

Obilježja atmosfere tijekom transporta saharskog pijeska nad Jadranom

Mifka, Boris

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:721241>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-09**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Boris Mifka

**OBILJEŽJA ATMOSFERE TIJEKOM
TRANSPORTA SAHARSKOG PIJESKA
NAD JADRANOM**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Boris Mifka

**OBILJEŽJA ATMOSFERE TIJEKOM
TRANSPORTA SAHARSKOG PIJESKA
NAD JADRANOM**

DOKTORSKI RAD

Mentori: izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak
doc. dr. sc. Darko Mekterović

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Boris Mifka

**CHARACTERISTICS OF THE
ATMOSPHERE DURING SAHARAN DUST
TRANSPORT OVER THE ADRIATIC**

DOCTORAL THESIS

Supervisors: Assoc. Prof. Dr. Maja Telišman Prtenjak
Asst. Prof. Dr. Darko Mekterović

Zagreb, 2023.

Ova je doktorska disertacija izrađena na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Fakultetu za Fiziku Sveučilišta u Rijeci, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak i doc. dr. sc. Darka Mekterovića, u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog doktorskog studija Fizike, smjer Geofizika, pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Informacije o mentorima:

Maja Telišman Prtenjak diplomirala je na PMF-u u Zagrebu (1995.), magistrirala je 2001., i doktorirala 2006. godine na Sveučilištu u Zagrebu. Od 1996. godine radi pri Geofizičkom odsjeku PMF-u Sveučilišta u Zagrebu, trenutno u zvanju izvanredne profesorice i znanstvene savjetnice. Dobitnica je Nagrade za znanstvenu izvrsnost MZOŠ-a 2009. Usavršavala se u inozemstvu i sudjelovala na nizu međunarodnih konferencija/radionica. Maja Telišman Prtenjak je ili je bila članica triju uredničkih odbora časopisa (Geofizika, Meteorology and Atmospheric Physics i Hrvatski meteorološki časopis) te je bila članica desetak organizacijskih/znanstvenih odbora međunarodnih znanstvenih i znanstveno-stručnih skupova i radionica. Sudjelovala je u radu više znanstvenih i stručnih međunarodnih i domaćih projekata, kao suradnik (njih 11) i kao voditelj (njih 6). Do sada je koautorica u više od 40 znanstvenih radova i oko 130 konferencijskih priopćenja u suradnji s domaćim i inozemnim suradnicima. Recenzirala je više međunarodnih i domaćih projekata i oko 60 radova za više renomiranih međunarodnih i domaćih časopisa. Do sada je bila mentor u 22 diplomskih rada i 4 doktorata. Fokus rada je na mezoskalnim meteorološkim fenomenima (s posebnim osvrtom na opasne vremenske prilike kao što su tuča, munje, mraz, jak vjetar, šumski požari itd.) nad kompleksnom topografijom u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima koristeći i mjerenja te mezoskalne numeričke (prognostičke i klimatske) modele.

Darko Mekterović diplomirao je fiziku na PMF-u u Zagrebu 2001. Od 2002. je zaposlen na Institutu Ruđer Bošković gdje izrađuje doktorat iz eksperimentalne fizike elementarnih čestica. Doktorirao je 2009. na Sveučilištu u Zagrebu. Od 2009. do 2012. je na poslijedoktorskom usavršavanju na *National Central University* s Tajvana pri čemu trajno boravi na CERN-u i sudjeluje u radu CMS kolaboracije. Od 2012. do 2014. ponovno je na Institutu Ruđer Bošković zaposlen kao savjetnik na FP7 projektu "Particle detectors". Od 2015. je zaposlen kao docent na Fakultetu za fiziku Sveučilišta u Rijeci. Prelaskom u Rijeku prelazi i u novo područje istraživanja. To su lebdeće čestice, njihove koncentracije i elementni sastav te procjene izvora onečišćenja i potencijalnih štetnih utjecaja na ljudsko zdravlje.

ZAHVALA

Ponajprije se zahvaljujem prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak koja je strpljivo vodila ovo istraživanje i izradu disertacije. Zahvaljujem se i komentoru doc. dr. sc. Darku Mekteroviću na suvoditeljstvu i korisnim savjetima. Značajan doprinos ovom multidisciplinarnom istraživanju ostvaren je kroz suradnju s prof. dr. sc. Irenom Ciglenečki i njenim suradnicima s instituta Ruđer Bošković. Zahvaljujem doc. dr. sc. Ivni Kavre na analizi uzoraka elektronskim mikroskopom i suradnji na ovom istraživanju. Prof. dr. sc. Ani Alebić-Juretić zahvaljujem se na dugogodišnjoj suradnji u znanosti. Profesorima Geofizičkog odsjeka zahvaljujem na znanju prenesom kroz brojne kolegije. Spomenuo bih i znanstvenike instituta NCAR koji su doprinijeli mom znanju o modelu WRF-Chem. Zahvaljujem se i kolegama koji održavaju superračunalo Bura na kojem sam izradio simulacije. Marku Humu hvala na svesrdnoj administrativnoj podršci tijekom studija.

Istraživanje je provedeno u suradnji s HRZZ projektom "Rogozničko morsko jezero kao model odziva ekosustava na promjene u okolišu" (IP-2018-01-1717, MARRES) (voditeljica dr. sc. Irena Ciglenečki-Jušić). Zahvaljujemo Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilištu u Rijeci, projekt uniri-prirod-18-23 na financijskoj potpori.

Podaci MERRA-2 i TRMM preuzeti su od NASA-ine Službe za podatke i informacije o modeliranju i asimilaciji (MDISC, <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>). Podaci o topografiji za klimatološki dio istraživanja (GEBCO) preuzeti su sa stranice: <https://www.gebco.net/>. Zahvaljujem Françoisu Dulacu i Rafaelu Moralesu Baqueru na pomoći pri dobivanju podataka mjerenja taloženja prašine iz mreže CARAGA (<https://mistrals.sedoo.fr>). Putanje modela HYSPLIT preuzete su od NOAA-e, pomoću sustava READY (<https://www.ready.noaa.gov>). Zahvaljujemo se timu iz Virtualnog centra za klimatske promjene jugoistočne Europe (SEEVCCC) za dostupnost mineraloške baze podataka. Granični uvjeti za model WRF-Chem dobiveni su iz ECMWF skupova podataka na <https://www.ecmwf.int/>. Podaci mjerenja AOD-a s mreže AERONET preuzeta su s <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>. Uzorkovanje i kemijsku analizu PM₁₀ proveo je Nastavni zavod za javno zdravstvo Rijeka, dok je SEM analiza obavljena na Fakultetu za fiziku, Sveučilište u Rijeci. Program za kutijaste dijagrame koji je ovdje korišten napravio je Alex Bikfalvi (<http://alex.bikfalvi.com/>).

Zahvaljujem se na podršci svojim roditeljima, te Josipi i Karlu.

U Rijeci, srpanj 2023.

SAŽETAK

Mineralna prašina, kao jedan od najrasprostranjenijih tipova aerosola iznimno je važan čimbenik u procjenama klimatskih promjena. Ona utječe na atmosfersko zračenje, formiranje oblaka, a prilikom taloženja prenosi mikronutrijente kako kopnenim tako i oceanskim ekosustavima. Saharska pustinja jedan je od glavnih globalnih izvora prašine koja putem atmosferskog transporta ima utjecaj na Sredozemlje, uključujući i Jadran. Atmosfersko taloženje mineralne prašine igra važnu ulogu u opskrbi mora hranjivim tvarima. U ovom istraživanju po prvi put izrađena je klimatološka analiza taloženja prašine na području Jadranskog mora na temelju podataka reanalize MERRA-2 za razdoblje 1989–2019. Ustanovljeno je da godišnji hod ima bimodalnu strukturu s jačim maksimumom u proljeće i slabijim u jesen pri čemu se pokazalo da je mokro taloženje dominantan proces, a žarišta su duž crnogorske obale i u blizini Otranta. Korištenjem metode empirijskih ortogonalnih funkcija (EOF) izdvojeno je osam sinoptičkih situacija s obzirom na prva tri moda i pripadne faze. One su analizirane u odnosu na prostornu varijabilnost optičke debljine aerosola (AOD) i taloženje prašine u Jadranu. Pripadni vremenski nizovi koeficijenata za svaki mod daju kvalitativno objašnjenje bimodalnosti godišnjeg hoda taloženja s obzirom na sinoptičke situacije za koje se ustanovilo da imaju najznačajniji utjecaj na ovaj proces. U ovom interdisciplinarnom istraživanju opažena je i visoka razina zasićenosti kisikom u Rogozničkom jezeru što je indikacija biološke aktivnosti povezane s povećanjem prisutnosti fitoplanktona nakon izdvojenih epizoda pojačanog atmosferskog taloženja prašine u morski sustav Rogozničkog jezera (Zmajevo oko kod Rogoznice).

Klimatološka analiza taloženja prašine na području Jadranskog mora na temelju podataka reanalize the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) omogućila je izdvajanje ekstremnih događaja u bazu podataka. Iz baze podataka, uvažavajući iznadprosječne koncentracije PM_{10} izmjerene na urbanim i ruralnim prizemnim postajama za praćenje kvalitete zraka na području Jadrana, odabrane su dvije epizode koje su simulirane i detaljno istražene modelom Weather Research and Forecasting združenim s kemijskim modelom (WRF-Chem). U prvoj od ove dvije epizode dnevna vrijednost koncentracije PM_{10} izmjerena 27.3.2020. u Rijeci iznosila je $216 \mu m^{-3}$, a satne vrijednosti diljem Hrvatske dosežale su vrijednosti

i do $400 \mu\text{m}^{-3}$. Analiza sinoptičke situacije, putanja unazad modela Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT), produkata AOD-a iz reanalize MERRA-2 i simulacije WRF-Chem ukazuje na advekciju prašine iz područja istočno od Kaspijskog jezera. Advekcija se odvijala do visine ~ 2 km nad tlom s izvorom na širem području isušenog Aralskog jezera. Međutim, kemijska i morfološka analiza lebdećih čestica ukazala je i na prisutnost prašine iz područja Sahare što se može pripisati utjecaju ciklone Sharav prisutne u Sredozemlju koja je prethodila advekciji prašine s istoka. Druga simulirana epizoda odnosi se na utjecaj visinske doline, što je karakteristična pojava za jesen pri čemu je donos prašine zahvatio sjeverno područje Jadrana.

Ključne riječi: pustinjska prašina, klimatologija taloženja prašine, EOF, Jadransko more, biološka proizvodnja, Rogozničko jezero, Aralsko more, WRF-Chem

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Airborne mineral dust is a significant factor in climate change estimates. Dust influences atmospheric radiation properties, cloud formation, and biogeochemical cycles, delivering micronutrients to both terrestrial (Yu et al., 2015) and oceanic ecosystems (Jickells & Moore, 2015). According to many studies, the Saharan Desert is one of the main global dust sources. It is estimated that 46% of global natural dust emissions originate in North Africa (Kok et al., 2021b) although there is also high variability in emission estimates Huneus et al. (2011). The research of dust related processes are affected by both the limitations of the numerical model and uncertainties existing in satellite measurements, which are hampered by clouds or the high content of column water vapor (Schepanski et al., 2012). A significant amount of dust from the Sahara is advected to the Amazon forest (boreal winter, Bakker et al., 2019) and the Caribbean (boreal summer). But the dust transport to the Mediterranean is not negligible or rare (Barkan et al., 2005; Israelevich et al., 2012). Schepanski et al. (2016) estimated that 100 Tg yr^{-1} of Saharan dust is exported toward the western and central Mediterranean basins.

The large-scale transport routes depend mainly on synoptic-scale features (Moulin et al., 1998; Huneus et al., 2011; Israelevich et al. 2012; Schepanski et al., 2016; Varga, 2020). In spring (mostly April), the most probable transport paths are toward the eastern Mediterranean due to Sharav cyclones (Alpert & Ziv, 1989). In August and September, Balearic cyclogenesis is the dominant process responsible for transport routes toward the western Mediterranean (Israelevich et al., 2012). In June and July, the highest probability of dust transport is over the central Mediterranean and central Europe with the support of the near-surface thermal low pressure system, that is, the Saharan heat low and the high pressure system over Libya (Israelevich et al., 2012). The most related studies are based on the coarse grid data (Huneus et al., 2011; Israelevich et al., 2012; Mahowald et al., 2014) and/or relatively small data sets (Barkan et al., 2005; Israelevich et al., 2012) and they cannot fully explore the regional and local characteristics of certain parts of the Mediterranean on longer time scales. Therefore, one of the goals of this study is to evaluate the climatological aspects of dust transport and the annual cycle of dust deposition

over the northernmost part of the Mediterranean, that is, the Adriatic Sea, which has not been examined in detail so far.

In addition to the impact of aerosols on the characteristics of the regional climate, Saharan dust also affects the biogeochemical cycle. Desert dust deposition in the otherwise oligotrophic, low-nutrient, and low-chlorophyll Mediterranean Sea is the crucial source of nutrients, mainly nitrogen (N), phosphorus (P), and iron (Fe) (e.g., Richon et al., 2017). Chlorophyll production has strong seasonal and spatial variation and could be significantly affected by atmospheric deposition (Richon et al., 2017, 2018). The effects of N deposition span over large and deep basins such as the Ionian, Levantine, and Tyrrhenian whereas P deposition effects are mainly observed in shallow areas such as the Adriatic, Aegean, and coastal western basin (Richon et al., 2017). In general, organic matter concentration can be taken as a direct consequence of biological and biogeochemical activity.

For the first time, the climatological aspects of dust transport and the annual cycle of dust deposition over the Adriatic Sea are evaluated. This research is mainly focused on detecting the synoptic situations related to the most intense dust deposition events. For each characteristic synoptic situation, the goals were to examine and determine: (a) dust emission intensity and source locations, (b) the atmospheric transport routes and spatial distribution of dust deposition in the Adriatic, (c) the threshold for dust deposition events (DDEs) for the entire study area, and (d) their annual averages. Interannual variability in dust deposition is also analyzed using average values for the investigated area. Additionally, the central Adriatic marine system of Rogoznica Lake (43°32'N, 15°58'E), as a site with stable seasonal physicochemical stratification, atmospheric input as the only source of freshwater (Ciglencečki et al., 2015, 2017; Čanković et al., 2019), and relatively short residence time of trace metals (Fe, Mo) in the water column due to interaction with sulfide (Helz et al., 2011), is taken to prove the effect of dust deposition on primary production.

Atmospheric mineral dust is one of the most abundant aerosols, but estimates of emissions and deposition are quite unreliable and variable. According to the study by Huneus et al. (2011) estimated range of global dust emissions is 514 – 4313 Tg yr⁻¹, while depositions are in range 676 – 4359 Tg yr⁻¹. In general, a problem in estimating dust emissions is the lack of measurements over large desert areas, and so dust emissions are calculated from models that are highly variable

in their estimates. This affects the simulated concentration of dust in the air, especially deposition, which is also rarely measured (Vincent et al., 2016). A more advanced approach to emission estimates is available in the form of gridded reanalysis data where modeled values are improved by assimilating optical properties observed by satellites and ground measurements (Buchard et al., 2017). A recent study by Kok et al. (2021a) using inverse modeling for the period 2004–2008 indicated even higher global dust emissions (up to $\sim 5000 \text{ Tg yr}^{-1}$) compared to most models. The reason for this is the higher emission of dust particles up to $20 \mu\text{m}$ in diameter (PM_{20}), which is underestimated in the models (Kok et al., 2021a). In this dissertation, two dust episodes were simulated and analysed using WRF-Chem model.

Most of the modelling studies for the Europe and Mediterranean are based on a Saharan dust origins. In the literature, there is not much evidence for dust advection from Asia towards this part of Europe, and this path was not found in the climatological study for the period 2005–2013 (Ge et al., 2016). In contrast to these studies, the unusual and intense dust outbreak involving transport from the deserts east to the Caspian Sea set stage at the end of March 2020. Among the first studies that analyzed this phenomenon was the one by Strelec Mahović et al. (2020) and Tositti et al. (2022). Both studies are based on analysis of (in situ and remote) measurements, reanalysis and backward HYSPLIT trajectories. Strelec Mahović et al. (2020) preliminary analyzed the observed PM_{10} concentrations at the stations within the Pannonian part of Croatia. The highest values up to $\sim 400 \mu\text{g/m}^3$ (on 27 March 2020 at 14 UTC) were recorded in Zagreb (Croatia) during the mentioned case, presenting it as the most polluted city at that time in Europe. Backward trajectories and satellite images indicated the Aral region as the area from which dust transport occurred. The results in the study of Tositti et al. (2022) suggest that the transport from the east was preceded by the transport from the Saharan area. This raises the question of the complexity of this event and the potential combined effects of transport from several regions to the central Mediterranean, which is not revealed until now. Results shown in this dissertation for the wider Rijeka area at the Adriatic coast indicated that a Saharan contribution existed during this extreme case.

The second episode simulated with WRF-Chem model occurred in the period 14.–19.9.2015. The dust sources affecting the outbreak were detected in simulations and HYSPLIT forward trajectories which were used to track the dust transport starting at the time of peak dust emissions. This case

was used to test the different modeling options against the measurements at the ground based air quality stations in the Adriatic coast.

Data and methods

The area chosen for dust deposition climatology research is the Adriatic Sea which is a body of water separating the Balkans and the Apennine Peninsula, and extends northwest from 40°N to 45°47'N, representing the Mediterranean's northernmost portion (Cushman-Roisin et al., 2001). The sea is geographically divided into the North Adriatic (NAd), Central Adriatic (CAAd), and South Adriatic (SAd). To investigate the response of the biological system to dust deposition, the site of Rogoznica Lake is chosen (CAAd; 43°32'N, 15°58'E). The lake is a typical example of a highly stratified (thermally, densely, and chemically) marine system characterized by permanent anoxia (below 8 m depth). Rogoznica Lake is a karstic depression filled with seawater, with an area of 10,276 m² and a maximum depth of 15 m, with no direct connection to the open sea. A weak connection with the sea exists through cavities in the karstic terrain, but the only supply of freshwater to the lake is atmospheric precipitation, which directly affects the salinity of the lake water column (Ciglonečki et al., 2015).

