

UTJECAJ ZMORCA NA ONEČIŠĆENOST ZRAKA NA SPLITSKOM PODRUČJU

THE INFLUENCE OF SEA BREEZE ON THE AIR POLLUTION IN THE SPLIT AREA

TANJA TROŠIĆ LESAR¹, ANITA FILIPČIĆ²

¹ Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, 10000 Zagreb / *Meteorological and Hydrological Service*, e-mail: trosic@cirus.dhz.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Marulićev trg 19/II, 10000 Zagreb / *University of Zagreb, Faculty of Science, Department of Geography*, e-mail: filipcic@geog.pmf.hr

DOI: [10.15291/geoadria.1498](https://doi.org/10.15291/geoadria.1498)

UDK: 94-04:<911.3:32>(497.5)=163.42=111

Prethodno priopćenje / *Preliminary communication*

Primljeno / *Received*: 6-8-2018



U radu se istražuje utjecaj zmorca na koncentraciju NO₂, SO₂, PM_{2.5} i PM₁₀ na splitskom području prema mjernim postajama Split-centar i Kaštel Sućurac. Za proučavanje su izdvojeni dani u kojima je obalna cirkulacija bila neporemećena. U izdvojenim danima polje tlaka zraka bilo je bezgradijentno. Posebno su istraženi čestina i brzina vjetra u takvim danima. Zmorac u Splitu ima SW smjer, a u Kaštel Sućurcu WSW i W. Koncentracije onečišćujućih tvari uspoređene su s brzinama vjetra. Najprisutnija onečišćujuća tvar je NO₂. Najviše ga ima u večernjim i jutarnjim satima dok zmorac još nije razvio veću brzinu ili mu se brzina smanjuje približavanjem večernjeg zatišja. Što je brzina zmorca veća, koncentracija NO₂ je manja. Nastupom zmorca povećava se koncentracija lebdećih čestica zbog turbulencije vjetra unutar grada te mogućeg donosa morskog aerosola i nusprodukata pomorskog prometa. NO₂ dostiže veće vrijednosti u Splitu nego u Kaštel Sućurcu. Lebdeće čestice imaju veće koncentracije u Kaštel Sućurcu nego u Splitu. Vrijednosti svih onečišćujućih tvari ispod su graničnih vrijednosti za zdravlje ljudi.

KLJUČNE RIJEČI: zmorac, obalna cirkulacija zraka, onečišćenost zraka, lebdeće čestice

The paper investigates the impact of sea breeze on the NO₂, SO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Split area towards the Split-centre and Kaštel-Sućurac measurement stations. The study included the days when the coastal circulation was undisturbed. In all isolated days, the mean sea level pressure field was with low gradients. In particular, the frequency and wind speed on selected days have been explored. The sea breeze in Split has SW direction, and in Kaštel-Sućurac WSW and W direction. The concentrations of pollutants are compared to wind speeds. The most polluting substance is NO₂, most of it is in the evening and in the morning when the sea breeze has not yet developed the speed or its speed decreases by approaching the evening's sea breeze lull. As the sea breeze speed increases, the concentration of NO₂ decreases. As the sea breeze occurs, the concentration of floating particles increases due to wind turbulence within the city, and the possible release of sea aerosols and by-products of sea traffic. NO₂ reaches higher values in Split than in Kaštel-Sućurac. Floating particles are present in Kaštel-Sućurac than in Split. The values of all pollutants are below the limit values for human health.

KEY WORDS: sea breeze, coastal air circulation, air pollution, floating particles

UVOD I DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Obalna cirkulacija zraka uzrokovana je lokalnim diferenciranim zagrijavanjem i hlađenjem kopna i mora na relativno malom području. Ona je dnevno-periodični sustav vjetrova obalnog područja koji čine kopnenjak i zmorac. Za njihove smjene temperature zraka nad morem i kopnom se izjednačuju (TROŠIĆ, 2002.; TROŠIĆ I DR., 2006.). Zmorac puše danju u donjoj grani obalne cirkulacije, a usmjeren je s mora prema kopnu. Njegov utjecaj duž istočne obale Jadrana uvelike ovisi o lokalnoj topografiji (FILIPČIĆ, 1994.; PERICA, OREŠIĆ, 1997.; FILIPČIĆ, 1999.). Zmorac na istočnoj obali Jadrana počinje puhati između 9 i 11 h, a do maksimuma se razvije oko 14 h jer su tada temperaturne razlike između kopna i mora najveće, odnosno nagnutost izobarnih ploha je najveća (ŠEGOTA, 1976.; ŠEGOTA, FILIPČIĆ, 1996.). Obalna cirkulacija pritom doseže visinu od 500 do 800 m (BRITVIĆ, 1990.; MARIĆ, 1998.). Obalna cirkulacija je u umjerenim širinama najčešća u toplijem dijelu godine. Na sinoptičkoj ljestvici zmorac karakterizira polje malo povišenog tlaka zraka, te se zmorac javlja za stabilna i vedra vremena (PANDŽIĆ, LIKSO, 2005.). Tada je česta i etezija koju valja razlikovati od lokalne obalne cirkulacije. Ovisno o pružanju obale i otoka, etezija može pojačavati, odnosno slabiti zmorac (LUKŠIĆ, 1995.; BENCETIĆ KLAJIĆ I DR., 2009.). Na razvoj zmorca mogu utjecati mnogobrojni čimbenici, npr. sinoptički uvjeti i položaj obale (ESTOQUE, 1962.; PIELKE, 1974.; ARRITT, 1989.; ARRITT, 1993.; GRISOGONO I DR., 1998.). Na to upućuju klimatološke studije i studije utjecaja lokalne topografije (PENZAR, 1977.; ORLIĆ I DR., 1988.; LUKŠIĆ, 1989.; LUKŠIĆ, 1995.; PENZAR I DR., 1996.; LUKŠIĆ, 2000. – 2001.) na hrvatskoj obali Jadrana.

