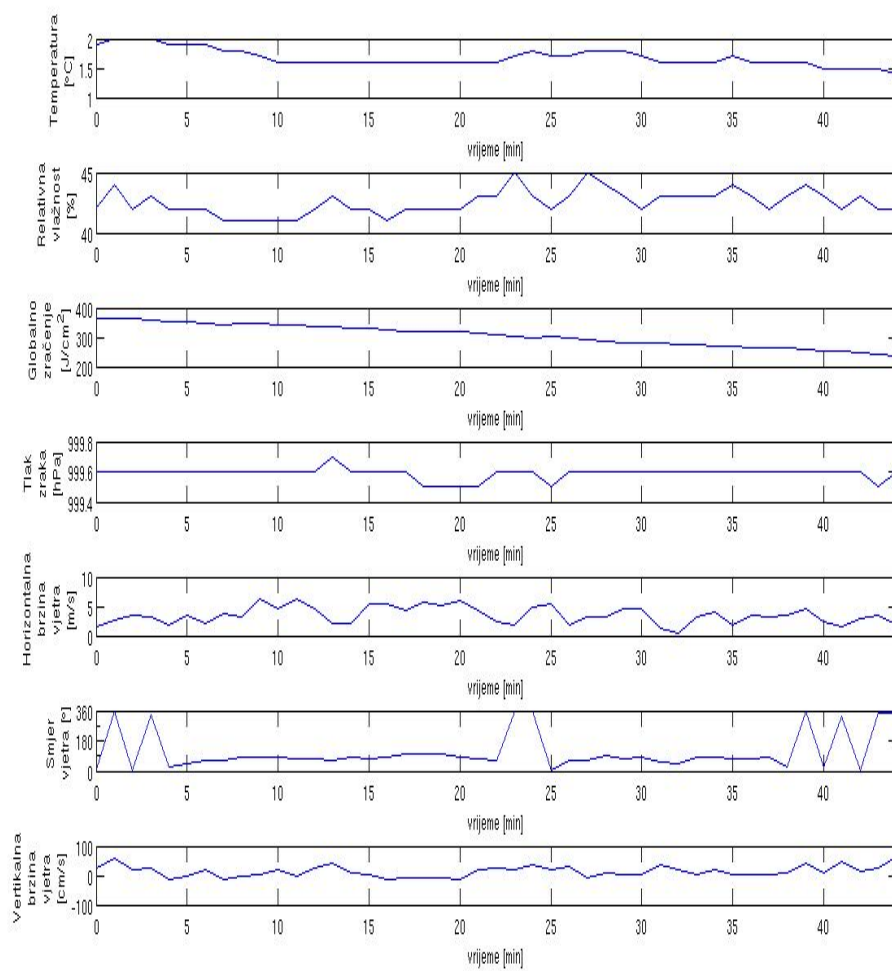
Slika 16: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 7. testa



Slika 17: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 8. testa



Slika 18: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 9. testa



Slika 19: Hod pojedinih meteoroloških parametara za vrijeme 10. testa