Due to a lack of any dust deposition measurements in the Adriatic Sea, the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2; Buchard et al., 2017) was used here as a source for dust optical properties and deposition over the investigated area. MERRA-2 contains atmospheric reanalysis data from 1980 onward using the NASA Goddard Earth Observing System, version 5 (GEOS-5), Earth System model (Molod et al., 2015), and the three-dimensional variational data assimilation (3Dvar) Gridpoint Statistical Interpolation analysis system (GSI) (Kleist et al., 2009). The MERRA-2 reanalysis data are at a resolution of $0.5^\circ \times 0.65^\circ$, which is still too coarse for the Adriatic. Therefore, over the Adriatic Sea surface, a mask was created using the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) topography with a resolution of 15 arcsec. The MERRA-2 deposition fields were interpolated to every 10th point of GEBCO topography. Although the interpolation here does not yield better results, it is useful to precisely divide the Adriatic area depending on the existing knowledge about the climate characteristics of the atmosphere. To evaluate the MERRA-2 dust deposition data, the available data from the dust-

sampling network established for the measurement campaign within the CharMex project (Vincent et al., 2016; <https://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/>) were also employed. The base of the network is the special, standardized deposition sampler CARAGA (Collecteur Automatique de Retombées Atmosphériques insolubles à Grande Autonomie in French, Laurent et al., 2015). Due to the limited measurements (CARAGA) from the broader Mediterranean area, one of the goals was to compare them with the MERRA-2 reanalysis over the investigated area. The methodology of comparison (e.g., Pielke & Mahrer, 1978; Teixeira et al., 2014; Kehler-Poljak et al., 2017) is performed using the set of statistical parameters: standard deviations of observations (σ_o) and model (σ_m), Root Mean Square Error (RMSE), Root Mean Square Difference (RMSD) and by checking if the reanalysis demonstrates acceptable performance by applying the following criteria: (a) $\sigma_m \approx \sigma_o$, (b) $RMSE \lesssim \sigma_o$, and (c) $RMSD \lesssim \sigma_o$.

For the simulation of the dust episodes, the Weather Research and Forecasting (WRF) model version 3.7.1 (Skamarock et al., 2008, 2019) coupled with the Chemistry model (WRF-Chem; Grell et al., 2005) was used. The WRF-Chem coupled modeling system is often applied for general PM_{10} concentration evaluations (e.g. Gašparac et al., 2020) and/or more specifically on dust transport events, but the studies for the Europe and Mediterranean are in general focused on the Saharan dust advection (e.g.; Teixeira et al., 2016; Rizza et al., 2017; Palacios-Peña et al., 2019). The WRF (Skamarock et al., 2008, 2019) model was used to study the influence of Aral lake desiccation on climate and the effect of the substantial air warming over the dried lake's surface during summer in Roy et al. (2014) and in Sharma et al. (2018) where reduction of rain during winter was detected. Several dust WRF-Chem simulations for Aral lake were made (e.g. Karami, 2021; Li and Sokolik, 2018), which indicates that the model system is well tested for simulations of this type and indicates reliable use in this study. Here, the model is used to simulate the dust episodes influenced both by Asian and Saharan sources.

The optical properties here were used to identify the dust plumes and verify the performance of the WRF-Chem simulations. To identify the development and position of dust plumes, satellite data can be used, but uncertainties in measurements arise from clouds or the high content of column water vapor (Schepanski et al., 2012), in this case particularly over the area of interest during the dust episode. Therefore, instead, the Aerosol Optical Depth (AOD) product from MERRA-2 (GMAO, 2015d) was used, particularly for the simulation of episode in 2020. To compare the

WRF-Chem AOD with the observations, the data obtained at two Aerosol Robotic Network (AERONET) stations were used for both episodes. AERONET is the worldwide network of sun-photometer stations measuring the spectral extinction of direct beam radiation using a Beer-Lambert-Bouguer law (Holben et al., 1998). AOD from WRF is available at four wavelengths (300, 400, 600, 999), while the measurements are available at multiple different wavelengths (Holben et al., 1998). To compare the modeling results the Ångström power law is applied (as in the paper of Kumar et al., 2014) to WRF-Chem AOD.

In order to test the capability of WRF-Chem to simulate hourly values of surface PM₁₀ concentrations, data from the ground based stations were used. For the episode in 2020 the data were obtained from the air quality stations available from the Ministry of Economy and Sustainable Development (<http://iszz.azo.hr/iskzl/index.html>). For the episode in 2015 the data were taken from the stations of region Marche in Italy operated by Environmental Protection Agency of region Marche and stations located in region Primorsko-goranska županija, in vicinity of city Rijeka and operated by Teaching Institute of Public Health (TIPH). The chemical analysis was made on a filter containing PM₁₀ which was sampled on 27.3.2020. at TIPH site. The concentration was determined by the gravimetric method after the conditioning and weighing. Then, the filter was cut into eight parts used for different analyses. The heavy metals concentrations (Pb, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn) were obtained from the process of mineralization of the filter, and analysis was made afterward by using ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry). The other parts of the filter were used for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and scanning electron microscope (SEM) analysis. These analysis were not used to verify the model's performance but to determine the origin of the collected dust.

To determine the area of dust sources, the HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) backward trajectories (Stein et al., 2015) using the web-based Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) (Stein et al., 2015). This method was applied in analyses of dust events of 2015 and 2020 and also in analysis of dust deposition event in Rogoznica Lake in 2019. For this event the deposition of Fe and P in Rogoznica Lake was estimated using mineralogical database (Nickovic et al., 2012).

Results and concluding remarks

The verification of MERRA-2 dust deposition with the CARAGA measurements shows a good correlation, although the deposition in reanalysis is overestimated. This bias can be due to the assimilation of both AOD and meteorology. AOD is a 2-D field and it does not account for neither the different types of aerosols nor the aerosol size distribution. Therefore, uncertainties in dust vertical profile, size distribution, and types of aerosols can lead to misrepresentation of dust deposition fluxes. Since AOD is the only aerosol-related assimilated parameter and if the model has a bias in one aerosol component, this may lead to discrepancies in dust deposition flux (Wu et al., 2020). Also, the model generated precipitation in MERRA-2 which is corrected with observations before being used for the wet deposition of aerosols over land and ocean (Gelaro et al., 2017; Reichle et al., 2017) can be a source of uncertainties. The additional possible cause of the uncertainties can be related to the dust deposition measurements at the CARAGA stations, in particular due to the loss of material during the filter handling, weighing and ignition process. Despite the mentioned disadvantages, the MERRA-2 is among the best databases for dust related fields (Wu et al., 2020; Kok et al., 2021a) and can be used for the purpose of assessing the impact of dust deposition in the Adriatic.

Although dust deposition events are of sporadic nature, the annual cycle in Adriatic Sea shows a certain level of regularity revealing the bimodal shape. This pattern depends both on the seasonality of dust transport occurrence due to synoptic patterns and the local precipitation cycle. Globally, the annual position of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) is the crucial factor. From the winter to the summer season, ITCZ moves northward and passes through desert areas. As a consequence, in the Mediterranean area during spring Saharan dust is mostly transported toward the eastern and central Mediterranean (Moulin et al., 1998; Israelevich et al., 2012). Later, the dust plumes are shifted toward the central and western Mediterranean during summer and autumn, respectively. The results within this dissertation are in agreement with this dynamics, both in regard to the annual cycle and spatial distribution of dust deposition. Dust deposition in the Adriatic was found to be mostly in the form of wet deposition, ranging from 62 to 89% of total mass deposition, which is in agreement with measurements from CARAGA stations. Therefore, overall dust deposition strongly depends on precipitation, which at most stations along the eastern Adriatic

coast has two maxima in the annual cycle: stronger maxima in autumn and weaker maxima in spring due to intense cyclonic activity (Penzar et al., 2001). Summer is characterized by scarce precipitation associated with anticyclonic weather conditions (Belušić Vozila et al., 2021), except on the northwestern coast of the Istrian Peninsula (Mikuš et al., 2012).

However, dust deposition in the Adriatic Sea is the most intense in April, representing the primary maximum, while the secondary maximum occurs in November. The EOF analysis revealed the characteristic synoptic patterns related to the dust transport in relation to the sources, spatial distribution of deposition intensity in Adriatic Sea and its annual cycle. The most important synoptic situation for dust deposition in the Adriatic Sea is driven by an upper-level trough aligned in a SW-NE direction with a deep Mediterranean cyclone centered over Corsica. This cyclone is known as Sharav cyclone (Alpert and Ziv, 1989). Driven by baroclinic temperature gradient between the sea and land in spring, it travels eastward along the northern African coast, lifting the dust from Atlas Mountains to the Gulf of Sirte in Libya. Dust transport occurs at the foreside of cyclone towards eastern Mediterranean affecting the deposition in Adriatic Sea with a gradient from the NAd to SAd, particularly along the Dalmatian and Montenegrin coast in the CAD. The synoptic situation characteristic for the autumn is defined by an upper-level trough with a cyclone in Biscay Bay extending down to southern Algeria. The dust emissions are in the Atlas Mountains, while the increase in AOD is extended to the western Mediterranean, including the entire Adriatic. The deposition is the strongest along the eastern Adriatic coast, but it has a relatively strong impact in the NAd. This finding is also coincident with studies by Varga et al. (2014); Varga (2020), and it is related to the most important situation for dust episode occurrence in the central Mediterranean area and is responsible for 67.4% of dust episodes in the Carpathian Basin.

The biological response to the dust deposition was proven by a high level of oxygen saturation (up to 250%) due to increased phytoplankton (mainly diatoms) abundance ($>10^6$ cells L^{-1}) and activities (Figure SE1 in Supporting Information S1) in the stratified middle layer (5 – 8 m depth) of Rogoznica Lake following intense deposition episodes. Additionally, in this dust coming from Libya, the deposited Fe and P were estimated by using HYSPLIT trajectories and mineralogical maps following the work of Nickovic et al. (2012), and fairly good agreement between estimated and measured Fe in the surface of Rogoznica Lake was obtained. Our results prove the positive

significant trend for the 30-Y dust deposition time sets in the Adriatic Sea with the higher frequency of strong wet deposition events recorded after 2000.

In the second part of the dissertation, the two dust episodes over Adriatic region were simulated using the WRF-Chem model. The first was the extreme episode that occurred over Southeast Europe from 27 to 30 March 2020. In this case, the daily PM₁₀ value observed at the TIPH station On 27 March 2020 was ~ 7.7 times higher than the average value in 2020. The remote sensing and the modeling results showed the influence of two different origins; the mid-troposphere plume from North Africa driven by deep Sharav cyclone was recorded the day before the occurrence of the plume from Asia and the max. PM₁₀ values observed at multiple ground based stations in Croatia. The modeling results showed that the advection up to ~ 2 km a.g.l. can be attributed to the sources east to the Caspian Sea. This poses a question of the relative contribution from the African and Asian sources. The arguments supporting that the Asian sources are the most significant; increased AOD identifies the plumes from the both Saharan and Asian direction, but the advection from the east was in the lower troposphere and atmospheric boundary layer, while the African plume was in the mid-troposphere above the mixing layer. However, the chemical and SEM analysis of PM₁₀ collected during the most intensive March 2020 dust event over the northern Adriatic sampling site lead to the conclusion that PM₁₀ filter reflects mainly the influence of Saharan dust. It is important to stress that Mediterranean cyclones can facilitate the long-transport of the giant mineral dust particles (> 75 μm, Flaounas et al., 2022). Therefore, if the coarser particles can be uplifted and advected to distant regions, the deposition by gravitational settling can be the main mechanism to explain the presence of Saharan dust in the filter. Modeling results showed a good agreement with PM₁₀ hourly values observed at multiple air quality stations in Croatia in terms of correlation, but they underestimate the observations by 26-57% on average. According to the AERONET measurements at Lampedusa and Galata stations, the plume from the Asian sources was underestimated more. The HYSPLIT back trajectories point to the source located at the dried Aral lake. The erodibility map, based on the simple source function in WRF is proven to be inadequate for the smaller desert areas. In this case, the erodibility values over Aral lake are zero, and this is the most probable reason to explain most of the existing bias in PM₁₀ and AOD. The second episode simulated in this dissertation occurred on September 2015. The dust transport from the sources in Algeria and Tunisia was on the foreside of the upper level through

which extended from the Atlantic ocean to the south of the Pirineian peninsula. The dust emission time series over the two sources show the diurnal cycle with peak emission in the morning which can be attributed to the nocturnal low level jet break down process. For this episode, the sensitivity tests were performed using two different aerosol modules within the WRF-Chem model: MOZART-GOCART and MOZART-MOSAIC, and each was tested with and without the usage of the dust boundary conditions from global model MOZART-4. It was shown that there is a high correlation between the simulation and the measurements, both for AOD and for PM₁₀. Considering the sensitivity tests, the best agreement is in the case when the MOZART-GOCART module is used without applying the boundary conditions from the global chemical transport model MOZART-4. This results are mostly affected by the usage of different dust emission schemes within the specific modules.

Keywords: Desert dust, Dust deposition climatology, EOF, Adriatic Sea, biological production, Rogoznica lake, Aral Sea ,WRF-Chem

POPIS KRATICA I POJMOVA

| | |
|----------------------|--|
| <i>AOD</i> | <i>optička debljina aerosola</i> |
| <i>BIAS</i> | <i>pristranost</i> |
| <i>CAd</i> | <i>srednji Jadran</i> |
| <i>CARAGA</i> | <i>mreža postaja s uzorkivačem taloženja prašine</i> |
| <i>DDE</i> | <i>događaj taloženja prašine</i> |
| <i>DEP</i> | <i>ukupno taloženje prašine</i> |
| <i>DOC</i> | <i>otopljeni organski ugljik</i> |
| <i>EDX</i> | <i>energo-disperzivna spektroskopija rendgenskih zraka</i> |
| <i>NAd</i> | <i>Sjeverni Jadran</i> |
| <i>MERRA-2</i> | <i>reanaliza NASA-e</i> |
| <i>NASA</i> | <i>državna civilna uprava SAD-a za zrakoplovna i svemirska istraživanja i razvoj</i> |
| <i>MOZART-GOCART</i> | <i>modul za simulaciju kemije plinova i lebdećih čestica</i> |
| <i>MOZART-MOSAIC</i> | <i>modul za simulaciju kemije plinova i lebdećih čestica</i> |
| <i>NZZJZ</i> | <i>Nastavni Zavod za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije</i> |
| <i>PAU</i> | <i>policiklički aromatski ugljikovodici</i> |
| <i>PC</i> | <i>glavne komponente</i> |
| <i>PCA</i> | <i>analiza glavnih komponenti</i> |
| <i>PBL</i> | <i>planetarni granični sloj</i> |
| <i>PM</i> | <i>lebdeće čestice</i> |
| <i>POC</i> | <i>organski ugljik u obliku čestica</i> |
| <i>RMSD</i> | <i>korijen srednjeg kvadratnog odstupanja</i> |
| <i>RMSE</i> | <i>korijen srednje kvadratne pogreške</i> |
| <i>SAd</i> | <i>Južni Jadran</i> |
| <i>SEM</i> | <i>skenirajući elektronski mikroskop</i> |
| <i>TD</i> | <i>ukupno mokro taloženje prašine</i> |
| <i>TIN</i> | <i>ukupni anorganski dušik</i> |
| <i>TW</i> | <i>ukupno suho taloženje prašine</i> |
| <i>UTC</i> | <i>koordinirano svjetsko vrijeme</i> |

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| <i>SAŽETAK</i> | <i>i</i> |
| <i>EXTENDED ABSTRACT</i> | <i>iii</i> |
| <i>POPIS KRATICA I POJMOVA</i> | <i>xiv</i> |
| <i>1. UVOD</i> | <i>3</i> |
| <i>1.1 Pustinjska prašina i njen utjecaj na Jadran</i> | <i>3</i> |
| <i>1.2 Utjecaj taloženja prašine na biološke sustave Jadranskog mora</i> | <i>5</i> |
| <i>1.3 Ciljevi istraživanja taloženja saharske prašine</i> | <i>6</i> |
| <i>1.4 Modeliranje koncentracije prašine i primjena na područje Sredozemlja</i> | <i>7</i> |
| <i>2. PODACI</i> | <i>12</i> |
| <i>2.1 Područje istraživanja</i> | <i>12</i> |
| <i>2.2 Reanaliza MERRA-2</i> | <i>14</i> |
| <i>2.3 Podaci mjerenja za evaluaciju reanalize MERRA-2</i> | <i>16</i> |
| <i>2.4 Izvori podataka optičke debljine aerosola za evaluaciju numeričkog združenog modela</i> | <i>17</i> |
| <i>2.5 Fizikalno-kemijski parametri u Rogozničkom jezeru i uzorku kiše</i> | <i>23</i> |
| <i>2.6 Mjerenja PM₁₀, kemijska analiza i podaci dobiveni skenirajućim elektronskim mikroskopom</i> | <i>23</i> |
| <i>3. METODOLOGIJA</i> | <i>26</i> |
| <i>3.1 Empirijske ortogonalne funkcije</i> | <i>26</i> |
| <i>3.2 Putanje i mineraloška baza</i> | <i>26</i> |
| <i>3.3 Model WRF-Chem i izbor epizoda donosa prašine na područje Jadrana</i> | <i>27</i> |
| <i>3.3.1 Postavke modela WRF-Chem za epizodu iz ožujka 2020</i> | <i>29</i> |
| <i>3.3.2 Postavke modela WRF-Chem za epizodu iz 2015</i> | <i>31</i> |
| <i>4. REZULTATI I DISKUSIJA</i> | <i>34</i> |
| <i>4.1 Klimatološka obilježja taloženja saharske prašine u Jadransko more i potencijalni utjecaj na biološku produkciju</i> | <i>34</i> |
| <i>4.1.1 Usporedba reanalize MERRA-2 i prizemnih mjerenja taloženja prašine</i> | <i>34</i> |
| <i>4.1.2 Klimatologija taloženja prašine u Jadransko more</i> | <i>37</i> |
| <i>4.1.3 Empirijske ortogonalne funkcije</i> | <i>45</i> |
| <i>4.1.4 Kemijski sastav prašine i učinak taloženja na biološku aktivnost u morskom sustavu Rogozničkog jezera</i> | <i>55</i> |
| <i>4.2 Analiza epizode donosa prašine iz ožujka 2020</i> | <i>62</i> |
| <i>4.2.1 Opis epizode</i> | <i>62</i> |
| <i>4.2.2 Usporedba rezultata modela WRF-Chem s prizemnim mjerenjima</i> | <i>67</i> |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.2.3 | <i>Kemijski sastav PM₁₀ prikupljenih tijekom intenzivnog donosa prašine u ožujku 2020.</i> | 71 |
| 4.2.4. | <i>Mineralni sastav PM₁₀</i> | 74 |
| 4.3 | <i>Analiza epizode donosa prašine iz rujna 2015.</i> | 76 |
| 4.3.1 | <i>Analiza sinoptičke situacije</i> | 76 |
| 4.3.2 | <i>Identifikacija izvora prašine</i> | 79 |
| 4.3.2.1 | <i>Odnos između porasta PM₁₀ i emisija prašine</i> | 81 |
| 4.3.2.2 | <i>Analiza porasta koncentracije lebdećih čestica 18.9.2015.</i> | 83 |
| 4.3.3. | <i>Usporedba parametra optičke debljine aerosola dobivenih modelom i mjerenjima na prizemnim postajama</i> | 85 |
| 4.3.4. | <i>Usporedba koncentracija PM₁₀ dobivenih modelom i mjerenjima na prizemnim postajama</i> | 91 |
| 5. | ZAKLJUČAK | 96 |
| 6. | LITERATURA | 102 |
| | <i>Dodatak A – Trendovi</i> | 129 |
| | <i>Dodatak B – Prostorna razdioba taloženja prašine</i> | 134 |
| | <i>Dodatak C – Prostorna razdioba događaja taloženja prašine</i> | 137 |
| | <i>Dodatak D – Sastav mikrofitoplanktona Rogozničkog jezera</i> | 138 |
| | <i>Dodatak E – Vremenski nizovi taloženja lebdećih čestica iz reanalize MERRA-2 u blizini Rogozničkog jezera</i> | 139 |
| | <i>Dodatak F – Analiza epizode donosa prašine iz ožujka 2020.</i> | 141 |
| | <i>Dodatak G – Rezultati dobiveni skenirajućim elektronskim mikroskopom</i> | 144 |
| | <i>Životopis</i> | 145 |

1. UVOD

1.1 Pustinjska prašina i njen utjecaj na Jadran

Prašina je općeniti pojam koji opisuje suhe i krute lebdeće čestice (PM) raspršene u atmosferi koje se nalaze u veličinskim frakcijama u rasponu veličine od submikrona do nekoliko desetina mikrometara (<https://glossary.ametsoc.org/wiki/Dust>). Prašina može potjecati iz raznih izvora: na primjer, tla, morskog spreja, dima od šumskih požara i industrijskih izvora, vulkanskih erupcija, te iz izvanzemaljskih izvora (meteorska prašina) i organskih materijala, kao što su bakterije, pelud biljaka, životinjske dlake i stanice ljudske kože. Ovaj rad temelji se na mineralnoj prašini čije je porijeklo pustinjsko tlo. U nastavku rada, koristit će se termini mineralna prašina, ili češće radi jednostavnosti prašina.