Poznavanje obalne cirkulacije zraka ima višestruku važnost. Važno je u organiziranoj zaštiti od požara, jedriličarstvu, ribarstvu i sl. Važnu sastavnicu bioklime čini osjet toplinske ugone koji ovisi o vjetru, vlažnosti zraka itd. (PENZAR I DR., 1996.). Povoljne bioklimatske prilike za vrijeme zmorca važne su za život u obalnom području i privlačne turistima jer zmorac ublažava ljetne vrućine.

Praćenje zmorca napose je važno u zaštiti okoliša od onečišćenja zraka. Istraživanja prijenosa onečišćujućih tvari pokazuju da one ulaze u obalnu cirkulaciju zraka te nakon toga cirkuliraju unutar stanice obalne cirkulacije (LYONS, OLSSON, 1973.; KEEN, LYONS, 1978.; SIMPSON, 1994.; OKE, 1987.). Za rasprostiranje onečišćivača unutar zmorca važni su topografija obalnog područja, oblik obale, položaj industrijskih postrojenja i dr. (PIELKE I DR., 1983.; GROSSI I DR., 2000.). Veliki izvor onečišćenja zraka je promet, odnosno emisije ispušnih

plinova iz motornih vozila, što je osobito problem u velikim gradovima. Nekada su to bili Atena i Los Angeles (SIMPSON, 1994.), a danas prednjače azijski gradovi.

Onečišćujuće tvari šire se nošene zračnim strujanjima. Onečišćenje zraka može biti u obliku plina, pare ili aerosola raznolikoga kemijskog sastava te se može i kemijski mijenjati zbog fotokemijskih ili katalitičkih reakcija (PENZAR I DR., 1996.). Dušični i sumporni oksidi su ključne komponente iz kojih različitim kemijskim pretvorbama u atmosferi nastaju brojni spojevi koji imaju nepoželjan učinak na ekosustav. Istraživanja prijenosa onečišćenja pokazala su da su u gradovima najveća onečišćenja pri slabom vjetru ili tišini, više u zavjetrini nego u privjetrini, te da im pogoduje slaba mehanička turbulencija i termička inverzija (ŠEGOTA, 1976.). Do tog zaključka dolazi i I. Bešlić i dr. (2004.) za koncentracije frakcija lebdećih čestica PM10 i PM2.5 u rezidencijalnom dijelu grada Zagreba. T. Trošić Lesar i A. Filipčić (2017.) primjerice uspješno predviđaju dnevnu promjenu koncentracija PM10 pomoću modela višestruke linearne regresije za slučajeve zmorca u Splitu i Kaštel Sućurcu.

Osim onečišćenja tijekom dana, veliki problem je promjena smjera cirkulacije u večernjim satima, kada se jako onečišćen zrak kopnenjakom ponovno vraća prema području s kojeg je potekao (SIMPSON, 1994.). A. Clappier i dr. (2000.) pokazuju da je onečišćenost u Ateni bila i mnogo veća nego u Los Angelesu zbog položaja industrijskih postrojenja na širem području i orografije. M. G. Evtyugina (2006.) istražujući zmorac uz obalu Portugala zaključuju da područja u unutrašnjosti pokazuju i veće razine onečišćenja nego u gusto naseljenim industrijaliziranim područjima gradova i naselja blizu obale, zbog prijenosa onečišćujućih tvari tijekom dana. K. Bouchlaghem i dr. (2007.) mjere koncentracije SO₂ na obali Tunisa. Rezultati pokazuju da se SO₂ advektira sa zmorcem te da se maksimumi koncentracije SO₂ podudaraju s vremenom početka puhanja zmorca.

Zbog razvedenosti hrvatske obale istraživanja obalne cirkulacije su vrlo bitna. Posebno se to odnosi na one dijelove obale na kojima se nalaze potencijalni izvori onečišćenja. Upravo je takvo splitsko područje, pa je ono predmet istraživanja ovog rada. Splitsko gradsko područje ima istaknute reljefne međe: priobalnu regiju od Zagore poput zida dijeli niz planina: Rilić, Biokovo, Mosor, Kozjak, Boraja i Trtar. Split je smješten u srednjoj Dalmaciji na Splitskom (Marjanskom) poluotoku (Sl. 1.). Uže područje grada sa Solinom može se podijeliti na Splitski poluotok definiran niskim hrptom Marjana (175 m), Splitsko-kliško pobrđe (brežuljkasto područje) oblikovano u flišu i područje Kaštelanskog zaljeva (45 m dubine). Splitska regija ekonomski se desetljećima oslanjala na industriju, promet, brodogradnju, turizam i poljoprivredu. Kaštela su poznata po industrijskoj zoni s najvećim potencijalnim izvorima

onečišćujućih tvari. Koncentracije tih tvari nisu do sada bile analizirane ovisno o lokalnoj cirkulaciji zraka.

PODACI I METODE ISTRAŽIVANJA

U radu će se analizirati podaci o koncentracijama onečišćujućih tvari za odabrane slučajeve zmorca na području gradova Splita i Kaštela. To će omogućiti bolji uvid u dnevni prijenos onečišćujućih tvari na tom području. Istražit će se utjecaj obalne cirkulacije na odabranim postajama te utjecaj na koncentracije onečišćivača u Kaštelanskom zaljevu. To do sada nije bilo predmet istraživanja, a zbog blizine industrije može imati utjecaj na onečišćenje zraka i u široj okolici.