Mineralna prašina značajan je čimbenik u procjenama klimatskih promjena. Prisutna u atmosferi ona utječe na radijacijsko-apsorpcijska svojstva atmosferskog zračenja, stvaranje oblaka (Tsarpalis i sur., 2020) i biogeokemijske cikluse kroz dostavu mikronutrijenata kako kopnenim (Yu i sur., 2015), tako i oceanskim ekosustavima (Jickells i Moore, 2015). Prema rezultatima dosadašnjih studija, Sahara predstavlja jedan od glavnih globalnih izvora prašine. Procjenjuje se da 46 % emisija globalne prirodne prašine potječe iz Sjeverne Afrike (Kok i sur., 2021b). Međutim, postoji i velika varijabilnost u procjenama emisija, npr. 130 – 760 Tg god⁻¹ prema radu Goudie i Middleton (2001) u odnosu na 400 – 2200 Tg god⁻¹ u Huneus i sur. (2011). Ključni čimbenik kod emisije prašine je prizemna brzina vjetra, koja ovisi o sinoptičkim i mezoskalnim procesima koji su jako prostorno i vremenski promjenjivi, te o turbulenciji u prizemnom dijelu planetarnog graničnog sloja atmosfere (PBL). Na primjer, tijekom ljeta 2006. godine u Zapadnoj Sahari bazeni hladnog zraka nastali tijekom konvektivnih oluja (tzv. Haboob-a) i noćne niske mlazne struje bili su dva glavna uzročnika pojave emisije prašine (Heinold i sur., 2013). Noćna niska mlazna struja je maksimum vjetra u donjoj troposferi koji se javlja noću iznad sloja inverzije. Turbulencija se javlja radi smicanja vjetra po visini i nastanka konvekcije u jutarnjim satima, što rezultira povećanjem brzine vjetra uz pustinjsko tlo koji podiže prašinu (Fiedler i sur., 2013). Spomenuti procesi su doprinijeli ukupnoj emisiji prašine od 40 % svaki, dok je 20 % emitirane prašine bilo radi neutvrđenih uzroka. Ipak, procjene relativnih doprinosa, a koje su dobivene pomoću modela s razlučivom konvekcijom i modelom emisije prašine, mogu varirati na međugodišnjoj osnovi. Na

rezultate također utječu i druga ograničenja numeričkih modela i mjerne neodređenosti koje postoje u satelitskim mjerenjima, bilo zbog naoblake ili zbog velikog udjela vodene pare u stupcu zraka (Schepanski i sur., 2012).

Unatoč činjenici da se značajna količina prašine iz Sahare atmosferom prenosi u amazonsku šumu (tijekom borealne zime, Bakker i sur., 2019) i prema Karibima (borealno ljeto), donos prašine u Sredozemlje nije zanemariv niti rijedak (Barkan i sur., 2005; Israelevich i sur., 2012). Prema Shao i sur. (2011), približno 10 % prašine emitirane u sjevernoj Africi prenosi se sjeverno nad Europu, dok su Schepanski i sur. (2016) procijenili da se 100 Tg god⁻¹ transportira prema zapadnom i središnjem dijelu Sredozemlja. Relevantni izvori pustinjske prašine koja se transportira u smjeru sjevera su oni u Libiji (Schepanski i sur., 2016), odnosno oni koji se nalaze u blizini planine Atlas, tj. pustinje koja se proteže između gorja Atlas i Hoggar.

Analizirajući prijenos i taloženje prašine na globalnoj skali, Mahowald i sur. (2014) uočili su da bi vrijeme zadržavanja prašine u atmosferi iznad Sjeverne Afrike i Sredozemlja moglo biti i do 10 dana (Schepanski i sur., 2016). Vrijeme zadržavanja prašine u atmosferi ovisi o uzgonu čestica prašine, brzinama sedimentacije i mokrom taloženju (Mahowald i sur., 2014). Važno je naglasiti da atmosferske transportne rute na velikoj skali ovise uglavnom o sinoptičkim značajkama atmosfere (Moulin i sur., 1998; Huneus i sur., 2011; Schepanski i sur., 2016; Varga, 2020). Israelevich i sur. (2012) proučavali su prostornu raspodjelu parametara optičke debljine aerosola (engl. *Aerosol Optical Depth*, AOD) na podacima strukturiranima u mreži točaka s korakom 1° × 1°, koja se može uzeti kao mjera najvjerojatnijeg transporta saharske prašine. Korišteni su podaci od ožujka do rujna za desetogodišnje razdoblje (2001–2010). Pokazalo se da područja u kojima putanje prijenosa prašine imaju najveću vjerojatnost pojavljivanja ukazuju na jasnu razliku između istočnog i zapadnog Sredozemlja po pitanju prisutnosti lebdećih čestica u atmosferi i njihovoj sezonskoj varijabilnosti. Točnije, u proljeće (uglavnom travanj), najvjerojatniji transportni putevi su prema istočnom Sredozemlju zbog pojave tzv. Sharav ciklone (Alpert i Ziv, 1989). U kolovozu i rujnu balearska ciklogeneza je dominantan proces odgovoran za transport prašine prema zapadnom Sredozemlju (Israelevich i sur., 2012). To se poklapa s godišnjim hodom emisije prašine koji ima vrhunac u svibnju na području Libije i u kolovozu na području Tunisa (Barkan i sur., 2004). U lipnju i srpnju najveća vjerojatnost donosa prašine je iznad središnjeg Sredozemlja i središnje Europe radi utjecaja prizemne raspodjele tlaka zraka; jedne komponente zapadnoafričkog monsunskog sustava na sinoptičkoj razini i pokretača ljetnih oborina u regiji Sahel te sustava

visokog tlaka nad Libijom (Israelevich i sur., 2012). Tada se lokalni maksimum AOD-a javlja na južnim padinama Alpa, gdje čest zraka koja prenosi prašinu dopire do planina i potom usporava. Osim toga, Barkan i sur. (2005) analizirali su pojavu atmosferske prašine nad Italijom za mjesec srpanj u razdoblju 1979–1992. Autori su otkrili da je glavni pokretač transporta na sinoptičkoj skali područje sniženog tlaka zraka oformljeno južno od Islanda (ciklona u prizemnom polju tlaka koja je popraćena visinskom dolinom). Međutim, navedene studije temelje se na podacima s grube mreže (Huneeus i sur., 2011; Israelevich i sur., 2012; Mahowald i sur., 2014) te na relativno malom skupu podataka (Barkan i sur., 2005; Israelevich i sur., 2012) i prema tome se ne mogu u potpunosti odnositi na regionalna i lokalna obilježja pojedinih dijelova Sredozemlja na duljim vremenskim skalama. Stoga je jedan od ciljeva ovog doktorskog rada procijeniti klimatološke značajke transporta prašine i godišnji hod taloženja prašine nad najsjevernijim dijelom Sredozemlja, odnosno nad Jadranskim morem, a što nije do sad detaljno ispitano. Pod utjecajem Alpa na sjeveru, lokalni režim oborine nad Jadranskim morem je vrlo promjenjiv, osobito između sjevera i juga zbog različitih putanja ciklona i vremenskih tipova (npr. Penzar i sur., 2001; Mikuš i sur., 2012) ovisno o godišnjem dobu. Ove razlike nad Jadranskim morem mogu imati znatan utjecaj na lokalno taloženje prašine. Navedeno se teško može razaznati u dosadašnjim studijama koje se temelje na analizi podataka dostupnih iz mreže točaka za područje Sredozemlja, budući da je radi grube razlučivosti takvih podataka Jadran obično predstavljen s nekoliko točaka mreže.

1.2 Utjecaj taloženja prašine na biološke sustave Jadranskog mora

Osim utjecaja lebdećih čestica na karakteristike regionalne klime, saharska prašina također utječe na biogeokemijski ciklus. Talozenje pustinjske prašine u inače oligotrofnom Sredozemnom moru karakterističnom po manjku hranjivih tvari i klorofila je ključni izvor hranjivih tvari, uglavnom dušika (N), fosfora (P) i željeza (Fe) (npr. Richon i sur., 2017). Proizvodnja klorofila ima jake sezonske i prostorne varijacije na što značajno može utjecati atmosfersko taloženje prašine (Richon i sur., 2017, 2018). Talozenje pustinjske prašine utječe na biološku aktivnost uglavnom tijekom ljetnih mjeseci kada je Sredozemno more osiromašeno hranjivim tvarima nakon proljetnog cvjetanja, i stratificirano, što smanjuje utjecaj podizanja duboke vode bogate nutrijentima na površinu (D'Ortenzio i sur., 2005). U proljetnim mjesecima dubina sloja miješanja u moru obično

je veća (D'Ortenzio i sur., 2005), a prema proračunima doprinos atmosferskog taloženja P je maksimalan (Richon i sur., 2018). Ograničavajući čimbenici za Sredozemno more su uglavnom P i N (Krom i sur., 1991, 2004; Richon i sur., 2017, 2018). Međutim, Fe je prepoznato kao potencijalno ograničenje ili ograničenje za rast dijatomeje (Baeyens i sur., 2018). Rijeka Po značajan je izvor hranjivih tvari za Jadransko more, posebice za njegov sjeverni dio (Ludwig i sur., 2009). Međutim, studija koju su napravili Richon i sur. (2017) ukazala je na utjecaj atmosferskog taloženja P i N u plitko Jadransko more, poznato po tome što je ograničeno s P. Međutim, opažene razine P ne mogu se objasniti odgovarajućim koncentracijama izmjerenim u vodama rijeke Po. Navedeno ukazuje na prisutnost drugih izvora P, vjerojatno povezanih s intenzivnom oborinom (Totti i sur., 2019) i mineralnom prašinom koja dolazi iz sjevernog dijela Afrike (Richon i sur., 2018; Kanakidou i sur., 2020; Orlović-Leko i sur., 2020). Richon i sur. (2018) su pokazali da postoji značajan doprinos izgaranja biomase na obalama Sredozemnog moru na taloženje P i N. Samo taloženje elemenata obilježava niska varijabilnost u usporedbi s taloženjem pustinjske prašine, koja je više epizodna i prostorno raširenija. Učinci taloženja N primijećeni su nad velikim i dubokim bazenima kao što su ionski, levantski i tirenski, dok su učinci taloženja P uglavnom opaženi u plitkim morima kao što su Jadransko, Egejsko i obalno područje na zapadu Sredozemnog mora (Richon i sur., 2017). Općenito, koncentracija organske tvari može se uzeti kao izravna posljedica biološke i biogeokemijske aktivnosti (Milinković i sur., 2022).

1.3 Ciljevi istraživanja taloženja saharske prašine

Uzimajući u obzir višestruke aspekte značaja lebdećih čestica, od utjecaja na kvalitetu zraka i klimu do biogeokemijskog ciklusa mora, glavni ciljevi istraživanja navedeni su u ovom poglavlju. Ponajprije se izdvajaju epizode (događaji) transporta saharske prašine prema Jadranu i određuje se njihova učestalost te se analiziraju sinoptički i mezoskalni meteorološki uvjeti koje ih uzrokuju i/ili podržavaju. Potom se pomoću numeričkih modela ispituju mogućnost predikcije takvih epizoda. Za simulacije izabranih epizoda se koristi združeni atmosfersko-kemijski sustav, a posebno je napravljeno ispitivanje s obzirom na antropogene i biogene emisije lebdećih čestica i njihovih perkursora. Rezultati simulacija numeričkim modelima evaluirani su pomoću dostupnih prizemnih

(mreža postaja za praćenje kvalitete zaka), visinskih (radiosondaže) i daljinskih mjerenja (satelitski produkti) standardnim statističkim parametrima.

Po prvi put, radi se procjena klimatskih obilježja transporta prašine i godišnji hod taloženja prašine u Jadransko more. Iako već postoje studije koje se bave praćenjem kvalitete zraka za područje istočnog Jadrana (Klaić, 1998; Jelić i Klaić, 2010; Telišman Prtenjak i sur., 2009, 2013; Jeričević i sur., 2016, 2019; Alebić-Juretić i Mifka, 2017; Cvitešić Kušan i sur., 2020; Jakovljević i sur., 2021; Merico i sur., 2020; Mifka i sur., 2021; Milinković i sur., 2022;), ovo je istraživanje uglavnom usmjereno na otkrivanje karakterističnih sinoptičkih situacija (modova) povezanih s intenzitetom taloženja prašine. Za svaki sinoptički mod, ciljevi su ispitati i odrediti (a) intenzitet emisije prašine i lokacije izvora, (b) atmosferske transportne putove i prostornu raspodjelu taloženja prašine u Jadran, (c) prag za definiranje događaja taloženja (engl. *Dust Deposition Event*, DDE) za cijelo područje istraživanja, i (d) njihove godišnje prosjeke. Dodatno, važno je ispitati i međugodišnju varijabilnost taloženja prašine.

Radi ostvarivanja ciljeva u ovom radu, a koji se odnose na detekciju biološkog odziva morskog sustava na taloženja prašine, koriste se i podaci mjereni na lokaciji Rogozničkog jezera. Jezero je smješteno na obali srednjeg Jadrana (43°32' N, 15°58' E), a odabrano je radi nekih prednosti same lokacije u odnosu na otvoreno more. Rogozničko jezero je mjesto sa stabilnom sezonskom fizikalno-kemijskom stratifikacijom, atmosferskim unosom kao jedinim izvorom slatke vode (Ciglonečki i sur., 2015, 2017; Čanković i sur., 2019) te relativno kratkim vremenom zadržavanja metala u tragovima (Fe, Mo) u vodenom stupcu zbog interakcije sa sulfidom (Helz i sur., 2011).

1.4 Modeliranje koncentracije prašine i primjena na područje Sredozemlja

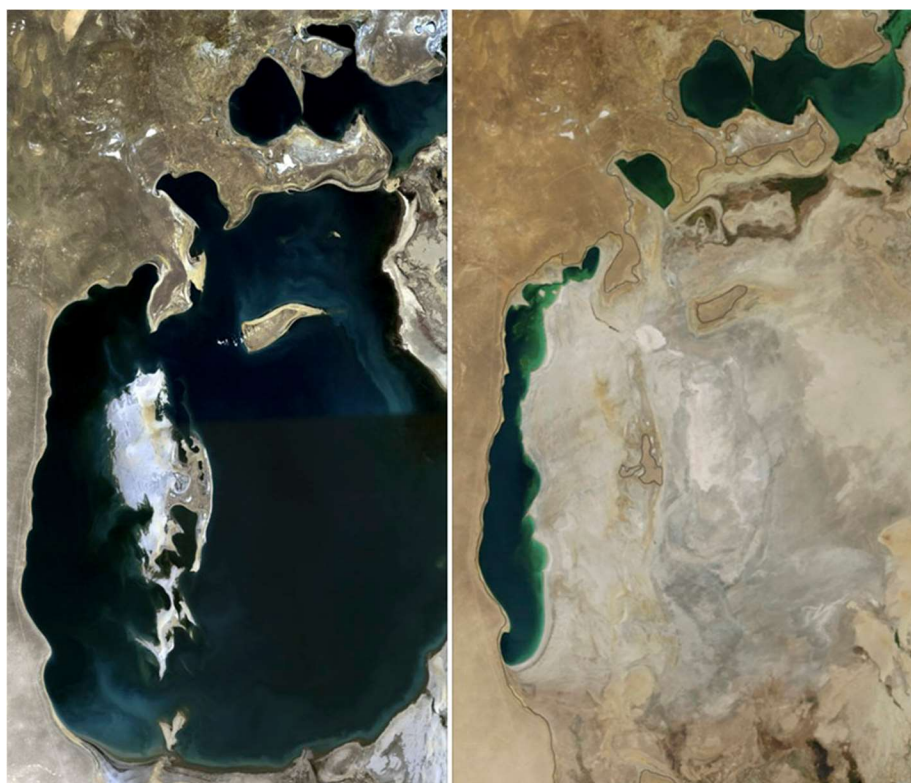
Atmosferska mineralna prašina jedan je od najrasprostranjenijih tipova lebdećih čestica, ali su procjene u emisijama i taloženju poprilično nepouzdana i značajno variraju. Primjerice, prema studiji Huneus i sur. (2011) procijenjeni raspon globalnih emisija prašine je 514 – 4313 Tg yr⁻¹, a taloženja 676 – 4359 Tg yr⁻¹. Općenito, problem u procjeni emisije prašine je nedostatak mjerenja iznad prostranih pustinjskih područja. Nedostatak se može nadoknaditi modelskim proračunima emisije prašine iako su u konačnici njihove procjene vrlo varijabilne što utječe na simuliranu

koncentraciju prašine u zraku, posebice na taloženje koje se također rijetko mjeri (Vincent i sur., 2016). Napredniji pristup procjenama emisija dostupan je u vidu umreženih podataka reanalize gdje su modelirane vrijednosti poboljšane asimilacijom optičkih svojstava opaženih satelitima i prizemnim mjerenjima (Buchard i sur., 2017). Najnovija studija koju su izradili Kok i sur. (2021a) koristila je inverzno modeliranje za razdoblje 2004–2008 te ukazala na još veće globalne emisije prašine (do $\sim 5000 \text{ Tg yr}^{-1}$) u usporedbi s većinom atmosferskih modela korištenih u studiji Huneeus i sur., (2011). Razlog tome je veća emisija čestica prašine do promjera $20 \mu\text{m}$ (engl. *Particulate Matter*, PM_{20}) koja je uglavnom podcijenjena u modelima. Točnije, u toj studiji je ustanovljeno da se $\sim 80\%$ globalne emisije PM_{20} odnosi na čestice s promjerom $D \geq 5 \mu\text{m}$.

Transport prašine preko Sredozemnog mora uvelike ovisi o razvoju i kretanju ciklona na tom području (npr. Fiedler i sur., 2014; Schepanski i sur., 2016; Flaounas i sur., 2022). Iako postoji međugodišnja varijabilnost, razdoblje najvećeg atmosferskog donosa prašine je tijekom ožujka i travnja (Moulin i sur., 1998; Barnaba i Gobi, 2004., Mifka i sur., 2022) i to u istočnom i središnjem dijelu Sredozemlja. U proljeće, jaki površinski baroklini gradijenti između hladne površine Sredozemnog mora i toplog sjevernoafričkog tla, te zavjetrinski učinak planine Atlas utječu na razvoj Sharav ciklona koje brzo putuju prema istoku približnom brzinom od 10 m s^{-1} i prelaze Sredozemno more između Libije i Egipta (Alpert i Ziv, 1989). Podizanje prašine povezano je s intenzivnom toplom frontom te prašina može doseći razinu 500-hPa plohe ili višu. Meridionalna komponenta vjetra dominira nad zonalnom (Varga i sur., 2020) što rezultira intenzivnim prijenosom prašine prema središnjem Sredozemlju uključujući Jadransko more (Mifka i sur., 2022). S obzirom na svekoliki značaj ovog transporta, niz istraživanja donosa prašine na Sredozemlje pomoću različitih modela rezultirao je uspostavom operativnih prognoza prašine (Benedetti i sur., 2014). Sam operativni sustav pokriva globalne i regionalne zahtjeve te se kontinuirano nadograđuje.

Većina modelarskih studija atmosferskog transporta prašine za područje Sredozemlja i Europe, a time i Jadrana, zasniva se na proučavanju donosa prašine iz područja Sahare. Za razliku od Sahare, drugi potencijalni izvori prašine nisu dovoljno ili nisu uopće obuhvaćeni istraživanjima. Zbog toga je jedan od ciljeva ovog doktorskog rada analiza donosa prašine iz drugih izvora, npr. onih s istoka. Koncem ožujka 2020. nad područjem jugoistočne Europe opažen je neuobičajen i intenzivan atmosferski donos prašine iz pustinja smještenih istočno od Kaspijskog jezera. U literaturi nema puno dokaza o advekciji prašine iz Azije prema ovom dijelu Europe, a pitanja ovakve perjanice

nije pronađena niti u klimatskoj studiji za razdoblje 2005–2013 (Ge i sur., 2016). Ta studija je pokazala da se tijekom svake sezone emitirana prašina iz Aralskog jezera advektira u šire područje oko Kaspijskog jezera. Goudie i Middleton (2006) su također istaknuli postojanje advekcije iz pustinje Aralkum u Litvu i Bjelorusiju. Aralsko more je nekad bilo četvrto jezero po veličini na svijetu. Međutim, u zadnjih 100 godina (Slika 1) kontinuirano se isušuje u svrhu navodnjavanja za potrebe proizvodnje pamuka te mu je današnja površina smanjena do skoro 10 % njegove prvobitne površine (za 74 % od 1960-ih; Micklin, 2007). Isušivanje je izazvalo znatne negativne ekološke probleme te je utjecalo na klimatske promjene (Sharma i sur., 2018) i pojavu ozbiljnih zdravstvenih problema (Wæhler i sur., 2017) u tom području. Područje je postalo podložno pustinjskim olujama s najvećom stopom pojavljivanja u svijetu (Indoitu i sur., 2012). Također, na temelju mjerenja ozona i ultraljubičastog zračenja definiran je indeks aerosola koji služi za praćenje intenzivnih udjela i transporta lebdećih čestica u atmosferi tijekom pojave velikih oblaka dima te oluja s prašinom (npr. Ge i sur., 2016; Zhang i sur., 2021). Studija Ge i sur. (2016) pokazala je trend brzog rasta indeksa aerosola iznad Aralskog jezera nakon 2005.



Slika 1. Promjene Aralskog jezera u zadnjih 100 godina. Preuzeto s <https://www.bengeri.com/aralsko-more-jezero-simbol-unistenja-planete-od-ljudske-ruke/>

Događaj koji je analiziran u ovom doktorskom radu zabilježen je u razdoblju 26.–30.3.2020. te je analiziran do sada u dvije studije; Strelec Mahović i sur. (2020) i Tositti i sur. (2022). Obje studije temelje se na analizi prizemnih i daljinskih mjerenja, podacima reanalize i putanjama unazad (engl. *backward trajectories*) iz modela HYSPLIT¹. Strelec Mahović i sur. (2020) preliminarno su analizirali opažene prizemne koncentracije PM₁₀ na postajama unutar panonskog dijela Hrvatske. Najveće satne vrijednosti 27.3.2020. u 14 UTC u iznosu do ~ 400 µg m⁻³ zabilježene su u Zagrebu tijekom spomenutog slučaja, čime je Zagreb u tom trenutku bio na samom vrhu u Europi. Ostale postaje u kontinentalnom dijelu Hrvatske, kao i u susjednim zemljama Balkanskog poluotoka, bilježile su također vrlo velike koncentracije i izrazito lošu kvalitetu zraka s obzirom na PM₁₀. Putanje unatrag i satelitske slike ukazale su na presušeno Aralsko more kao područje iz kojeg je došlo do donosa prašine. Valja napomenuti i da je jadranska regija izostavljena iz te analize u navedenom radu. Druga studija koju su proveli Tositti i sur. (2022) temelji se na detaljnom istraživanju događaja u sjevernoj Italiji uz analizu prizemnih i daljinskih mjerenja na postajama koje se nalaze na području od Trsta preko Bologne do planine Cimone (Slika 3b). Autori su koristili podatke dobivene pomoću optičkih brojača čestica te su u kombinaciji s putanjama modela HYSPLIT i podacima reanalize ERA5 (Hersbach i sur., 2020; sinoptičke karte i produkti vezani za PM) utvrdili da je područje izvora u blizini Aralskog mora. Međutim, njihovi rezultati analize putanja i koncentracija PM₁₀ (njihove Slike 2 i A3) sugeriraju da je transportu s istoka prethodio transport prašine iz područja Sahare. Prema njihovoj raspravi, taj transport je zahvatio južne geografske širine (tj. područje južne Italije i šire područje Balkanskog poluotoka), no analiza tog utjecaja na cjelokupnu epizodu nije bila u fokusu njihovog istraživanja. To postavlja pitanje složenosti ovog događaja i mogućih kombiniranih učinaka transporta iz nekoliko regija u središnji dio Sredozemlja, a koji do sada nije otkriven. Preliminarni rezultati provedeni u Mifka i sur. (2022b) za šire riječko područje na jadranskoj obali dali su naznaku da je u ovom ekstremnom slučaju postojao doprinos Sahare.

¹ engl. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

S obzirom na nejasnu dinamiku transporta prašine na području Jadrana tijekom ove specifične epizode, u ovom doktorskom radu provodi se daljnje istraživanje ovog iznimno rijetkog događaja. Glavni cilj je odgovoriti postoje li doprinosi iz više izvora (područja Aral i/ili Sahara), kao i meteorološka pozadina njihovog nastanka. Drugi cilj je ispitati može li sustav združenog meteorološko-kemijskog numeričkog modela simulirati ovu vrstu događaja. Detaljna analiza provedena je metodologijom različitom od prethodnih studija (npr. Strelec Mahović i sur., 2020; Tositti i sur., 2022), s ciljem otkrivanja potencijalnog dodatnog utjecaja saharskog izvora. U skladu s time, analiza se sastoji od dva glavna dijela: (i) numeričkih simulacija združenog sustava atmosferskog modela s modelom za kvalitetu zraka i (ii) kemijske analize i snimke filtra s PM_{10} napravljene skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM). Prikupljanje čestica frakcije PM_{10} obavljeno je 27.3.2020. na postaji za praćenje kvalitete zraka u gradu Rijeci koja se nalazi na sjeveroistočnoj obali Jadrana. Združeni atmosfersko-kemijski modelski sustav često je korišten za analize donosa prašine na području Sredozemlja, ali prema našim saznanjima, ovo je prva analiza transporta prašine temeljena na numeričkim simulacijama s korištenjem mreže visoke razlučivosti na širem području istočnog Jadrana.

U cilju boljeg razumijevanja donosa prašine nad Jadran odabrana je i druga epizoda za simuliranje donosa prašine. Događaj se zbio u razdoblju 14.–19.9.2015. te je također popraćen vrlo velikim koncentracijama lebdećih čestica na jadranskoj obali. Oba simulirana događaja su odabrana i da ukažu na sličnosti i razlike utjecaja različitih izvora prašine. Tijekom rujanske simulacije provedeno je i testiranje različitih modula za simuliranje koncentracija PM unutar združenog modelskog sustava. Testiranje je bilo moguće zbog dostupnih prizemnih mjerenja koncentracije PM_{10} na postajama za praćenje kvalitete zraka na obali Jadranskog mora.

Klimatološkom analizom i primjenom združenog atmosfersko-kemijskog modelskog sustava na dvije epizode dat će se novi uvid u obilježja donosa prašine nad područje Hrvatske, osobito Jadrana.

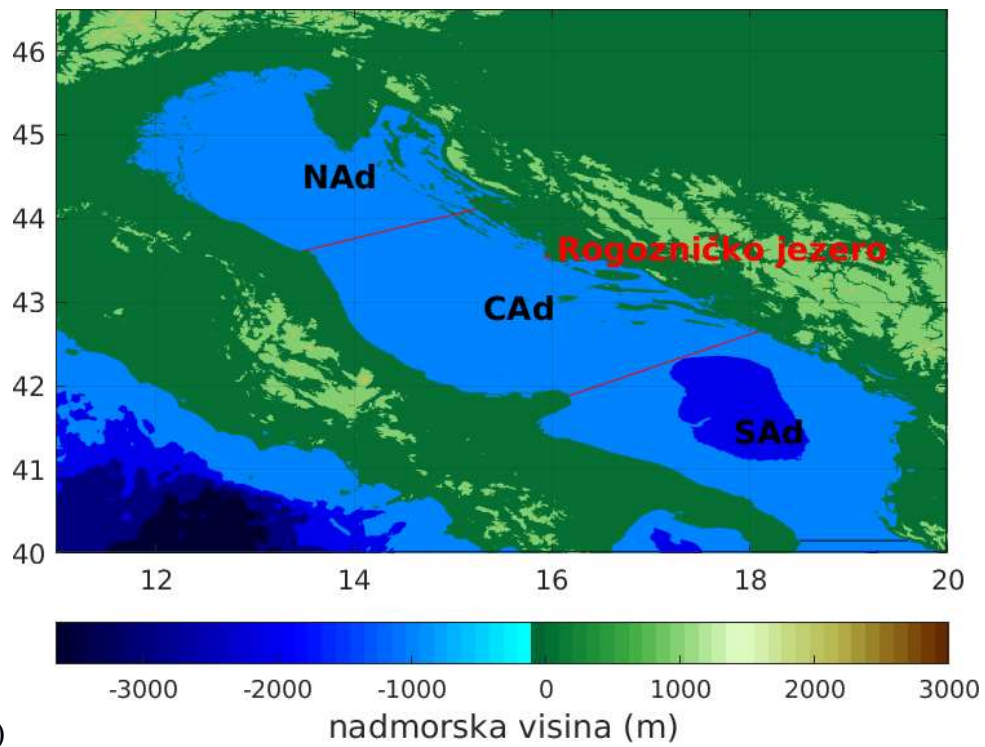
2. PODACI

2.1 Područje istraživanja

Jadransko more (Slika 2) razdvaja Balkanski i Apeninski poluotok, a proteže se od 40° N do 45° 47' N, te predstavlja najsjeverniji dio Sredozemlja. Glavne rijeke koje se ulijevaju u Jadran su Po, Soča, Krka, Neretva, Drin, Bojana, i Vjosë. Klimatske značajke prostora, prema Köppenovoj klasifikaciji, uključuju vlažnu suptropsku klimu (Cfa) s vlažnim ljetima i hladnim i sušnim zimama u sjevernoj polovici Jadrana. Prema jugu, klima odgovara sredozemnoj klimi vrućeg ljeta (Csa) (Šegota i Filipčić, 2003). Stanje atmosfere je prilično promjenjivo u proljeće (osobito u ožujku i travnju) i jesen (u studenome) zbog jake ciklonalne aktivnosti (Penzar i sur., 2001; Mikuš i sur., 2012; Belušić Vozila i sur., 2021) zbog razlika u putanjama ciklona (Horvath i sur., 2008) što uzrokuje brojne epizode intenzivnih oborina. Tada se javljaju najveće količine oborina te su usporedive s onima uočenim u blizini Južnih Alpa. Zbog toga se za potrebe analize u radnji područje Jadrana dijeli geografski na tri dijela: Sjeverni Jadran (NAd), Srednji Jadran (CAAd) i Južni Jadran (SAd) uvažavajući i dubinu samog bazena. Prevladavajući regionalni tipovi vjetera (npr. Belušić i sur., 2018) su iz sjeveroistočnog (bura) i jugoistočnog (jugo) smjera. Jugo donosi topao i vlažan zrak, često noseći saharску prašinu (Cushman-Roisin, 2001).

Smješteno na sredini istočne jadranske obale (CAAd; 43° 32' N, 15° 58' E; Slika 2a), Rogozničko jezero (Zmajevsko oko kod Rogoznice) je jedinstven morski sustav na jadranskoj, odnosno sredozemnoj obali. Jezero je tipičan primjer izrazito stratificiranog (prema temperaturi, gustoći i kemijskom sastavu) morskog sustava obilježenog trajnom anoksijom (ispod 8 m dubine). Rogozničko jezero je kraška depresija ispunjena morskom vodom, površine 10276 m² i najveće dubine do 15 m, te nema izravne veze s otvorenim morem. Slaba veza s morem postoji kroz šupljine u kraškom terenu, a jedini izvor slatke vode u jezero su atmosferske oborine koje izravno utječu na salinitet vodenog stupca jezera (Ciglonečki i sur., 2015). Područje oko jezera karakterizira ekstenzivan turizam, marikultura i slab utjecaj lokalnih industrijskih aktivnosti (Slika 2b). Postoji i kombinirani utjecaj dalekosežnog donosa zračnih masa i lokalnih emisija lebdećih čestica zbog požara na otvorenom tijekom ljeta (Cvitešić Kušan i sur., 2020). U Rogozničkom jezeru se često javlja vertikalno miješanje u ranu jesen (Ciglonečki i sur., 2015, 2017), ali se relativno brzo ponovno uspostavlja stratifikacija i jezero postaje izrazito sulfidno u pridnenim slojevima tijekom

10. ili 11. mjeseca uoči naredne epizode miješanja. Epizode izmješavanja vodenih slojeva u jezeru, posebnog onog anoksičnog, obogaćenog sulfidima utječe na specijaciju, dinamiku i taloženje redoks osjetljivih metala (Fe, Mo) (Helz i sur., 2011), čime se skraćuje vrijeme njihovog zadržavanja u vodenom stupcu.



(a)



(b)

Slika 2. (a) Topografska karta područja istraživanja. Područje Jadrana podijeljeno je na tri dijela uvažavajući klimatska obilježja područja (putanje ciklona i oborinski režim te dubinu mora). Podjela sadrži sjeverni dio Jadrana (NAd), srednji dio Jadrana (CAAd) i južni dio Jadrana (SAd). Označena je i lokacija Rogozničkog jezera. (b) Izgled Rogozničkog jezera (preuzeto s <https://miss7.24sata.hr/lifestyle/zmajev-oko-jezero-koje-mijenja-boju-caroban-je-prirodni-fenomen-pokraj-rogoznice-42331>).

2.2 Reanaliza MERRA-2

Podaci za optičku debljinu atmosfere (AOD) i taloženje prašine za potrebe ove radnje preuzeti su iz reanalize MERRA-2 (engl. *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2*; Buchard i sur., 2017). MERRA-2 sadrži podatke reanalize atmosfere s početkom od 1980. koristeći model GEOS-5 (engl. *NASA Goddard Earth Observing System, version 5*; Molod i sur., 2015) i sustav za asimilaciju mjerenih podataka temeljen na trodimenzionalnoj varijacijskoj analizi (Kleist i sur., 2009). Model GEOS-5 radijacijski je povezan s modelom lebdećih čestica GOCART (engl. *Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport model*; Colarco i sur., 2010), koji simulira pet vrsta lebdećih čestica (prašinu, morsku sol, sulfat te crni i organski ugljik). AOD je asimilirana iz satelitskih podataka i prizemnih mjerenja mreže AERONET (engl. *Aerosol Robotic Network*). Proces suhog taloženja lebdećih čestica uključuju gravitacijsko taloženje i taloženje izazvano turbulencijom, dok procesi mokrog taloženja podrazumijevaju konvektivno taloženje i mokro taloženje na velikoj skali. Talozenje lebdećih čestica izazvano oborinom ne simulira se iz modela već se bazira na asimiliranim podacima pri čemu se koristi korigirani oborinski produkt reanalize MERRA-2 (Reichle i sur., 2017) koji prema usporedbi s mjerenjima daje bolju prezentaciju dnevnog hoda oborine.

Podaci o lebdećim česticama iz reanalize MERRA-2 evaluirani su u nekoliko studija (npr. Buchard i sur., 2017; Reichle i sur., 2017; Wu i sur., 2020; Kok i sur., 2021a) na brojnim postajama smještenim diljem svijeta za nekoliko proteklih desetljeća. Nedavno su u radu Wu i sur. (2020) autori uspoređivali podatke reanalize s godišnjim mjerenjima taloženja na 84 postaje za razdoblje 1980.–2018. Uočeno je da reanaliza MERRA-2 zadovoljavajuće reproducira taloženje prašine na svim postajama, osim na većini postaja koje se nalaze u Južnom oceanu i na Antarktici, gdje je

taloženje precijenjeno. Buchard i sur. (2017) ustanovili su da odstupanja u taloženju prašine mogu proizaći iz netočnosti u prikazu vertikalnih profila prašine, raspodjele veličine lebdećih čestica i procesa taloženja prilikom korištenja algoritama asimilacije. Unatoč tome, evaluacija reanalize MERRA-2 (Wu i sur., 2020) iznad Europe (i Sredozemlja) pokazala je da je taloženje prašine iz reanalize MERRA-2 u dobrom slaganju s mjerenjima. Autori su izračunali i dobili velike koeficijente korelacije za taloženje prašine (0.89) i prizemnu koncentraciju prašine (0.91). Ovi rezultati sugeriraju da je MERRA-2 koristan izvor podataka za područje Sredozemlja, naročito za lokacije koje nisu obuhvaćene mjerenjima.