Za proučavanje koncentracija onečišćujućih tvari za vrijeme puhanja zmorca bili su raspoloživi podaci postaje Split-centar u Splitu i postaje Kaštel Sućurac u Gradu Kaštela. Prva namjena postaje Split-centar je praćenje razina onečišćenja koje je posljedica prometa, ali i industrije. U bližoj okolici nalaze se obiteljske kuće i manji industrijski pogoni. Temperatura zraka, brzina i smjer vjetra uzeti su za Split-centar s postaje Split-Marjan, a za postaju u Kaštel Sućurcu sa same postaje gdje se i mjere razine onečišćenja. Senzor za mjerenje brzine vjetra postavljen je na visini 10 m od tla.



Slika 1. Položaj postaja za mjerenje onečišćujućih tvari Kaštel Sućurac i Split-centar, te položaj meteorološke postaje Split-Marjan (kartografska obrada: I. Rendulić)

Podaci o koncentraciji onečišćujućih tvari, pogotovo u blizini industrijskih lokacija, vrlo su oskudni i često nedostupni. U ovom radu analizirani su podaci za razdoblje od 2007. do 2009. godine. Iako to razdoblje nije dugo u klimatološkom smislu i ne odnosi se na recentne godine, dovoljno je primjereno da se uoči opća zakonitost. Raspoloživa mjerenja onečišćujućih tvari bila su satna mjerenja koncentracije: NO_2 , SO_2 i lebdećih čestica PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$. Dušični monoksid (dušik(II)-oksid, NO) je plin bez boje i mirisa koji nastaje tijekom izgaranja goriva pri visokim temperaturama. Nakon što se pomiješa sa zrakom brzo reagira s kisikom stvarajući dušikov dioksid NO_2 . Dušikov dioksid se raspada apsorpcijom sunčeve svjetlosti na molekulu NO , a atom kisika reagira s kisikom te daje molekulu ozona. Cijela reakcija se ponavlja dok ima sunčeve svjetlosti. Kao posljedica nastaje fotokemijski smog te se povećava koncentracija ozona u najnižem sloju atmosfere. Koncentracija dušikovog dioksida i dušikovog monoksida u zraku određuje se kemiluminiscencijskom metodom HRN EN 14211:2005. Metoda kemiluminiscencije temelji se na reakciji ozona i dušičnog oksida koji tada oksidira u NO_2 . Na postajama Split-centar i Kaštel Sućurac koristi se analizator ML 9841B s velikom preciznošću mjerenja preko velikoga temperaturnog raspona uz točnost instrumenta od 0,5 ppb.

Sumporni dioksid nastaje spaljivanjem fosilnih goriva (ugljena i nafte) i topljenjem mineralnih sirovina koje sadrže sumpor, u industrijskim procesima i zbog cestovnog prometa. Erupcije vulkana najveći su prirodni izvor sumpornog dioksida. Posljedica prisutnosti sumpornih oksida u atmosferi su kisele kiše, odnosno pojava sulfatne (sumporne) kiseline. Ona utječe na dišni sustav te može izazivati iritaciju očiju, a pogoršava bolesti poput astme i bronhitisa (PENZAR I DR., 1996.). Mjerenje sumpornog dioksida provodi se metodom UV fluorescencije pomoću instrumenta ML9850B koji je pouzdan preko velikoga temperaturnog raspona uz točnost instrumenta od 0,5 ppb.

Pojam „lebdeće čestice“ odnosi se na čestice PM10 i PM2.5 (PM je kratica za *particulate matter*). PM10 označava čestice promjera 10 μm i manje, a PM2.5 čestice od 2,5 μm i manje. Primarne čestice (PM10) nastaju uglavnom izgaranjem goriva motornih vozila te izgaranjem u neindustrijskim ložištima, tj. malim ložištima u kućanstvima. Zbog svoje sposobnosti prodiranja u dišne putove utječu na zdravlje ljudi (BEŠLIĆ I DR., 2004.). Ulaskom u organizam dio čestica se zadržava u raznim dijelovima respiratornog sustava, gdje uzrokuju upalne promjene, smanjenu otpornost na infekcije i različite alergije. Dubina prodiranja i količina odloženih čestica ovisi o veličini čestica i načinu disanja. Sekundarne čestice (PM2.5) mogu utjecati na nastanak ozbiljnih plućnih i vaskularnih bolesti (PENZAR I DR., 1996.). Ukupne lebdeće čestice mjere se metodom visokovolumnog uzorkovanja pomoću analizatora Verewa F701, i to uz očitavanja svakih 15 min. Mjerenja se provode tako da se čestice uvlače preko filtera te se volumetrijskom metodom određuje njihov tok. Čestice se nakon toga zaustavljaju na filteru i radiometrijski mjere Beta-emiterom (C-14) i Geiger-Müller brojačem. Mjerenje se temelji na činjenici da beta zračenje slabi prolaskom kroz tvar.

Da bi istraživanje utjecaja zmorca na koncentraciju onečišćujućih tvari bilo relevantno, bilo je potrebno izdvojiti dane u kojima je obalna cirkulacija bila neporemećena. U takvim je danima u jutarnjim satima vidljiva promjena smjera vjetra od kopnenjaka prema zmorcu, nakon pojave jutarnjih zatišja. U večernjim satima, nakon pojave večernjih zatišja, smjer vjetra se mijenja od zmorca prema kopnenjaku. Pritom razlika u temperaturi zraka između jutarnjeg i večernjeg zatišja nije veća od 1 °C (TROŠIĆ, 2002.), a srednja dnevna naoblaka u klimatološkim terminima tijekom dana ne prelazi 4/10 (TELIŠMAN PRTENJAK, GRISOGONO, 2002.).

Pregledane su sinoptičke situacije u 12 h po UTC-u vidljive na kartama Njemačke meteorološke službe (Europäischer Wetterbericht, 2007. – 2009.). U svim izdvojenim danima polje tlaka je bilo bezgradijentno. Iznad južne Europe nije bilo zatvorenih baričkih sustava, a tlak je bio malo povišen, 1014-1020 hPa. Na visinskim kartama polje tlaka bilo je bezgradijentno sa slabim geostrofičkim vjetrom (do 10 m s^{-1}).