Podaci reanalize MERRA-2 dostupni su u mreži točaka razlučivosti $0.5^\circ \times 0.65^\circ$. Uzimajući u obzir dimenzije mreže koja obuhvaća područje Jadrana, sama razlučivost reanalize je pregruba za potrebe ovog istraživanja. Stoga je nad površinom Jadranskog mora napravljena prostorna interpolacija podataka reanalize MERRA-2 na novu, finiju mrežu točaka (razlučivosti otprilike $0.04^\circ \times 0.04^\circ$). Podaci o topografiji preuzeti su sa stranice: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/. Ovaj postupak ne daje točnije podatke u smislu procesa koji se u modelima mogu simulirati na mrežama finije razlučivosti, nego je napravljen u svrhu preciznije podjele Jadranskog mora na područja u skladu s postojećim spoznajama o klimatskim obilježjima atmosfere (Penzar i sur., 2001; Horvath i sur., 2008; Mikuš i sur., 2012; Belušić Vozila i sur., 2021) kako je prikazano na Slici 2a.

Uz analizu taloženja prašine, istraživanje je prošireno na utvrđivanje veza karakterističnih sinoptičkih situacija i pojave prašine nad Jadranom za razdoblje 1989.–2019. U cilju istraživanja odnosa između tipičnih izvora, smjerova atmosferske advekcije i transporta te prostorne razdiobe taloženja prašine u Jadransko more, korištene su dodatne informacije. One se sastoje od polja emisija i taloženja prašine (GMAO, 2015b), geopotencijalne visine 850-hPa plohe (GMAO, 2008), i AOD na 550 nm (GMAO, 2015c) što je također preuzeto iz reanalize MERRA-2. Ova 30-godišnja analiza dat će uvid u odnose, prvenstveno između intenziteta taloženja prašine i prostorne razdiobe polja geopotencijala, tj. sinoptičkih situacija.

2.3 Podaci mjerenja za evaluaciju reanalize MERRA-2

Uz podatke toka taloženja prašine iz reanalize MERRA-2, korišteni su i javno dostupni podaci iz mreže za uzorkovanje prašine uspostavljene za potrebe mjerne kampanje u okviru projekta CharMex (Vincent i sur., 2016; <https://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/>). Osnova mreže je poseban, standardizirani uzorkivač taloženja CARAGA (franc. *Collecteur Automatique de Retombées Atmosphériques insolubles à Grande Autonomie*; Laurent i sur., 2015). Zbog inače ograničenih mjerenja taloženja na širem području Sredozemlja, jedan od ciljeva ove studije bio je usporediti podatke taloženja reanalize MERRA-2 s mjerenjima CARAGA na tom području. U tu svrhu odabrano je pet postaja iz mreže CARAGA koje su ispunjavale sljedeće uvjete: (a) relativno malu geografsku udaljenost postaja u odnosu na područje istraživanja (Jadransko more), (b) dostupnost podataka u istraživanom razdoblju (2012–2015) i (c) korištenje istog mjernog instrumenta i metode obrade uzoraka. Mreža CARAGA sastoji se od pet postaja s instrumentima smještenim uglavnom na obalama otoka duž transekta jug-sjever; od sjeverne obale Afrike do jugoistočne Francuske (Tablica 1). Mreža pokriva najvjerojatnije putanje perjanica i transporta saharske prašine koje se mogu povezati s događajima taloženja u središnjem i zapadnom Sredozemlju.

Princip rada instrumenta na postajama temelji se na pretpostavci da je preko 80 % mase saharske prašine koja dopijeva u Sredozemno more sastavljeno od netopljivog materijala (Avila i sur., 2007). Materijal istaložen iz atmosfere skuplja se na filtrima unutar instrumenta, a nakon toga se provodi odvajanje mineralne prašine prema metodi koju je predložio Prospero (1999). Metoda se sastoji od stavljanja filtra u peć zagrijanu na 500 °C tijekom 14 sati prilikom čega se u procesu oksidacije uklanjaju organske čestice i čestice ugljika.

Iako su podaci reanalize MERRA-2 ispitivani i evaluirani u drugim studijama, u ovom radu su isti uspoređeni s mjerenjima toka taloženja prašine (u daljnjem tekstu radi jednostavnosti koristiti se izraz taloženje prašine) na odabranim postajama iz mreže CARAGA na tjednoj skali. Pritom je korišten skup raznih statističkih parametara. Skup uključuje veličine kao što su standardne devijacije za niz podataka taloženja iz reanalize (σ_m) i mjerenja (σ_o), korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), korijen srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSD), kao i pristranost (BIAS) i koeficijent korelacije (R). Metodologija usporedbe (npr. Pielke i Mahrer, 1978; Teixeira i sur.,

2014; Kehler-Poljak i sur., 2017) zasniva se na zadovoljavanju tri kriterija: (a) $\sigma_m \approx \sigma_o$, (b) $RMSE \lesssim \sigma_o$, i (c) $RMSD \lesssim \sigma_o$.

Tablica 1. Geografski položaji, razdoblje uzorkovanja i broj uzoraka na postajama iz mreže mjerenja CARAGA.

| | Le Casset | Friul | Corsica | Mallorca | Lampedusa |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| Lokacija | 44° 59' N, 6° 28' E | 43° 15' N, 5° 17' E | 43° N, 9° 21' E | 39° 15' N, 3° 03' E | 35° 31' N, 12° 37' E |
| Početak uzorkovanja | 19.5.2011. | 30.12.2010. | 16.2.2012. | 21.7.2011. | 22.9.2011. |
| Kraj uzorkovanja | 2.1.2014. | 2.1.2014. | 26.12.2013. | 19.12.2013. | 2.1.2014. |
| Broj tjednih uzoraka | 119 | 123 | 78 | 118 | 100 |

2.4 Izvori podataka optičke debljine aerosola za evaluaciju numeričkog združenog modela

Optička debljina aerosola AOD je optička veličina za mjerenje raspršenja ili apsorpcije sunčeve svjetlosti na lebdećim česticama uključujući i prašinu. Izračunava se kao integral koeficijenta ekstinkcije po visini te je bezdimenzionalna veličina. AOD čiste atmosfere iznosi oko 0.01, dok vrijednost 0.4 odgovara visokim koncentracijama prašine u atmosferi.

Optička svojstva korištena su za identifikaciju perjanica prašine i evaluaciju simulacija združenog numeričkog modela posebno za epizodu intenzivnog donosa prašine na područje Hrvatske u proljeće 2020. Kako bi se identificirao nastanak i prostorna razdioba prašine u atmosferi, mogu se koristiti satelitski podaci. Međutim, neodređenosti u mjerenjima proizlaze iz prisutnosti oblaka i/ili velikog sadržaja vodene pare u stupcu atmosfere (Schepanski i sur., 2012) u području od interesa tijekom epizoda prašine. Zato je u ovoj studiji umjesto satelitskih podataka korišteno polje optičke debljine AOD iz reanalize MERRA-2, koja je detaljnije opisana u poglavlju 2.2. Osim podataka za

AOD (GMAO, 2015d), za analizu sinoptičkih uvjeta dodatno su korištena i polja MERRA-2 za tlak na srednjoj razini mora i geopotencijal 500-hPa plohe (GMAO, 2015e).

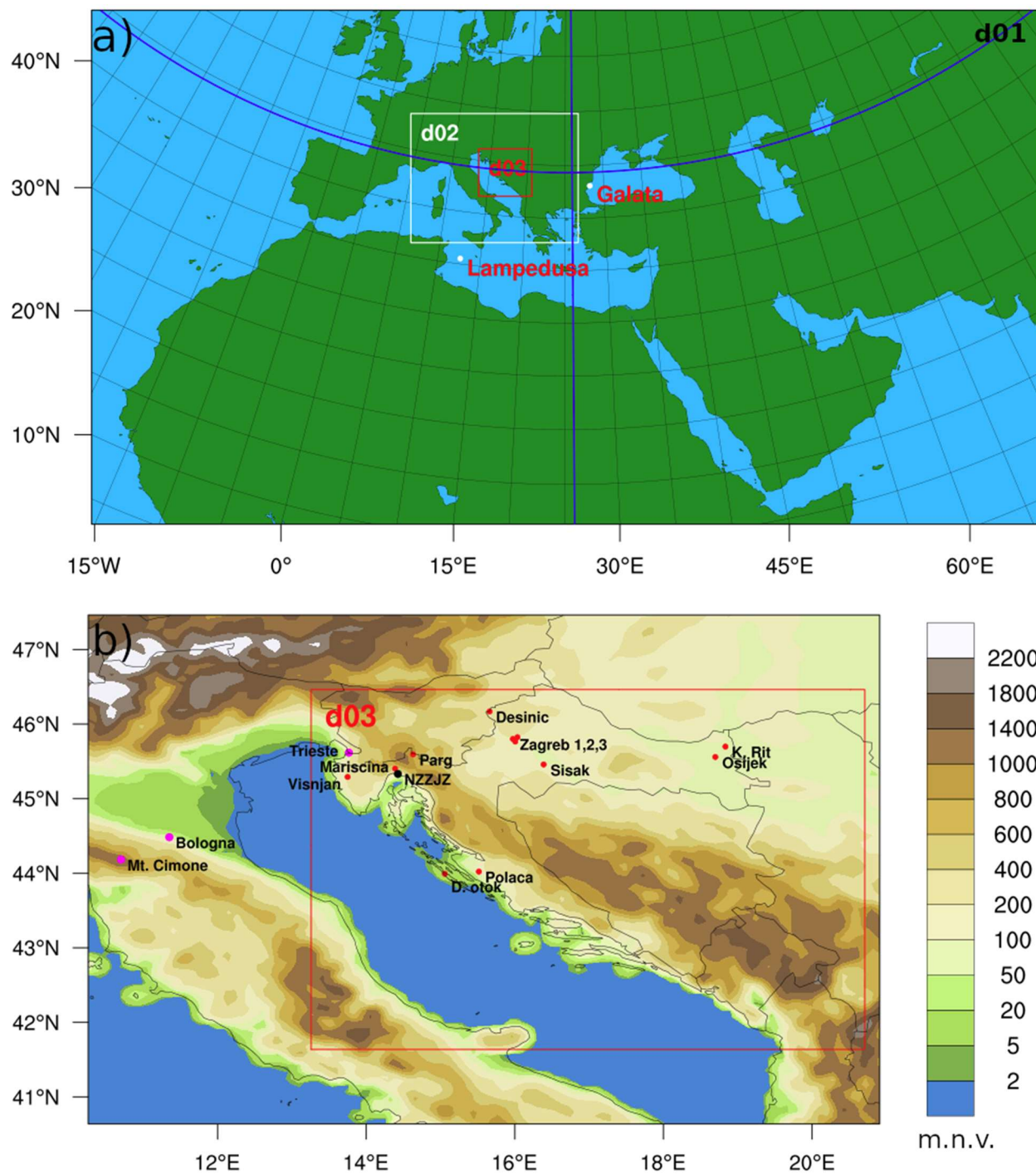
Za kvalitativnu usporedbu optičke debljine, AOD, dobivene združenim numeričkim modelom za epizodu iz 2020. godine s mjerenjima, korišteni su podaci s dvije postaje mreže AERONET-a: Lampedusa (35° 31' 1.2" N, 12° 37' 55.2" E) u blizini sjevernoafričkih izvora i Galata (43° 2' 42" N, 28° 11' 34.8" E) na zapadnoj obali Crnog mora (Tablica 2a, Slika 3a). Podaci s ove mreže korišteni su i za detaljniju evaluaciju rezultata združenog atmosfersko-kemijskog modelskog sustava za rujansku epizodu donosa prašine iz 2015., pri čemu su korišteni podaci sa osam postaja (Tablica 2b). AERONET je svjetska mreža solarnih fotometara (Holben i sur., 1998) koji mjere spektralnu ekstinkciju izravnog snopa sunčevog zračenja koristeći Beer-Lambert-Bouguerov zakon, a podaci su preuzeti na stranici <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

Iz združenog numeričkog modelskog sustava AOD je dostupan na četiri različite valne duljine (300, 400, 600, 999 nm), dok su mjerenja dostupna na širokom intervalu različitih valnih duljina. Za usporedbu rezultata između mjerenih i modeliranih vrijednosti AOD na 500 nm (za Lampeduzu) i 510 nm (za stanicu Galata) primjenjuje se Ångströmov zakon snage (kao u radu Kumar i sur., 2014). Pomoću ovog zakona se iz modeliranih vrijednosti AOD-a (a koje su dostupne na samo četiri valne duljine) računa AOD na valnoj duljini koja odgovara mjerenjima:

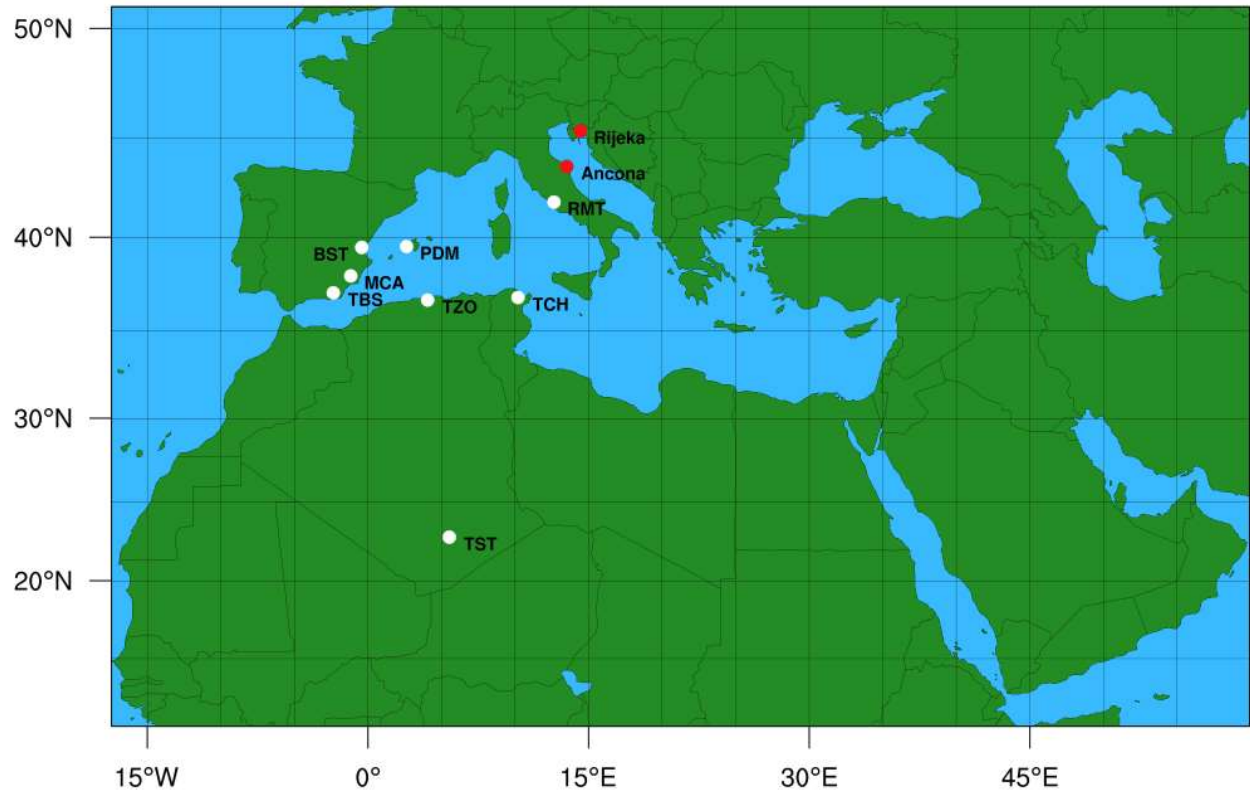
$$W(\lambda) = W(400) \left(\frac{\lambda}{400} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

gdje $W(\lambda)$ predstavlja AOD na valnoj duljini λ (500 ili 550 nm) iz združenog atmosfersko-kemijskog modelskog sustava, a α je Ångstromov eksponent koji se računa iz AOD-a na 300 i 999 nm također uzetih iz modelskog sustava (koji je opisan u poglavlju 3.3) korištenjem relacije:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{W(300)}{W(999)}\right)}{\ln\left(\frac{999}{300}\right)}. \quad (2)$$



Slika 3. Domena istraživanja i mjerne postaje: (a) lokacije postaja mreže AERONET (Galata i Lampedusa) unutar ugniježđenih domena WRF-Chem modelskog sustava (d01–d03); (b) topografska karta d03 (crveni pravokutnik) koja uključuje lokacije hrvatskih postaja za kvalitetu zraka s dostupnim satnim mjerenjima PM_{10} (Tablica 2a) i lokacije postaja iz rada Tositti i sur. (2022).



Slika 4. Domena istraživanja WRF-Chem modelskog sustava i lokacije mjernih postaja mreže AERONET (Tablica 2b). Hrvatske i talijanske postaje za kvalitetu zraka s dostupnim satnim mjerenjima PM₁₀ nalaze se u okolici gradova Rijeke i Ancone.