U razdoblju od 2007. do 2009. godine odabran je 41 takav dan u Splitu (Tab. 1.) i 58 takvih dana u Kaštel Sućurcu (Tab. 2.) kada su bila dostupna mjerenja svih onečišćujućih tvari. U Kaštel Sućurcu 2007. godine nisu bila dostupna mjerenja svih onečišćujućih tvari te je stoga broj odabranih dana u svim mjesecima jednak nuli.

Tablica 1. Broj dana s neporemećenom obalnom cirkulacijom u Splitu.

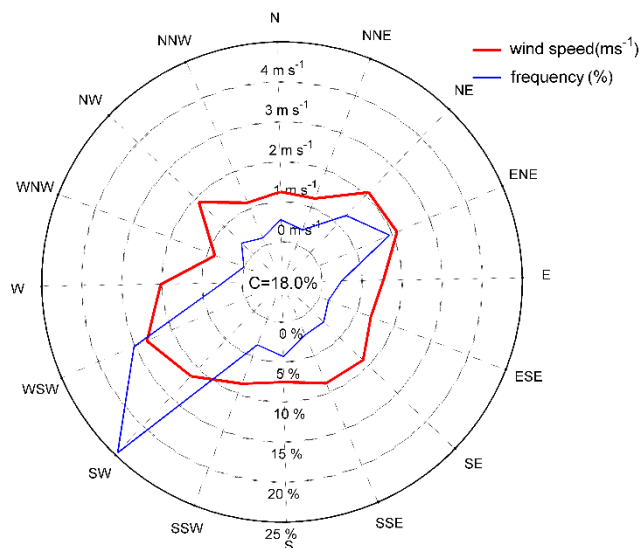
Godina	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Ukupno
Year	April	May	June	July	August	September	Total
2007.	7	0	2	5	2	1	17
2008.	0	3	3	5	0	0	11
2009.	0	4	2	3	2	2	13
Ukupno Total	7	7	9	13	4	3	41

Tablica 2. Broj dana s neporemećenom obalnom cirkulacijom u Kaštel Sućurcu.

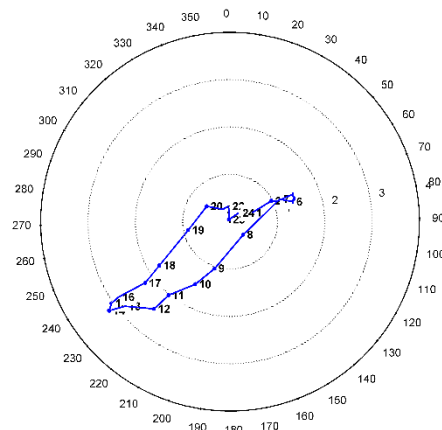
Godina	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Ukupno
Year	April	May	June	July	August	September	Total
2007.	0	0	0	0	0	0	0
2008.	0	5	3	1	0	1	10
2009.	1	11	6	9	11	10	48
Ukupno Total	1	16	9	10	11	11	58

Za odabrane dane istražena je čestina i brzina vjetra (Sl. 2. – 5.). Na postaji Split-Marjan zmorac ima SW smjer, a brzina mu je 2-3 ms⁻¹. U Kaštel Sućurcu zmorac dolazi iz smjera WSW i W, a dostiže brzinu od oko 2 ms⁻¹. Hodograf (Sl. 5.) ima oblik elipsoida, što je karakteristično za kanalizirano strujanje.

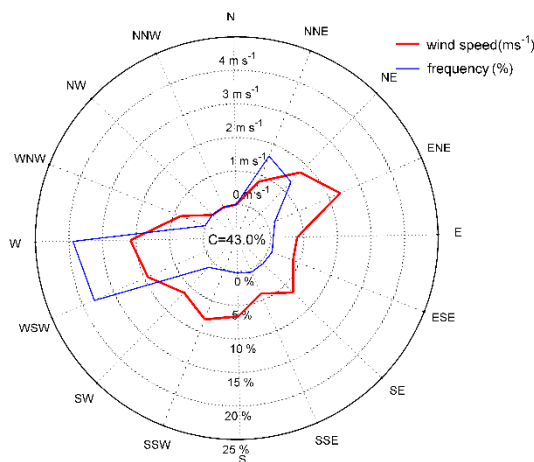
Smjer zmorca u Kaštel Sućurcu može se objasniti položajem postaje u Kaštelanskom zaljevu. Osim toga, na smjer zmorca moguć je i utjecaj obližnjih otoka. Naime, položaj i oblik zaljeva te njegov odnos prema položaju otoka i obale može znatno utjecati na razvoj zmorca (GRISOGONO I DR., 1998.).



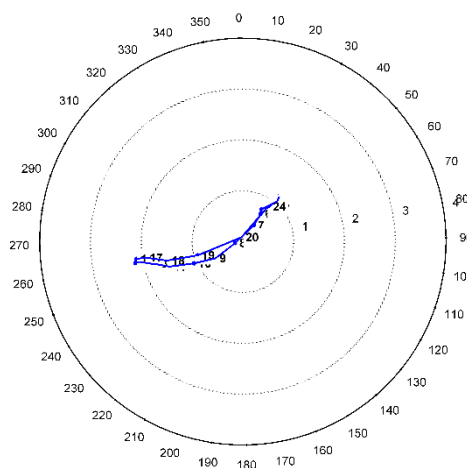
Slika 2. Ruža vjetrova za odabrane dane s neporemećenom obalnom cirkulacijom od 2007. do 2009. godine na postaji Split-Marjan (iz satnih vrijednosti mjerenja brzine i smjera vjetra)