Tablica 2a. Podaci o postajama s kojih se uzimaju podaci za evaluaciju modela za epizodu iz 2020. Tipovi postaja su AERONET i postaja za praćenje kvalitete zraka, na kojima se mjere AOD i satna koncentracija PM₁₀. Postaje su klasificirane kao: UT-gradska prometna, UB-Gradska pozadinska, UI-gradska industrijska, RB-ruralna pozadinska. Lokacije postaja na karti nalaze se na Slici 3.

| Naziv Postaje | Parametar | Kratica | Koordinate |
|------------------------------|------------------|-----------|--------------------|
| Osijek-1 (UB) | PM ₁₀ | Osijek | 45.6 °N, 18.7 °E |
| Sisak-1 (UI) | PM ₁₀ | Sisak | 45.5 °N, 16.4 °E |
| Zagreb-1 (UT) | PM ₁₀ | Zg 1 | 45.8 °N, 15.97 °E |
| Zagreb-2 (UT) | PM ₁₀ | Zg 2 | 45.82 °N, 16.03 °E |
| Zagreb-3 (UB) | PM ₁₀ | Zg 3 | 45.76 °N, 16.0 °E |
| Desinić (RB) | PM ₁₀ | Desinić | 46.2 °N, 15.7 °E |
| Parg (RB) | PM ₁₀ | Parg | 45.6 °N, 14.6 °E |
| Viškovo-Marišćina (UI) | PM ₁₀ | Marišćina | 45.4 °N, 14.4 °E |
| Višnjan (RB) | PM ₁₀ | Višnjan | 45.3 °N, 13.7 °E |
| Polača (Ravni kotari) (RB) | PM ₁₀ | Polača | 44.0 °N, 15.5 °E |
| Vela straža (Dugi otok) (RB) | PM ₁₀ | D. Otok | 43.99 °N, 15.1 °E |
| Kopački rit (RB) | | K. Rit | 45.7 °N, 18.8 °E |
| Lampedusa | AOD | Lampedusa | 35.5 °N, 12.6 °E |
| Galata | AOD | Lampedusa | 43.05 °N, 28.2 °E |

Tablica 2b. Podaci o postajama s kojih se uzimaju podaci za evaluaciju modela za epizodu iz 2015. Tipovi postaja su AERONET i postaja za praćenje kvalitete zraka, na kojima se mjere AOD i satna koncentracija PM₁₀ (dodane su oznake za talijanske postaje, ITA i hrvatske, HR): UT-gradska prometna, UB-Gradska pozadinska, UI-gradska industrijska, RB-ruralna pozadinska. Lokacije postaja na karti nalaze se na Slici 4.

| Naziv Postaje | Parametar | Kratica | Koordinate |
|-------------------|------------------------|---------|----------------------|
| Burjassot | AOD | BST | 39.507 °N, 0.42 °W |
| Murcia | AOD | MCA | 38.001 °N, 1.171 °W |
| Tabernas PSA-DLR | AOD | TBS | 37.091 °N, 2.358 °W |
| Tizi-Ouzou | AOD | TZO | 36.699 °N, 4.056 °E |
| Tunis Carthage | AOD | TCH | 36.839 °N, 10.200 °E |
| Rome Tor Vergata | AOD | RMT | 41.840 °N, 12.647 °E |
| Palma de Mallorca | AOD | PDM | 39.553 °N, 2.625 °E |
| Tamanrasset | AOD | TST | 22.790 °N, 5.530 °E |
| Macerata (UB) | PM ₁₀ (ITA) | MCR | 43.286 °N, 13.428 °E |
| Civitanova (UB) | PM ₁₀ (ITA) | CVN | 43.336 °N, 13.674 °E |
| Genga (UB) | PM ₁₀ (ITA) | GNG | 43.469 °N, 12.951 °E |
| Chiaravalle (UB) | PM ₁₀ (ITA) | CHI | 43.6 °N, 13.342 °E |
| Urbino (UB) | PM ₁₀ (ITA) | URB | 43.733 °N, 12.628 °E |
| Pesaro (UB) | PM ₁₀ (ITA) | PSR | 43.893 °N, 12.919 °E |
| Urinj (UI) | PM ₁₀ (HR) | UNJ | 45.289 °N, 14.529 °E |
| Paveki (UI) | PM ₁₀ (HR) | PVK | 45.294 °N, 14.514 °E |

| | | | |
|----------------|-----------|-----|----------------------|
| Marišćina (UI) | PPKZ (HR) | MRS | 45.402 °N, 14.388 °E |
| Viševac (UI) | PPKZ (HR) | VIS | 45.369 °N, 14.384 °E |

2.5 Fizikalno-kemijski parametri u Rogozničkom jezeru i uzorku kiše

Vrijednosti saliniteta, temperature i otopljenog kisika zabilježene su tijekom uzorkovanja sondom za mjerenje termohalinih parametara (tzv. CTD sondom) na sredini Rogozničkog jezera. Željezo (Fe) iz kišnice i površinskog sloja Rogozničkog jezera mjereno je u filtriranim i nefiltriranim uzorcima metodom spektrometrije masa visoke rezolucije uz induktivno spregnutu plazmu (Helz i sur. 2011). Za filtraciju elemenata u tragovima korišten je vakuum filtracijski sustav s celulozno-nitratnim membranskim filtrom od 0.45 µm, dok su za filtraciju otopljenog organskog ugljika (DOC) korišteni filtri od staklenih vlakana, veličine pora 0.7 µm. Uzorci za POC (definiran kao organska tvar veća od 0.7 µm) ostali su na filtru. Koncentracije DOC-a i POC-a u kiši mjerene su metodom visokotemperaturne katalitičke oksidacije (engl. HTO) na instrumentu TOC-VCPH (Shimadzu, Japan). Površinska aktivnost DOC-a određena je elektrokemijskom metodom voltametrije izmjenične struje u van-faznom modu (Orlović-Leko i sur., 2020). Broj stanica fitoplanktona u uzorcima vode iz Rogozničkog jezera dobiven je metodom invertnog mikroskopa, postupkom opisanim u literaturi (Burić i sur., 2009; Ciglencečki i sur., 2015).

2.6 Mjerenja PM₁₀, kemijska analiza i podaci dobiveni skenirajućim elektronskim mikroskopom

Dnevna masena koncentracija PM₁₀ i masene koncentracije teških metala: olova (Pb), kadmija (Cd), bakra (Cu), cinka (Zn), željeza (Fe) i mangana (Mn) određene su u uzorku sakupljenom na kvarcni filter (Gelman, TE-QMA 8“x10“) koji je uzorkovan 24 sata pomoću uzorkivača velikog volumena usisa (Tish, PM10 High volume sampler, TE-6000) na (urbanoj prometnoj) postaji

NZZJZ²-a, (45° 19' 54" N 14° 25' 32" E, Slika 3b) na dan 27.3.2020. tijekom epizode ekstremnog povećanja koncentracije lebdećih čestica. Masena koncentracija PM₁₀ određena je gravimetrijskom metodom nakon kondicioniranja u trajanju 48 sata i vaganja filtra u prostoriji za vaganje s kontroliranim uvjetima relativne vlage (45–50 % relativne vlažnosti zraka) i temperature (19 – 21 °C). Filtar je izrezan na osam dijelova koji su kasnije korišteni za različite analize. Koncentracije teških metala (Pb, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn) dobivene su iz procesa mineralizacije filtra, a analiza je naknadno provedena spektrometrom masa uz induktivno spregnutu plazmu (NexION, 300X, PerkinElmer). Mineralizacija je provedena u mikrovalnoj pećnici (Ethos Easy, Milestone) pomoću ultračistih reagensa: dušične kiseline, klorovodične kiseline i vodikovog peroksida. Temperaturni program za mikrovalnu mineralizaciju sastoji se od zagrijavanja do 200 °C i održavanja te temperature 20 min. Otopina dobivena u mikrovalnoj pećnici je razrijeđena do 15 ml s potpuno deioniziranom ultračistom vodom (18 MΩ/cm otpornosti) koju proizvodi UltraClear System (Siemens). ICP-MS je kalibriran pomoću multi-elementarne standardne otopine (početni standard za provjeru kalibracije, Perkin Elmer), s koncentracijom koja varira između 3 i 200 µg/l, ovisno o njihovoj zastupljenosti u stvarnim uzorcima. Kalibracijski pravac imao je R=0.9999 za Cd, Zn,Cu, Pb, R=0.9998 za Mn i R = 0.9986 za Fe. Certificirani referentni materijal (Urban particulate matter, CRM 1648a, NIST) je korišten za izračun iskorištenja pojedinih elemenata (85-115%). Relativna standardna derivacija bila je RSD=3.3-8.8%. Granice detekcije metode (MDL) bile su: 0.06 ng/m³ za Mn, 0.36 ng/m³ za Fe, 0.00072 ng/m³ za Cd, 0.012 ng/m³ za Cu, 0.072 ng/m³ za Zn, te 0.012 ng/ m³ za Pb. Detaljno objašnjenje ovog postupka može se pronaći u radu Mifka i sur. (2021). Ostali dijelovi filtra korišteni su za određivanje koncentracija policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAU, engl. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH*) i morfološku karakterizaciju. Pojedinačni PAU-i određeni su ekstrakcijom filtra u spektrogradnom cikloheksanu (Merck, spectrograde), pročišćavanjem ekstrakta na stupcu silikagela i kvantitativnim određivanjem pomoću metode tekućinske kromatografije (high performance liquid chromatography-HPLC s kombinacijom UV i fluorescentnog detektora (Agilent 12060) na Hypersil-PAH koloni (Thermoquest). Kao mobilna faza korištena je smjesa acetonitrila (AcN) i vode u gradijentu: t=0-5 min: 50%AcN + 50% H₂O; t=25 min: 100% AcN, f= 2 l/min. (Alebić-Juretić, 2015). PAU-i koji su analizirani za ovu studiju su: naftalen (Nap), acenaften (Ace), fluoren (Fln), fenantren (Phe),

² Nastavni Zavod za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije (Krešimirova 52a, Rijeka, 45°19'54" N 14°25' 32" E, 32 m nadmorske visine)

antracen (Anth), fluoranten (Flo), piren (Py), krizen (Chr), benzo(a)antracen (BaA), benzo(b)fluoranten (BbF), benzo(k)fluoranten (BkF), benzo(a)piren (BaP), indeno(1,2,3-c,d)piren (IP), dibenzo(a,h)antracen (DBA) i benzo(g,h,i)perilen (BghiPe). Standardna smjesa PAU (PAH mixture SV Calibration Mix #5, No 31011 Restek) je korištena za kalibraciju instrumenta. Relativna standardna devijacija iznosila je RSD < 15%. Certificirani materijal CRM za PAU nije korišten (nedostupan), no iskorištenje je određeno nanošenjem standardne smjese na eksponirani filter te analizom tako pripremljenog uzorka. Iskorištenje pojedinih PAU bilo je od 81% za BkF do 109% za BbF, s izuzetkom lako hlapivog Phe gdje je iznosio tek 60%. Granice detekcije metode (Method detection limits -MDL) su bile: 0.0003 ng/m³ za Anth; 0.0001 ng/m³ za Phe i Py; 0.002 ng/m³ za BaA, BaP and BkF; 0.003 ng/m³ za Chr; 0.004 ng/m³ za BbF, DBA i BghiPe; te 0.006 ng/m³ za Flu and IP.

Morfološka karakterizacija provedena je na osmini filtra pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM JSM-7800F, Jeol Ltd., Japan) opremljenim energijski disperzivnim spektrometrom X-zraka (EDS) za kvalitativnu analizu X-zraka pomoću kojeg je određen elementni sastav čestica.

Za evaluaciju modela za epizodu iz ožujka 2020. preuzete su satne vrijednosti PM₁₀ s 12 postaja za kvalitetu zraka (Tablica 2a, Slika 3b) koje su dostupne u Ministarstvu gospodarstva i održivog razvoja (<http://iszz.azo.hr/iskzl/index.html>). Ista baza podataka korištena je i za evaluaciju simulacije rujanske epizode iz 2015., gdje su PM₁₀ satne vrijednosti dobivene s četiri postaje NZZJZ-a na području grada Rijeke i bliže okolice (Tablica 2b, Slika 4). Dodatno su korišteni i javno dostupni podaci talijanske regionalne agencije za zaštitu okoliša regije Marche (<http://85.47.105.98:16382/>) za područje okolice grada Ancone radi usporedbe na zapadnoj obali Jadrana.

3. METODOLOGIJA

3.1 Empirijske ortogonalne funkcije

Empirijske ortogonalne funkcije (EOF) ili analiza glavnih komponenti (engl. *Principal Component Analysis*, PCA) tehnika je multivarijantne analize kojom se nalaze dominantni modovi varijabilnosti dobiveni iz statističkog polja (von Storch i Zwiers, 1999). Obično se primjenjuje na dugačke vremenske nizove izmjerениh ili modeliranih varijabli u više točaka na širem prostoru koji se tom metodom dijele u međusobno ortogonalne svojstvene vektore (prostorni modovi). Prvi mod objašnjava najveći postotni udio varijance izvornog skupa podataka, a potom uzastopce slijede preostali modovi, pri čemu svaki objašnjava najveću moguću preostalu količinu varijance. Za svaki mod EOF-a pridjeljuje se vremenski niz koeficijenata (glavne komponente, tj. *Principal Components* ili PC-ovi). Pozitivne vrijednosti PC-a nazivaju se pozitivnom fazom, a negativne vrijednosti negativnom fazom. U ovoj studiji, EOF se koristi za izdvajanje dominantnih “sinoptičkih modova” u području (20°N, 20°W; 50°N i 35°E) od 1.12.1989. do 30.11.2019. koristeći geopotencijal 850-hPa plohe iz reanalize MERRA-2. Sličan (tj. EOF) pristup proveli su Schepanski i sur. (2016) za razdoblje lipanj-srpanj tijekom 1979–2015 koristeći podatke geopotencijala izobarnih ploha 700-hPa i 850-hPa iz reanalize ERA-Interim. Njihova studija ukazala je na bolju korelaciju između prizemnog vjetra i onoga na visini 850-hPa plohe nego one između vjetra prizemnog sloja i 700-hPa plohe. U ovoj studiji EOF izračunat je preliminarno za obje izobarne plohe (tj. 700-hPa i 850-hPa) pri čemu su dobiveni prostorni modovi zanemarivih razlika (nije prikazano). Stoga je, slično kao i u navedenom radu, uzeta u obzir analiza na 850 hPa u svrhu identificiranja karakterističnih sinoptičkih oblika povezanih s emisijom, atmosferskom advekcijom i transportom, te taloženjem saharske prašine u Jadransko more.

3.2 Putanje i mineraloška baza

Za procjenu količine hranjivih tvari u prašini istaloženoj u Jadransko more i Rogozničko jezero (27.5.2019.) korištene su mineraloške baze podataka GMINER30 i FERRUM30 (Nickovic i sur., 2012, 2013). Baze podataka predstavljaju globalne postotke određenih minerala u tlu i mapirane

su na mrežu točaka razlučivosti 30'' (~ 900 m). Za određivanje područja izvora prašine, polja emisije MERRA-2 kombinirana su s modelom HYSPLIT koji daje proračun putanja unazad (Stein i sur., 2015). Putanje je moguće proračunati u sklopu sustava *Real-time Environmental Applications and Display sYstem* (READY) (Stein i sur., 2015). Meteorološka polja korištena za izračun putanje su preuzeta iz arhiviranog modela NCEP Global Assimilation System (GDAS). Dodatno, u ovom doktorskom radu putanje HYSPLIT (unatrag i unaprijed) koriste se za analizu epizoda koje su simulirane združenim numeričkim modelom.

3.3 Model WRF-Chem i izbor epizoda donosa prašine na područje Jadrana

Uz analizu klimatologije taloženja prašine u Jadran, u ovom doktorskom radu odabrane su dvije epizode donosa prašine na područje Jadrana (i Hrvatske) i one su detaljnije analizirane, prvenstveno pomoću numeričkih simulacija. Pri tome je korišten model WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) verzije 3.7.1 (Skamarock i sur., 2008) združen s kemijskim (Chem) modelom (Grell i sur., 2005). Budući da se modeli WRF te WRF-Chem nalaze u širokoj upotrebi znanstvene zajednice (npr. Telišman Prtenjak i sur., 2009, 2013; Teixeira i sur., 2014; Kehler-Poljak i sur., 2017; Toro i sur., 2019; Gašparac i sur., 2020) te se kontinuirano razvijaju (više detalja na <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>), za potrebe ovog dokorskog rada navode se samo osnovne značajke modelskog sustava.

Model WRF numerički rješava sustav primitivnih jednadžbi uz pretpostavku nehidrostatičnosti i aproksimaciju kompresibilnosti na mreži točaka, horizontalno na Arakawa-C mreži i vertikalno korištenjem koordinate koja prati topografiju. U modelu su dostupne različite kartografske projekcije, a postoji i mogućnost uvođenja ugniježđenih domena s finijim razlučivanjem preko područja interesa. Moguće je koristiti jednosmjerne ili dvosmjerne opcije ugniježđivanja (engl. *one-way or two-way nesting*). Model se integrira pomoću metode konačnih razlika Runge-Kutta s vremenskim korakom 2. i 3. reda i uz opcije za advekciju od 2. do 6. reda (horizontalne i vertikalne). Prognostičke varijable su u skalarnom obliku toka, a postoji i advekcijaska opcija za vlažnost atmosfere, skalare i kinetičku energiju turbulencije. Model je prikladan za brojne izbore različitih fizikalnih shema kao što su parametrizacije kratkovalnog i dugovalnog zračenja prizemnog i graničnog sloja atmosfere, mikrofizičkih značajki oblaka, kao i kumulusna

parametrizacija itd. Združivanje s kemijskim modelom odvija se istovremeno (*engl. online*) tijekom proračuna i mogu se odabrati različiti kemijski moduli. Budući da je glavni cilj ovog rada analiza prašine u atmosferi, glavni fokus modeliranja također će biti na lebdećim česticama.

U ovom doktorskom radu odabrane su dvije epizode koje su izabrane radi povišenja izmjerenih koncentracija PM₁₀ na području Jadrana. To se naročito odnosi na prvu epizodu kada je izmjerena dnevna vrijednost na postaji NZZJZ-a bila za preko 4 puta veća od propisane granične vrijednosti (Tablica 3). Također, izbor ove dvije epizode je napravljen u skladu s dominantnim sinoptičkim obrascima koji su pronađeni u klimatološkoj analizi u sklopu ovog doktorskog rada.

Tablica 3. Odabir epizoda za simuliranje združenim modelskim sustavom na temelju povećanih koncentracija PM₁₀ na postaji NZZJZ.

| Odabrane epizode | Maksimalne dnevne koncentracije PM₁₀ (µg m⁻³) na NZZJZ | Razdoblje epizode (simulirano) | Hipoteza o potencijalnom izvoru prašine |
|-------------------------|---|---------------------------------------|--|
| ožujak 2020. | 216.3 na dan 27.3.2020. | 23.3.–31.3.2020. | Pustinje istočno od Kaspijskog mora (Aralkum) i Sahara |
| rujan 2015. | 53 – 65 (tal. postaje) i 65 (hrv. postaje) ³ na dan 18.9.2015. | 10.9.–22.9.2015. | Sahara |

³ te vrijednosti dobivene su iz dostupnih satnih mjerenja PM₁₀

3.3.1 Postavke modela WRF-Chem za epizodu iz ožujka 2020.

Tri ugniježdene domene u združenom, istovremenom načinu rada definirane su s mrežnim koracima od 27 km u najvećoj domeni d01, 9 km u d02 i 3 km u najfinijoj domeni, d03. Sve horizontalne mreže koriste istu vertikalnu mrežu razdjeljenu s 51 vertikalnom razinom. Vanjska domena d01 ima 370×200 točaka na širem području koje pokriva sjevernu Afriku, srednju Aziju i Europu (Slika 3a). Srednja domena d02 pokriva područje južne i jugoistočne Europe i središnjeg Sredozemlja, a najfinija d03 područje Jadrana i dijela Hrvatske. Simulacija počinje 19.3.2020. u 12 UTC i završava 31.3.2020. u 18 UTC. Prva tri dana izuzeta su iz evaluacije dozvoljavajući da model postigne svoju ravnotežu (engl. *spin-up*). Meteorološki početni i rubni uvjeti preuzeti su iz operativne analize modela ECMWF⁴-a s mreže razlučivosti $0.125^\circ \times 0.125^\circ$.

Fizikalni procesi u modelu simuliraju se odabirom dostupnih parametrizacija (Tablica 4). Za parametrizaciju turbulencije u graničnom sloju i površinskom sloju odabrana je shema Mellor-Yamada-Nakanishi i Niino na razini 2.5 s prognostičkom kinetičkom energijom turbulencije (Nakanishi i Nino, 2009). Za dugovalno i kratkovalno zračenje odabrana je shema *Radiative Rapid Transfer Model* (Iacono i sur., 2008). Mikrofizički procesi u modelu simulirani su Morrisonovom shemom dvostrukog momenta (Morrison i sur., 2005). Izabrana parametrizacija modela tla je Noah (Chen i Dudhia, 2001) koja simulira temperaturu i vlagu unutar četiri sloja u tlu. U postupku inicijalizacije modela i usklađivanja početnih meteoroloških polja koristi se tehnika 4-D asimilacije podataka. Ovom metodom polja vjetra, temperature i vlage u modelu prilagođavaju se rubnim uvjetima (Lo i sur., 2008; Kumar i sur., 2014). Unutar graničnog sloja atmosfere, 4-D asimilacija podataka se ne primjenjuje kako bi se izbjegle interferencije s mezoskalnim forsiranjem u modelu što je važno za razvoj samog graničnog sloja (Choobari i sur., 2012; Cremades i sur., 2017).

Za modeliranje lebdećih čestica u ovoj simulaciji odabran je modul GOCART (engl. *Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport* model; Ginoux i sur., 2001). Ovaj modul simulira pet glavnih tipova troposferskih lebdećih čestica: sulfata, organski ugljik, crni ugljik, prašinu i morski aerosol. Pustinjska prašina je predstavljena u pet frakcija s efektivnim polumjerima u rasponu od 0.73 do 8.0 μm . Emisija prašine oslanja se na formulaciju

⁴ model Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena

Gillettea i Passija (1988) koja se temelji na prizemnoj (10 m) brzini vjetra i graničnoj brzini nakon koje počinje erozija vjetrom:

$$F_p = \begin{cases} C S S_p u_{10m}^2 (u_{10m} - u_t) & \text{if } u_{10m} > u_t \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3)$$

gdje F_p ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) predstavlja emisiju prašine svake veličinske frakcije p , a C je empirijska konstanta koja u ovom istraživanju nije modificirana kao što je slučaj kod nekih drugih autora (npr. Kumar i sur., 2014). Pojednosti o izračunu praga za brzinu vjetra (u_t) mogu se pronaći u radu Ginoux i sur. (2001). Radi nedostatka detaljnijih informacija o aluvijalnim naslagama, u GOCART modelu se koristi pojednostavljenje u vidu tzv. funkcija izvora (engl. *source function*), tj. S . Funkcija izvora temelji se na pretpostavci da je sediment najviše zastupljen u topografskim dolinama i depresijama. S je vjerojatnost da se akumulirani sedimenti nalaze u ćeliji mreže nadmorske visine z_i , a z_{max} i z_{min} su maksimalna i minimalna elevacija na području veličine $10^\circ \times 10^\circ$ (topografija u modelu je statičko polje razlučivosti $1^\circ \times 1^\circ$). Veličina ovog područja odabrana je zato što je većina hidroloških bazena u sušnim područjima veličine od otprilike 10° . Stoga je rezultirajući izraz za S :

$$S = \left(\frac{z_{max} - z_i}{z_{max} - z_{min}} \right)^5 \quad (4)$$

U WRF-Chem modelu globalna razdioba S je dio statičkih ulaznih polja o topografiji koje koristi model WRF. Uklanjanje prašine iz atmosfere sastoji se od suhog i mokrog taloženja. Suho taloženje predstavlja turbulentni prijenos i gravitacijsko taloženje, dok mokro taloženje uključuje kišu i ispiranje unutar i ispod oblaka. Više detalja može se pronaći u radovima Chin i sur. (2000) i Ginoux i sur. (2001).

Tablica 4. Popis odabranih parametrizacija u WRF-Chem modelu

| Parametrizacija | Izbor sheme u WRF-Chem modelu |
|-----------------------------|--|
| Kratkovalno zračenje | Radiative Rapid Transfer Model (Iacono i sur., 2008) |
| Dugovalno zračenje | Radiative Rapid Transfer Model (Iacono i sur., 2008) |
| Model tla | Noah Land Surface Model (Chen i Dudia, 2001) |
| Granični sloj (PBL) | Mellor-Yamada-Nakaniski i Niino, nivo 2.5 (Nakanishi i Nino, 2009) |
| Prizemni sloj | Mellor-Yamada-Nakaniski i Niino (Nakanishi i Nino, 2009) |
| Mikrofizika | Morrison Double Moment (Morrison i sur., 2005) |
| Emisija prašine | GOCART (Ginoux i sur., 2001) |

3.3.2 Postavke modela WRF-Chem za epizodu iz 2015.

Za potrebe ove epizode domena modela (Slika 4) definirana je na Mercatorovoj projekciji sa središtem na 33° N i 21.25° E. Horizontalna razlučivost mreže je 50 × 50 km² sa 150 × 95 točaka i 50 vertikalnih nivoa do 50 hPa. Statička polja topografije preuzeta su iz podataka Službe za geološka istraživanja Sjedinjenih Država na razlučivosti 30'' (~ 900 m), a ona zemljišnog pokrova preuzeta su iz skupa podataka MODIS-a (engl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Simulacija počinje 7.9.2015. u 12 UTC, a završava 22.9. u 00 UTC. Rubni i početni meteorološki uvjeti za WRF-Chem preuzeti su iz operativne analize modela ECMWF na mreži horizontalne razlučivosti 0.125° × 0.125° sa 26 izobarnih ploha te se pozivaju svakih 6 sati tijekom rada modela. Izbor parametrizacija za ovu simulaciju isti je kao i za epizodu iz 2020. (Tablica 4), te je primijenjena tehnika 4-D asimilacije podataka na polja temperature, vlage i horizontalnog vjetra. Kao i za prethodnu simulaciju, ova tehnika se ne primjenjuje unutar atmosferskog graničnog sloja (Deng i sur., 2006; Kumar i sur., 2014). Iznimka je napravljena za jedan test osjetljivosti, što je

opisano kasnije u tekstu.

Za simulaciju kemijskih procesa plinovite faze u modelu WRF-Chem se koristi kemijski mehanizam modela MOZART-4 (engl. *Model for Ozone and Related Chemical Tracers*; Emmons i sur., 2010). Za potrebe ovog istraživanja provedeni su testovi osjetljivosti koji se baziraju na upotrebi dva različita modula za lebdeće čestice u kombinaciji s MOZART mehanizmom za plinovitu fazu. U prvom slučaju koristi se GOCART modul (Chin i sur., 2000; Pfister i sur., 2011; opisan je u pogl. 3.3.1). Da bi se simulirala interakcija lebdećih čestica simuliranih modulom GOCART i zračenja, ukupna masa lebdećih čestica pretvara se u 8 veličinskih razreda modalne razdiobe (Kumar i sur., 2014). U drugom slučaju koristi se modul MOSAIC (engl. *Model for Simulating Aerosols Interactions and Chemistry*; Zaveri i sur., 2008). Početni i bočni rubni uvjeti za kemijske parametre uzimaju se tijekom trajanja simulacije svakih šest sati iz globalnog modela MOZART-4 (Emmons i sur., 2010).

Nadalje, u kombinaciji s dva različita modula za simulaciju lebdećih čestica, provedeni su testovi osjetljivosti s obzirom na utjecaj rubnih uvjeta za prašinu iz globalnog modela MOZART-4. U jednom slučaju se oni koriste, a u drugom su isključeni, tako da se u kombinaciji s testiranjem različitih modula za lebdeće čestice dobivaju ukupno četiri testa osjetljivosti (Tablica 5). Na temelju njih provodi se evaluacija s obzirom na mjerenja AOD na postajama AERONET-a te mjerenja PM₁₀ na postajama za praćenje kvalitete zraka (Slika 4, Tablica 2b).

Tablica 5. Popis testova osjetljivosti i kratice.

| | MOZART-GOCART | MOZART-MOSAIC |
|--|---------------|---------------|
| Koriste se rubni uvjeti za prašinu iz modela MOZART-4 | MCON | MMON |
| Ne koriste se rubni uvjeti za prašinu iz modela MOZART-4 | MCOFF | MMOFF |

Za simulaciju se koristi baza podataka za antropogene emisije (Janssens-Maenhout i sur., 2015). Ova baza podataka sastavljena je iz godišnjih i mjesečnih regionalnih karata. Emisije su dostupne

na mreži točaka razlučivosti $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ za razdoblje 2008–2010 te za komponente: SO_2 , NO_x , CO , NMVOC , NH_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, BC i OC . Utjecaj na koncentraciju lebdećih čestica imaju i biogene emisije iz kopnenih ekosustava koje se u modelu računaju pomoću modela MEGAN (engl. *Model of Emissions of Gases and Aerosol from Nature*, verzija 2.04; Guenther i sur., 2006). Suho taloženje plinova simulira se Weselyjevom shemom (Wesely, 1989), dok je za simulaciju procesa fotolize izabrana shema koju je razvio Madronich (1993).

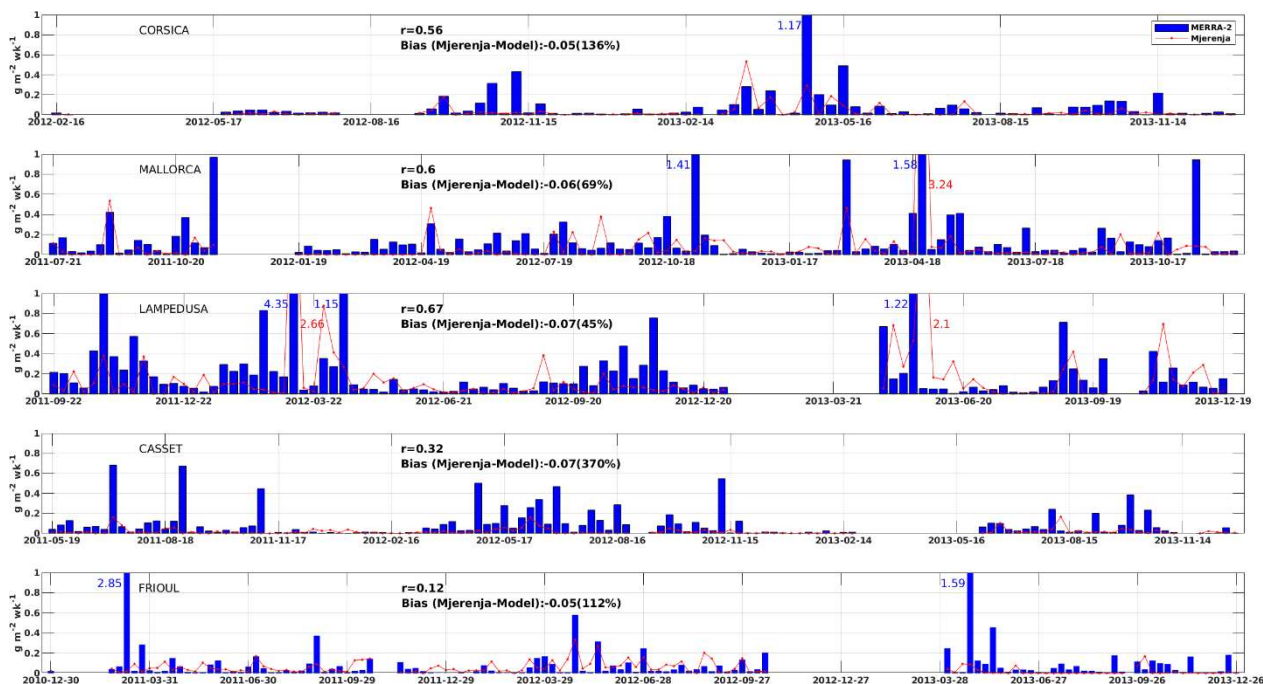
4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1 Klimatološka obilježja taloženja saharske prašine u Jadransko more i potencijalni utjecaj na biološku produkciju

4.1.1 Usporedba reanalize MERRA-2 i prizemnih mjerenja taloženja prašine

Podaci ukupnog taloženja na Jadranu, dobiveni iz reanalize MERRA-2, najprije su uspoređeni s dostupnim mjerenjima geografski najbližih lokacija na Sredozemlju. U tu svrhu koriste se mjerenja mreže CARAGA uzorkovana od 30.12.2010. do 2.1.2014. Međutim, valja spomenuti da razdoblje uzorkovanja nije bilo isto za sve postaje (Tablica 1). U statističkoj analizi, korištenjem t-testa ($p < 0.05$), Pearsonovi koeficijenti korelacije su se pokazali značajnim za sve postaje osim za postaju Frioul. Moguće je da je postaja Frioul (koja se nalazi na najvećoj udaljenosti od sjevernoafričke obale u odnosu na druge postaje) bila pod utjecajem lokalnih mineralnih izvora. Ova tvrdnja se zasniva na istraživanju Vincent i sur. (2016) pri čemu je lokalni utjecaj posebno izražen tijekom epizoda jakog vjetera i slabog transporta iz Sahare. Osim toga, na postajama Frioul i Le Casset, antropogene emisije mineralnog refraktivnog materijala mogu doprinijeti taloženju netopivog materijala. Visoka korelacija između podataka za taloženje iz reanalize MERRA-2 i mjerenja postignuta je za postaje Corsica, Mallorca i Lampedusa (Slika 5, Tablica 6, $r = 0.6 - 0.7$), dok je najniža (ali još uvijek značajna) korelacija bila za postaju Le Casset ($r = 0.32$).

Slijedeći predloženu metodologiju usporedbe iz poglavlja 2.3, taloženje iz reanalize MERRA-2 je u dobrom slaganju s mjerenjima na postajama Lampedusa i Mallorca (Tablica 6), koje su u blizini sjevernoafričke obale. Na Korzici su vrijednosti iz reanalize MERRA-2 imale varijabilnost približno dvostruko veću od izmjerenih (tj. $\sigma_m = 2.06 \sigma_o$, a sličan je odnos između RMSE i RMSD naspram σ_o), dok su na postajama Le Casset i Frioul ovi omjeri imali približnu vrijednost oko 5. Čini se da na svim postajama MERRA-2 precjenjuje masu istaložene prašine za $0.05 - 0.07 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$. Dodatno, za procjenu uspješnosti reanalize, izračunat je omjer kvadrata pristranosti i RMSE (kao u Teixeira i sur., 2014). U savršenom slučaju, ova vrijednost je nula, što je gotovo zadovoljeno na postajama Mallorca, Lampedusa i Frioul, dok je najveća vrijednost bila na postajama Le Casset, a zatim na Corsici (Tablica 6).



Slika 5. Vremenski nizovi izmjenjenog ukupnog mokrog (TW) + ukupnog suhog (TD) taloženja prašine (DEP) iz pet postaja mreže CARAGA (Vincent i sur., 2016) i renalize MERRA-2 od 30.12.2010. do 2.1.2014. Usporedba mjerenja i podataka MERRA-2 (Model) prikazana je s dva parametra: pristranost (BIAS (Mjerenja – Model)) i Pearsonovim koeficijentom korelacije. Najintenzivnije vrijednosti taloženja navedene su tekstualno, plavom bojom za MERRA-2 i crvenom bojom za mjerenja.

Neodređenosti u reanalizi mogu biti povezane s: (i) asimilacijom podataka za meteorologiju i lebdeće čestice, što utječe na transport i taloženje prašine u MERRA-2 (Buchard i sur., 2017; Wu i sur., 2020), te (ii) zbog metodologije provođenja mjerenja. Prije no što se upotrijebi za izračun mokrog taloženja lebdećih čestica iznad kopna i oceana, oborina generirana modelom u MERRA-2 je korigirana s mjerenjima (Gelaro i sur., 2017; Reichle i sur., 2017). Iako je pri tome trenutak u danu s maksimalnom oborinom naslijeđen od MERRA (model) i ponekad je nerealan (Gelaro i sur., 2017), dnevni hod korigirane oborine iz MERRA-2 ima razumne amplitude u usporedbi s neovisnim mjerenjima. Nadalje, za asimilaciju lebdećih čestica u reanalizu MERRA-2 u obzir se uzimaju samo mjerenja AOD-a. AOD je 2-D polje i ne uzima u obzir različite vrste niti raspodjelu frakcija lebdećih čestica. Stoga, neodređenosti u određivanju vertikalnih profila prašine, raspodjele

veličine i vrste lebdećih čestica mogu dovesti do pogrešne reprezentacije taloženja prašine. Budući da je AOD jedini asimilirani parametar i ako model ima pristranost u jednoj komponenti lebdećih čestica, to može dovesti do odstupanja u taloženju prašine (Wu i sur., 2020). U ovom slučaju, najveći omjer modelirane i promatrane standardne devijacije ($\sigma_m \approx 5\sigma_o$) je na postajama Frioul i Le Casset koje se nalaze u blizini gradskog i industrijskog područja u Francuskoj, odnosno Švicarskoj. Navedene postaje mogu biti pod utjecajem emisija lebdećih čestica antropogenog podrijetla kao što je izgaranje (Vincent i sur., 2016), što može dovesti do spomenute pristranosti u modelu. Dodatno, mogući uzrok neodređenosti u mjerenjima taloženja prašine može biti prisutan zbog metodologije izvođenja mjerenja na postajama CARAGA (Laurent i sur., 2015). Gubitak čestica tijekom rukovanja filtrima je moguć, posebno za filtre s velikim depozitom lebdećih čestica. Također, netočnosti u procjeni mase mineralne prašine mogu nastati prilikom vaganja filtara (mjerna neodređenost za masu manja je od 10^{-3} g) i tijekom procesa paljenja (gubitak pri spaljivanju može varirati između 0.2 % – 18 %, ovisno o sastavu minerala) (Laurent i sur., 2015). Međutim, uzimajući u obzir opći nedostatak dostupnih mjerenja taloženja, relativno kratko razdoblje mjerenja na postajama mreže CARAGA i moguće izvore neodređenosti asimilacije u reanalizu MERRA-2, rezultati su prilično dobri, što rezultira visokim i značajnim koeficijentima korelacije. Ova usporedba otkriva da MERRA-2 simulira taloženje na razuman i prihvatljiv način, te se može koristiti u svrhu procjene utjecaja taloženja prašine na Jadranu.

Tablica 6. Evaluacija reanalize MERRA-2 s mjerenjima taloženja prašine skupljenim na mreži postaja CARAGA ($\text{g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$). Za svaku postaju izračunati su sljedeći parametri za taloženje prašine: srednja vrijednost iz mjerenja (D_o) i reanalize MERRA-2 (D_m), standardne devijacije (σ_o , σ_m), korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), korijen srednje kvadratne pogreške nakon uklonjene konstantne pristranosti (RMSD), omjer modelirane i opažene standardne devijacije, omjeri RMSE, RMSD i opažene standardne devijacije, omjer kvadrata pristranosti (BIAS) i kvadrata RMSE, Pearsonov koeficijent korelacije (R) i pristranost (BIAS).