Slika 3. Hodograf vjetra za odabrane dane s neporemećenom obalnom cirkulacijom od 2007. do 2009. godine na postaji Split-Marjan. Kružnicama su označene brzine vjetra ($1-4 \text{ m s}^{-1}$)



Slika 4. Ruža vjetrova za odabrane dane s neporemećenom obalnom cirkulacijom od 2007. do 2009. godine na postaji Kaštel Sućurac (iz satnih vrijednosti mjerenja brzine i smjera vjetra)

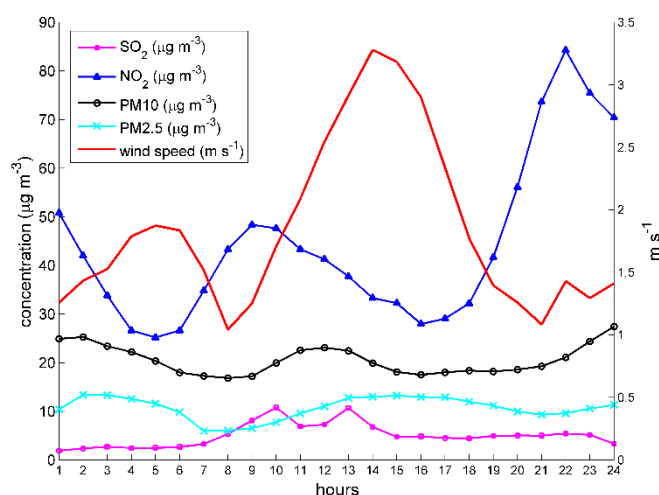


Slika 5. Hodograf vjetra za odabrane dane s neporemećenom obalnom cirkulacijom od 2007. do 2009. godine na postaji Kaštel Sućurac (iz satnih vrijednosti mjerenja brzine i smjera vjetra). Kružnicama su označene brzine vjetra ($1-4 \text{ m s}^{-1}$)

REZULTATI I RASPRAVA

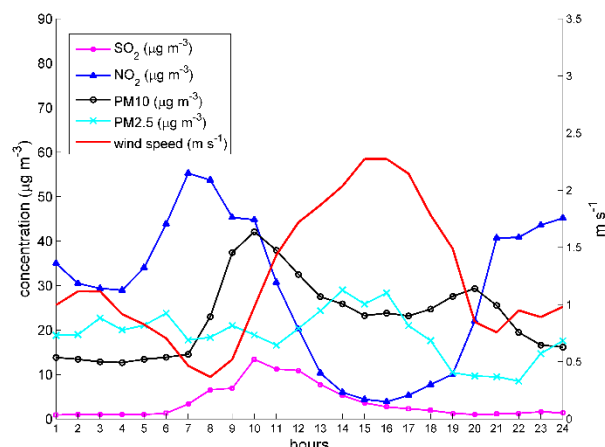
Podaci o brzini i čestini vjetra za vrijeme zmorca i podaci istodobnog mjerenja onečišćenja zraka omogućili su utvrđivanje međuovisnosti tih varijabli. Na postaji Split-centar (Sl. 6.) najprisutnija onečišćujuća tvar je NO_2 . U srednjem dnevnom hodu koncentracije, NO_2 ima najviše vrijednosti u večernjim i jutarnjim satima. To su razdoblja u kojima je brzina vjetra najmanja jer zmorac još nije razvio veću brzinu ili mu se ona smanjuje približavanjem večernjeg

zatišja. Visokim koncentracijama NO₂ pridonosi cestovni promet i položaj same postaje u odnosu na morfologiju grada. Što je brzina zmorca veća, koncentracija NO₂ je manja. To odgovara općem pravilu prema kojemu vjetar „razrjeđuje“ koncentraciju onečišćivača. Međutim, istodobno s jačanjem zmorca dolazi do povećane koncentracije lebdećih čestica. To znači da su te čestice jednim dijelom nošene zmorcem ili ih pak zmorac podiže s tla zbog turbulencije unutar gradske sredine. Istraživanje podrijetla lebdećih čestica u Rijeci (IVOŠEVIĆ I DR., 2016a, IVOŠEVIĆ I DR., 2016b) pokazalo je, među ostalim, zastupljenost morskog aerosola i produkata izgaranja pogonskog goriva u pomorskom prometu. Upravo takve čestice mogu biti nošene zmorcem na obalu. Srednje koncentracije onečišćujućih tvari u večernjim satima rastu zbog povratka onečišćenja i njegova zadržavanja u vrijeme večernjeg zatišja nakon puhanja zmorca. Jasno je vidljiva i povećana koncentracija NO₂ u vrijeme puhanja kopnenjaka, kada se onečišćeni zrak vraća na područje grada, otkud je potekao.



Slika 6. Srednje mjerene satne vrijednosti koncentracija dušičnog dioksida (NO₂), sumpornog dioksida (SO₂) i lebdećih čestica PM10 i PM2.5 u µg m⁻³ na postaji Split-centar, te brzine vjetra na postaji Split-Marjan u danima s neporemećenom obalnom cirkulacijom

Postaja u Kaštel Sućurcu smještena je u blizini Jadranske magistrale, što također utječe na koncentraciju NO₂ (Sl. 7.). Najveću koncentraciju NO₂ postiže za jutarnjeg zatišja. Već i mali porast brzine zmorca utječe na nižu koncentraciju NO₂, ali, kao i u Splitu, povećava koncentraciju lebdećih čestica. U razdobljima tišina između zmorca i kopnenjaka lebdećih je čestica znatno manje. Može se primijetiti da i kopnenjak tijekom noćnih sati smanjuje koncentracije onečišćujućih tvari, ali taj utjecaj nije toliko izražen kao u slučaju zmorca danju, jer su apsolutne emisije onečišćujućih tvari danju veće nego noću.



Slika 7. Srednje mjerene satne vrijednosti brzine vjetra i srednji dnevni hod koncentracija onečišćivača dušičnog dioksida (NO_2), sumpornog dioksida (SO_2) i lebdećih čestica PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ u $\mu\text{g m}^{-3}$ na postaji Kaštel Sućurac u danima s neporemećenom obalnom cirkulacijom

Maksimalna dnevna vrijednost koncentracije NO_2 na postaji Split-centar iznosi $150,93 \mu\text{g m}^{-3}$, a u Kaštel Sućurcu je nešto manja, $109,95 \mu\text{g m}^{-3}$, što je ispod zakonom propisane granične vrijednosti za zdravlje ljudi koja iznosi $200 \mu\text{g m}^{-3}$. Maksimalna srednja dnevna vrijednost je također ispod granične srednje dnevne vrijednosti za zdravlje ljudi ($80 \mu\text{g m}^{-3}$).

Tablica 3. Granične vrijednosti (URL 1), 24-h srednjaci te maksimalne dnevne vrijednosti onečišćujućih tvari za vrijeme puhanja zmorca (NO_2 , SO_2 , PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$) na postajama Split-centar i Kaštel Sućurac u odabranim danima s neporemećenom obalnom cirkulacijom od 2007. do 2009. godine.

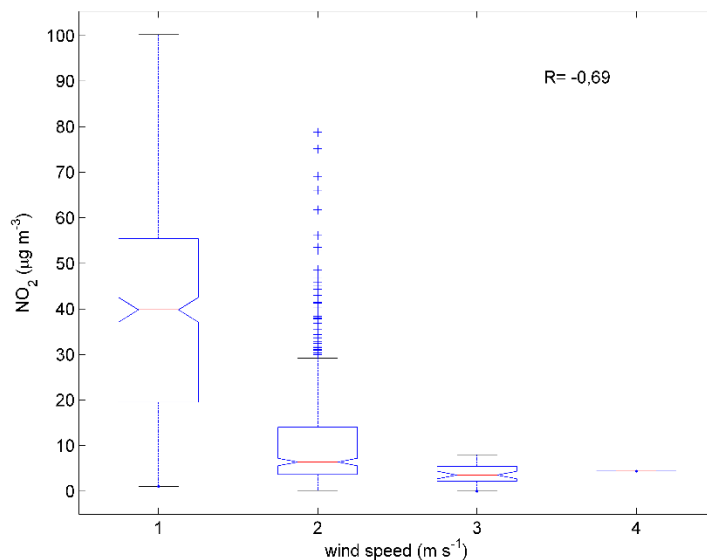
		NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	SO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Granična vrijednost za 24-h srednjak		200	125	50	-
Borderline value for 24-h mean					
Granična vrijednost za 24-h maksimum		80	350	-	-
Borderline value for 24-h maximum					
Split-centar		NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	SO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)
2007. – 2009.	24-h srednjak	66,40	20,11	40,96	108,85
	24-h mean				
	24-h maksimum				
	24-h maximum				
Kaštel Sućurac		NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	SO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)
2007. – 2009.	24-h srednjak	62,84	12,49	38,93	189,79
	24-h mean				

	24-h maksimum	109,95	73,79	139,29	501,23
	24-h maximum				

Koncentracije PM10 su malo ispod propisane granične vrijednosti za zdravlje ljudi koja za 24-h srednjak iznosi $50 \mu\text{g m}^{-3}$, a u Splitu je npr. određen maksimalni dnevni srednjak u vrijednosti od $40,96 \mu\text{g m}^{-3}$, što je gotovo i granična vrijednost, dok je u Kaštel Sućurcu manji i iznosi $38,93 \mu\text{g m}^{-3}$. Mogući razlog za to je veće zadržavanje čestica PM10 na području grada, zbog položaja orografije u zaleđu Splita, kao i moguć djelomičan prijenos s područja Kaštela kada čestice s područja Kaštela uđu u obalnu cirkulaciju prema gradu, gdje su zabilježene i maksimalne dnevne vrijednosti.

Srednje dnevne vrijednosti koncentracija SO₂ dostizale su $20,11 \mu\text{g m}^{-3}$ u Splitu i $12,49 \mu\text{g m}^{-3}$ u Kaštel Sućurcu što je daleko ispod propisane granične vrijednosti za zdravlje ljudi koja iznosi $125 \mu\text{g m}^{-3}$. Maksimalna dnevna vrijednost koncentracije SO₂ u Splitu i Kaštel Sućurcu također je daleko ispod propisane granične vrijednosti za zdravlje ljudi ($350 \mu\text{g m}^{-3}$). U Splitu je zabilježena maksimalna dnevna vrijednost SO₂ od $198,08 \mu\text{g m}^{-3}$, a u Kaštel Sućurcu $73,79 \mu\text{g m}^{-3}$. Za čestice PM2.5 nema propisanih graničnih srednjih dnevnih i maksimalnih vrijednosti, pa navedene vrijednosti nisu usporedive. Od svih analiziranih onečišćivača jedino je NO₂ uz relativno visoku koncentraciju pokazao i statističku signifikantnost. Stoga je zasebno prikazana korelacija koncentracije NO₂ i brzine vjetra (Sl. 8.) na primjeru Kaštel Sućurca.

Studentovim t-testom utvrđena je značajnost korelacije ($R = -0,69$) toga onečišćivača s brzinom vjetra na razini signifikantnosti $\alpha = 0,01$. Maksimalne koncentracije dušikovog dioksida zabilježene su pri većim brzinama vjetra. Opadanje je sporije za brzine do $1,5 \text{ m s}^{-1}$, a nakon toga se naglo povećava. Razlog tome je što pri većim brzinama dolazi do učinkovitijeg provjetravanja.



Slika 8. Box plot, koncentracija NO_2 – brzina vjetra. Veličine na osi x podijeljene su na skupine. Gornja i donja stranica pravokutnika prikazuju 75%-tni i 25%-tni percentil, a unutar pravokutnika crvenom linijom 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 ispod manje od $M - 1,5 IR$.

Istraživanja prijenosa onečišćujućih tvari u gradovima pokazala su da su najveća onečišćenja pri slabom vjetru ili tišini, više u zavjetrini nego u privjetrini, te da im pogoduje inverzija i slaba mehanička turbulencija (ŠEGOTA, 1976.). To se slaže s istraživanjem slučajeva zmorca u Kaštel Sućurcu, gdje su najveće koncentracije NO_2 dobivene pri najnižim brzinama zmorca uz relativno visoki koeficijent korelacije od -0,69.

ZAKLJUČAK

Obalna cirkulacija zraka uzrokovana je lokalnim diferenciranim zagrijavanjem, odnosno hlađenjem kopna i mora na relativno uskom području. Površinska temperatura mora značajno utječe na protok topline između atmosfere i mora te na svojstva i gibanje zraka. Kako bi se iz analize isključile situacije s nepovoljnim atmosferskim utjecajem na razvoj zmorca, iz seta raspoloživih mjerenja izdvojeni su dani s neporemećenom obalnom cirkulacijom zraka. Za proučavanje koncentracije onečišćujućih tvari za vrijeme puhanja zmorca bili su raspoloživi podaci s postaje Split-centar u Splitu i s postaje Kaštel Sućurac u Gradu Kaštela. Mjerenja su obuhvaćala koncentracije SO_2 , NO_2 te lebdećih čestica PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$.

Zmorac u Kaštel Sućurcu je WSW i W smjera, dok je u Splitu SW smjera. Analiza ovisnosti NO₂ o brzini zmorca upućuje na smanjenje njegove koncentracije s povećanjem brzine vjetra. Međutim, koncentracije PM₁₀ i PM_{2.5} povećavaju se s razvojem zmorca. Tome vjerojatno pridonosi turbulencija vjetra unutar grada kao i prijenos morskog aerosola i produkata izgaranja u pomorskom prometu. Onečišćujuće tvari iz Splita i područja Kaštela nošene zorcem, zbog orografskih karakteristika zaleda nemaju mogućnosti prijenosa dalje u unutrašnjost.

Koncentracije NO₂ veće su u Splitu nego u Kaštel Sućurcu. Kako zmorac tijekom dana prodire sve dublje nad kopno, tako se širi i područje onečišćenja. Koncentracije lebdećih čestica PM₁₀ i PM_{2.5} bile su značajno veće u Kaštel Sućurcu nego u Splitu, što je posljedica industrijskog onečišćenja, no ispod propisanih 24 h graničnih i tolerantnih vrijednosti za zdravlje ljudi. Rezultati upućuju na veliku važnost istraživanja obalne cirkulacije te potrebu većeg broja mjernih postaja i mjerenja koncentracije onečišćujućih tvari, osobito u gradovima i u blizini industrijskih postrojenja.

ZAHVALA

Autori zahvaljuju Hrvatskoj agenciji za zaštitu okoliša za meteorološka mjerenja i mjerenja koncentracija onečišćujućih tvari koji su analizirani u ovom radu, te Cemex Hrvatska d.o.o. za informacije o mjerenjima.

LITERATURA I IZVORI /

BIBLIOGRAPHY AND SOURCES

ARRIT, R. W. (1989): Numerical Modelling of the Offshore Extent of Sea-Breezes, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115, 547-70, DOI: 10.1002/qj.49711548707

ARRIT, R. W. (1993): Effects of the Large-Scale Flow of Characteristic Features of the Sea-Breeze, *Journal of Applied Meteorology*, 32, 116-125, DOI: 10.1175/1520-0450(1993)032<0116:EOTLSF>2.0.CO;2

BENCETIĆ KLAJIĆ, Z., PASARIĆ, Z., TUDOR, M. (2009): On the interplay between sea-land breezes and Etesian winds over the Adriatic. *Journal of Marine Systems*, 78, 101-118, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2009.01.016

Europäischer Wetterbericht (European Meteorological Bulletin) 1998-2010, Deutcher Wetterdiennst, Offenbach.

BEŠLIĆ, I., ŠEGA, K., BENCETIĆ KLAJIĆ, Z. (2004): Utjecaj tipova vremena na koncentracije lebdećih čestica, *Gospodarstvo i okoliš*, 12, 587-589.

BOUCLAGHEM, K., MANSOUR, F. B., ELOURAGINI, S. (2007): Impact of a sea breeze event on air pollution at the Eastern Tunisian Coast, *Atmospheric Research*, 86, 162-172, DOI: 10.1016/j.atmosres.2007.03.010

BRITVIĆ, S. (1990): *Visina internog graničnog sloja obalnog područja sjevernog Jadrana*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb.

CLAPPIER, A., MARTILLI, A., GROSSI P., THUNIS, P., PASI, F., KRUEGER, B. C., CALPINI, B., GRAZIANI, G., VAN DEN BERGH, H. (2000): Effect of sea breeze on air pollution in the Greater Athens Area. Part I: Numerical simulations and field observations, *Journal of Applied Meteorology*, 39, 546-562, DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<0546:EOSBOA>2.0.CO;2

ESTOQUE, M. A. (1962): The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation, *Journal of the Atmospheric Sciences* 19, 244-250, DOI: 10.1175/1520-0469(1962)019<0244:TSBAAF>2.0.CO;2

EVTYUGINA M. G., NUNES, T., PIO, C., COSTA, S. (2006): Photochemical pollution under sea breeze conditions, during summer, at the Portuguese West Coast, *Atmospheric Environment*, 40, 6277-6293, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.05.046

FILIPČIĆ, A. (1994): Anomalija temperature zraka u Hrvatskoj, *Acta Geographica Croatica*, 29, 45-56.

FILIPČIĆ, A. (1999): Razgraničenje Köpenovih klimatskih tipova Cf i Cs u Hrvatskoj. Prilog geografskoj regionalizaciji Hrvatske, *Acta Geographica Croatica*, 35 (1), 7-17.

GRISOGONO, B., STRÖM, L., TJERNSTRÖM, M. (1998): Small scale variability in the coastal atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 88, 23-46, DOI: 10.1023/A:1000933822432

GROSSI P., THUNIS, P., MARTILLI, A., CLAPPIER, A. (2000): Effect of Sea Breeze on Air Pollution in the Greater Athens Area. Part II: Analysis of Different Emission Scenarios, *Journal of Applied Meteorology*, 39, 563-575, DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<0563:EOSBOA>2.0.CO;2

IVOŠEVIĆ, T., STELCER, E., ORLIĆ, I., BOGDANOVIĆ, RADOVIĆ, I., COHEN, D. (2016a): Characterization and source apportionment of fine particulate sources at Rijeka, Croatia from

2013 to 2015. *Nuclear instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 371, 376-380, DOI: 10.1016/j.nimb.2015.10.023

IVOŠEVIĆ, T., ORLIĆ, I., ČARGONJA, M. (2016b): Fine Particulate Matter from Ship Emissions in the Port of Rijeka, Croatia. *Pomorski zbornik, Journal of Maritime and Transportation Science, Posebno izdanje*, 1, 201-212.

KEEN, C. S., LYONS, W. A. (1978): Land/lake breeze circulations on the western shore of Lake Michigan, *Journal of Applied Meteorology*, 17, 1843-1855, DOI: 10.1175/1520-0450(1978)017<1843:LBCOTW>2.0.CO;2

LUKŠIĆ, I. (1989): Dnevni periodički vjetrovi u Senju, *Geofizika*, 6, 59-74.

LUKŠIĆ, I. (1995): Zmorac i kopnenjak u Govedarima na otoku Mljetu, *Hrvatski meteorološki časopis*, 30, 39-53.

LUKŠIĆ, I. (2000-2001): Zmorac i zdolac u Splitu, *Hrvatski meteorološki časopis*, 35-36, 11-36.

LYONS, W. A., OLSSON, L. E. (1973): Detailed Mesometeorological Studies of Air Pollution Dispersion in the Chicago Lake Breeze, *Monthly Weather Review*, 101, 387-403, DOI: 10.1175/1520-0493(1973)101<0387:DMSOAP>2.3.CO;2

MARIĆ, T. (1998): *Dinamička klimatologija zmorca u području Šibenika za ljetne mjesece*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb.

OKE, T. R. (1987): *Boundary layer climates*, Routledge, Methuen, New York, pp. 464.

ORLIĆ, M., PENZAR, B., PENZAR, I. (1988): Adriatic Sea and Land Breezes: Clockwise Versus Anticlockwise Rotation, *Journal of Applied Meteorology*, 27, 675-679, DOI: 10.1175/1520-0450(1988)027<0675:ASALBC>2.0.CO;2

PANDŽIĆ, K., LIKSO, T. (2005): Eastern Adriatic typical wind field patterns and large-scale atmospheric conditions, *International Journal of Climatology*, 25, 81-98, DOI: doi.org/10.1002/joc.1085

PENZAR, B. (1977): *Vjetar. Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ*, svezak 2, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 41-117.

PENZAR, B. I SURADNICI (1996): *Meteorologija za korisnike*, Školska knjiga, Hrvatsko meteorološko društvo, Zagreb, pp. 274.

PERICA, D., OREŠIĆ, D. (1997): Prilog poznavanju klimatskih obilježja Velebita, *Acta Geographica Croatica*, 32, 45-68.

PIELKE, R. A. (1974): A Three-Dimensional Numerical Model of the Sea Breezes over South Florida, *Monthly Weather Review*, 102, 115-139, DOI: 10.1175/1520-0493(1974)102<0115:ATDNMO>2.0.CO;2

PIELKE, R. A., MCNIDER, R. T., SEGAL, M., MAHRER, Y. (1983): The Use of a Mesoscale Numerical Model for Evaluations of Pollutant Transport and Diffusion in Coastal Regions and over Irregular Terrain, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 243-249, DOI: 10.1175/1520-0477(1983)064<0243:TUOAMN>2.0.CO;2

SIMPSON, J. E. (1994): *Sea breeze and local winds*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 234.

ŠEGOTA, T. (1976): *Klimatologija za geografe*, Školska knjiga, Zagreb, pp. 481.

ŠEGOTA, T., FILIPČIĆ, A. (1996): *Klimatologija za geografe*, Školska knjiga, Zagreb, pp. 471.

TELIŠMAN PRTENJAK, M., GRISOGONO, B. (2002): Idealised numerical simulations of diurnal sea breeze characteristics over a step change in roughness. *Meteorologische Zeitschrift*, 11, 345-360, DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0345

TROŠIĆ, T. (2002): Klimatske karakteristike donje grane obalne cirkulacije duž istočne obale Jadrana, *Hrvatski meteorološki časopis*, 37, 27-36.

TROŠIĆ, T., ŠINIK, N., TROŠIĆ, Ž. (2006): Available potential energy of the daily coastal circulation at Zadar (Croatia), *Meteorology and Atmospheric Physics*, 93, 211-220, DOI: 0.1007/s00703-005-0179-y

TROŠIĆ LESAR, T., FILIPČIĆ, A. (2017): Multiple Linear Regression (MLR) model simulation of hourly PM10 concentrations during sea breeze events in the Split area, *Naše more*, 64, 77-85, DOI: <https://doi.org/10.17818/NM/2017/3.1>

URL 1, *Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku*, Narodne novine 133/05, <http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/289989.html> (5. listopada 2015.)