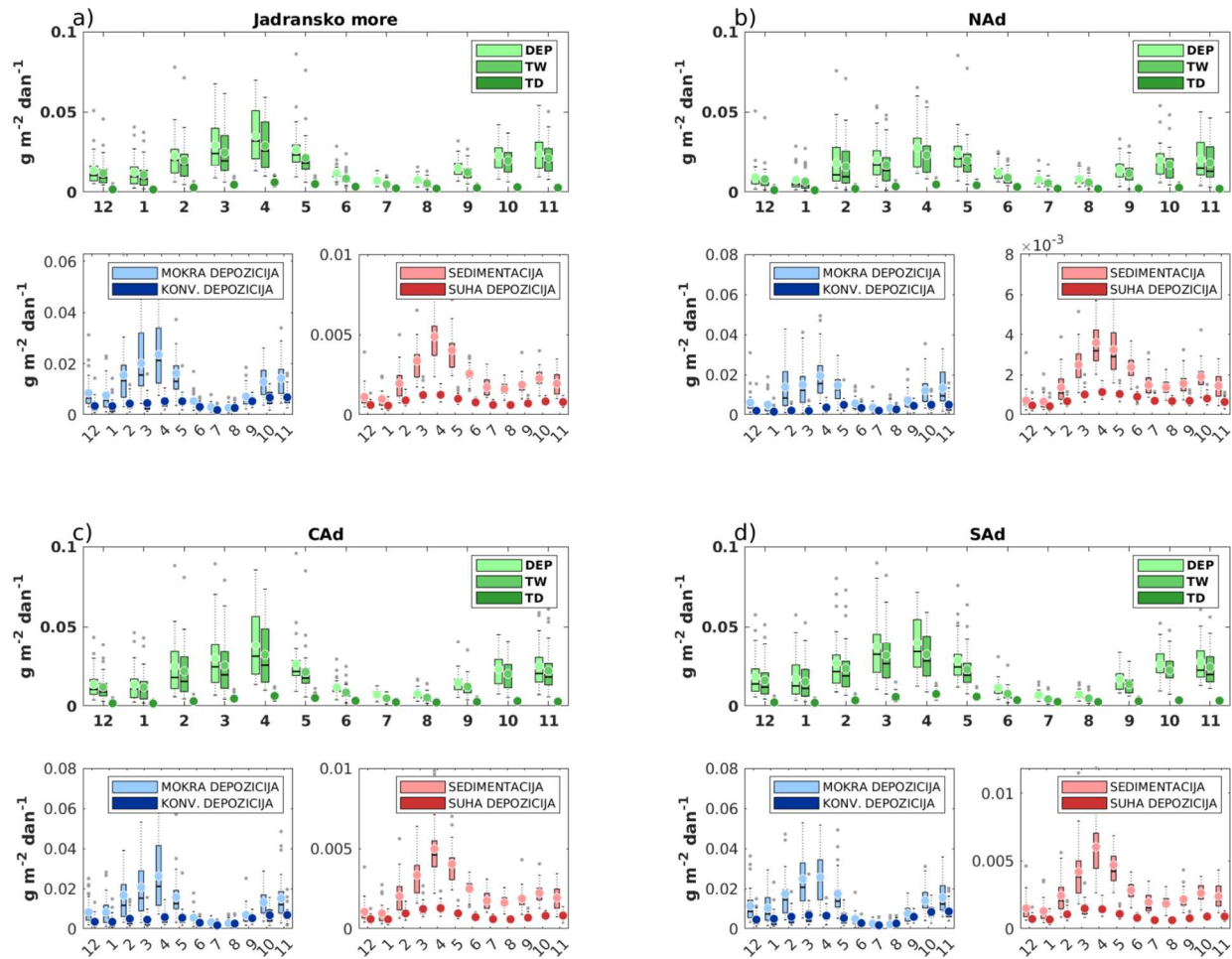
| POSTAJA | D_o | D_m | σ_o | σ_m | RMSE | RMSD | σ_m/σ_o | $RMSE/\sigma_o$ | $RMSD/\sigma_o$ | $BIAS^2/RMSE^2$ | R | BIAS |
|-----------|-------|-------|------------|------------|------|------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-------|
| CORSICA | 0.03 | 0.08 | 0.08 | 0.16 | 0.14 | 0.13 | 2.03 | 1.78 | 1.68 | 0.11 | 0.56 | -0.05 |
| MALLORCA | 0.08 | 0.14 | 0.31 | 0.24 | 0.26 | 0.25 | 0.79 | 0.84 | 0.82 | 0.05 | 0.6 | -0.06 |
| LAMPEDUSA | 0.16 | 0.23 | 0.36 | 0.48 | 0.36 | 0.36 | 1.34 | 1.02 | 1 | 0.04 | 0.67 | -0.07 |
| CASSET | 0.02 | 0.09 | 0.03 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 4.45 | 4.78 | 4.22 | 0.22 | 0.32 | -0.07 |
| FRIOUL | 0.05 | 0.1 | 0.06 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 5.16 | 5.2 | 5.12 | 0.03 | 0.12 | -0.05 |

4.1.2 Klimatologija taloženja prašine u Jadransko more

Nakon linearne interpolacije na mrežu finije razlučivosti, podaci o taloženju prašine u Jadransko more za razdoblje od 30 godina prostorno su uprosječeni za komponente: mokro (velike skale), konvektivno, sedimentaciju i suho taloženje (radi turbulencije), a zatim sumarno za ukupno mokro (TW), ukupno suho (TD) i ukupno taloženje prašine (DEP). Godišnji hod izračunat je iz srednjih dnevnih vrijednosti u trajanju od 30 godina, a na Slici 6 prikazani su grafovi mjesečnih vrijednosti za tri jadranska područja definirana na Slici 2a. Iako su događaji taloženja prašine (DDE; ovdje definirani kao broj dana s taloženjem za svaku točku interpolacije) prirodno sporadični, godišnji hod pokazuje određenu razinu pravilnosti (Slika 6). Ovaj obrazac ponašanja taloženja ovisi kako o sezonalnosti pojave transporta prašine zbog sinoptičkih uvjeta, tako i o lokalnom godišnjem hodu oborine. Globalno, koncentracije prašine u zraku kontrolirane su promjenama u prizemnom vjetru unutar opće cirkulacije atmosfere (Engelstaedter i sur., 2006). To je rezultat uglavnom dvaju čimbenika: (a) geografskog položaja glavnih izvora prašine na sjevernoj hemisferi i (b) sezonske promjene prizemnih pasata koji pušu iz sjeveroistočnih smjerova. Ovaj planetarni tip vjetra konvergira s prizemnim strujanjima koja donose vlažan morski zrak s ekvatora na $5 - 10^\circ \text{ N}$ iznad

sjeverne Afrike. Time kontroliraju položaj intertropske zone konvergencije. Od zimske do ljetne sezone intertropska zone konvergencije se pomiče prema sjeveru i prolazi pustinjska područja. Može dosegnuti najsjeverniji položaj u pojasu zemljopisnih širina od 15° do 23° N u kolovozu. Konvergencija vjetra pogoduje dubokoj suhoj konvekciji što povećava turbulenciju uz tlo i posljedično emisiju prašine. Prateći ovu globalnu dinamiku, u području Sredozemlja tijekom proljeća saharska prašina se uglavnom prenosi prema istoku i središnjem Sredozemlju (Moulin i sur., 1998; Israelevich i sur., 2012). Kasnije, tijekom ljeta odnosno jeseni, perjanice prašine se pomiču prema središnjem i zapadnom Sredozemlju. Promatrana sezonalnost DDE u ovom istraživanju ima sličan obrazac ponašanja sezonalnosti opterećenja prašinom (engl. *dust load*) koju su uočili Barnaba i Gobbi (2004.) na temelju MODIS AOD (550 nm) podataka. Procijenili su opterećenje prašinom u stupcu atmosfere nad Jadranom koje je temeljeno na AOD-u, pri čemu su dobili srednje vrijednosti opterećenja prašinom za prosinac, siječanj i veljaču (DJF) od 0.015 g m⁻². Proljetna sezona, ožujak, travanj i svibanj (MAM), obilježena je s 0.03 g m⁻², a razdoblje rujna, listopada i studenoga (SON) imalo je nešto niže vrijednosti. Za lipanj, srpanj i kolovoz (JJA) srednje opterećenje prašinom iznosilo je 0.02 g m⁻². Vincent i sur. (2016) izmjerili su najveći broj pojava taloženja prašine na postaji Corsica u svibnju (4) i lipnju (< 3), u ožujku (> 3) i u rujnu – studenome (< 2).

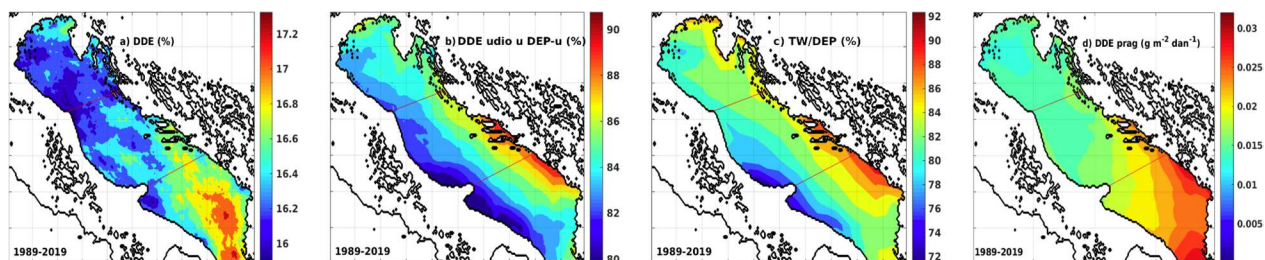
Taloženje prašine u Jadranu uglavnom je u formi mokrog taloženja, što je vidljivo iz prosječnog doprinosa TW u DEP-u. Najveći prosječni doprinosi javlja se u studenome i približno je isti u svim dijelovima Jadranskog mora (~ 89 %). Najniži doprinosi su u lipnju ~ 72 % (NAd), ~ 67 % (CAAd) i 62 % (SAd). To se vrlo dobro slaže s rezultatima dobivenim iz mjerenja mreže CARAGA (Vincent i sur., 2016). Oni su utvrdili da kod taloženja na sjevernim postajama dominira mokro taloženje (od 77 % do 82 % ukupne deponirane mase u Le Cassetu, od 61 % do 66 % u Frioulu, i od 69 % do 74 % na Corsici). Stoga, ukupno taloženje prašine jako ovisi o oborini koja na većini postaja duž istočne obale Jadrana ima dva maksimuma u godišnjem hodu. Prvi, jači maksimum je prisutan u jesen, a drugi, nešto slabiji, javlja se u proljeće zbog intenzivne ciklonalne aktivnosti (Penzar i sur., 2001). Ljeto opisuje oskudna količina oborine povezana s anticiklonalnim vremenskim prilikama (Belušić Vozila i sur., 2021), osim na sjeverozapadnoj obali istarskog poluotoka (Mikuš i sur., 2012). Međutim, taloženje prašine u Jadranskom moru najintenzivnije je u travnju, što predstavlja primarni maksimum, dok se sekundarni maksimum javlja u studenome.



Slika 6. Godišnji hod taloženja prašine i komponente (ukupno taloženje prašine, ukupno mokro i ukupno suho taloženje; $\text{g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$) za: (a) cijelo Jadransko more, (b) Sjeverni (NAd), (c) Srednji (CAAd) i (d) Južni (SAd) Jadran. Pravokutnik predstavlja interkvartilni raspon i medijan, dok donje i gornje horizontalne linije pokazuju minimalnu i maksimalnu vrijednost koje su od gornje i donje baze kutije udaljene za manje od 1.5 puta od interkvartilnog raspona (engl. *whiskers*). Srednje vrijednosti su označene kružićem, a vrijednosti koje su veće ili manje od 1.5 puta interkvartilnog raspona su označene točkama. Zbog poveznice sa sezonama (zimsko (DJF), proljetna (MAM), ljetna (JJA) i jesenska (SON)) oznake na x-osi počinju s prosincem, a završavaju sa studenom.

Maksimalni medijan DEP-a javlja se u travnju i iznosi 0.032 u Jadranskom moru te po područjima 0.028 $\text{g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ u NAd-u, 0.031 $\text{g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ u CAAd-u, te 0.034 $\text{g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ u SAd-u (Slika 6). Istim redosljedom, jesenski maksimalni medijan DEP-a koji se javlja u studenome iznosi 0.021 g

$\text{m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ u Jadranu (Slika 6a), a od sjevera prema jugu DEP raste (od $0.015 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ [NAd] do preko $0.02 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ [CAAd] i $0.023 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ [SAd]). Razlika između proljetnog i jesenskog maksimuma gotovo da i ne postoji u NAd-u, gdje je DEP u periodu od veljače do svibnja približno usporediv s onim u studenome. Najveće taloženje u razdoblju od prosinca do siječnja je u SAd-u. Ovo područje također ima veliki proljetni maksimum i najveće taloženje uopće. Sličan uzorak uočen je za CAAd, s nešto nižim taloženjem u ožujku i svibnju, te najjačim taloženjem u travnju. Taloženje u Rogozničko jezero odgovara onom za CAAd. Mjeseci s najvišim prosječnim vrijednostima taloženja imaju i najveću varijabilnost. Za cijelo Jadransko more, mokro taloženje velike skale uglavnom je veće od konvektivnog taloženja i ima najveću varijabilnost (Slika 6) te je u rasponu od $\sim 45 \%$ (SAd u kolovozu) do $\sim 89 \%$ (NAd u ožujku). Ovaj rezultat je u skladu s činjenicom da se 56% dana tijekom tople sezone u Jadranskom moru odnosi na dane s konvektivnom aktivnošću dok je taj broj znatno manji zimi (Mikuš i sur., 2012). Doprinos sedimentacije je prostorno manje promjenjiv i veći je od suhog taloženja (uzrokovanog turbulentnim procesima) (Slika 6). U prosjeku, on je u rasponu od 61% (prosinac i siječanj) do 81% (travanj i ožujak). Godišnji hod taloženja u Rogozničko jezero (nije prikazano) sličan je onome za CAAd.



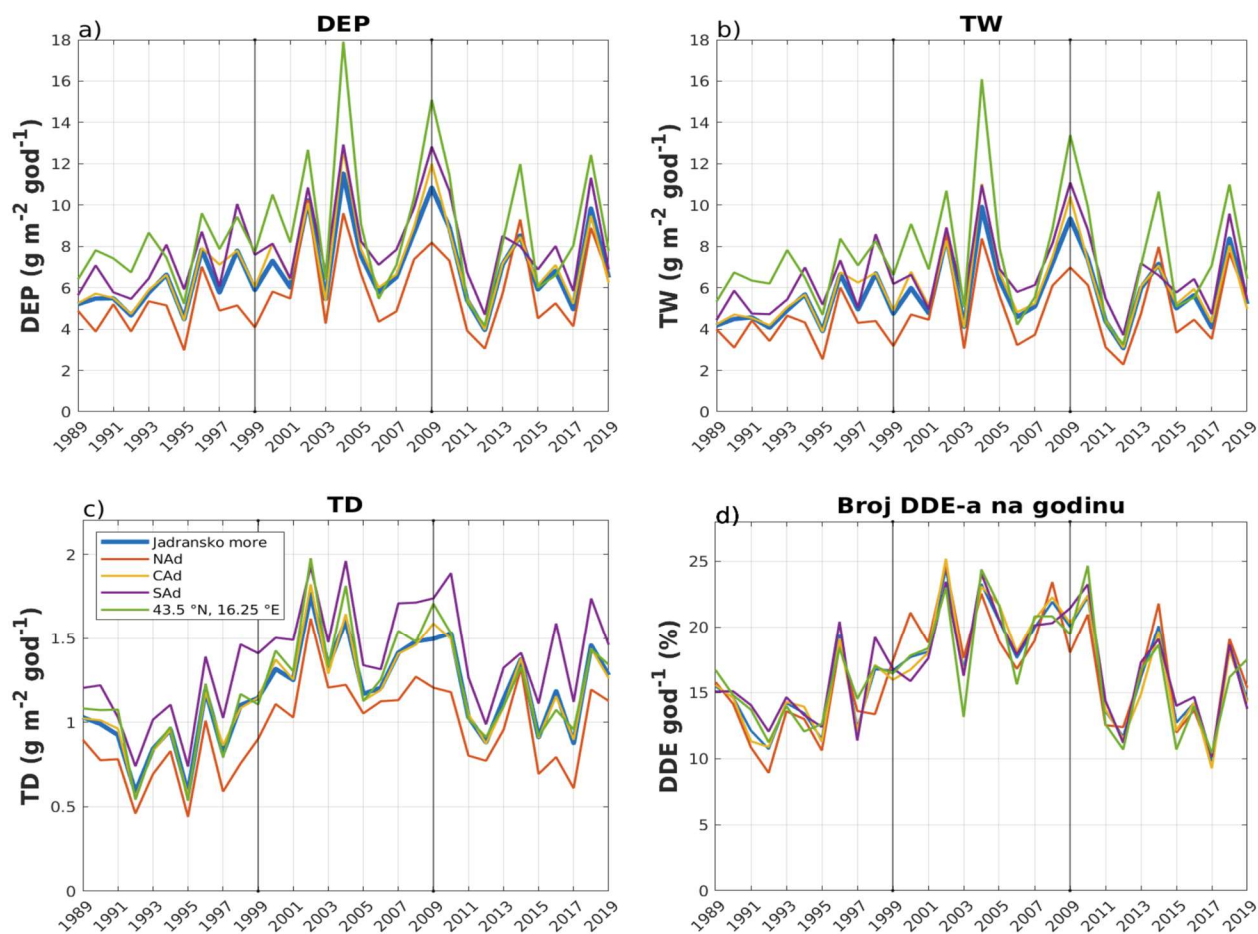
Slika 7. Prostorna raspodjela godišnjih prosjeka: (a) DDE (kao relativni udio u %), (b) doprinos DDE u DEP-u (ukupno taloženje prašine), (c) doprinos TW-u (ukupno mokro taloženje) u DEP-u, i (d) prag taloženja za svaku točku definiran kao geometrijski srednjak plus standardna devijacija ($\text{m}_g \cdot \sigma_g$; $\text{g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$).

Za određivanje broja DDE (Slika 7) primijenjena je metodologija Vincenta i sur. (2016). Autori navedene studije primijetili su da zajednički prag za DDE isključuje neke događaje s nižim intenzitetom DEP-a (tj. sjeverne CARAGA postaje). Iz tog razloga, umjesto korištenja zajedničkog

praga, definirali su specifični prag za svaku postaju kao geometrijski srednjak plus standardnu devijaciju ($m_g \cdot \sigma_g$). Do ovog izbora došlo je zato što podaci o taloženju na svakoj postaji prate log-normalnu ili gama distribuciju s najvećim brojem podataka sa zanemarivim taloženjem i malim brojem ekstremnih vrijednosti.

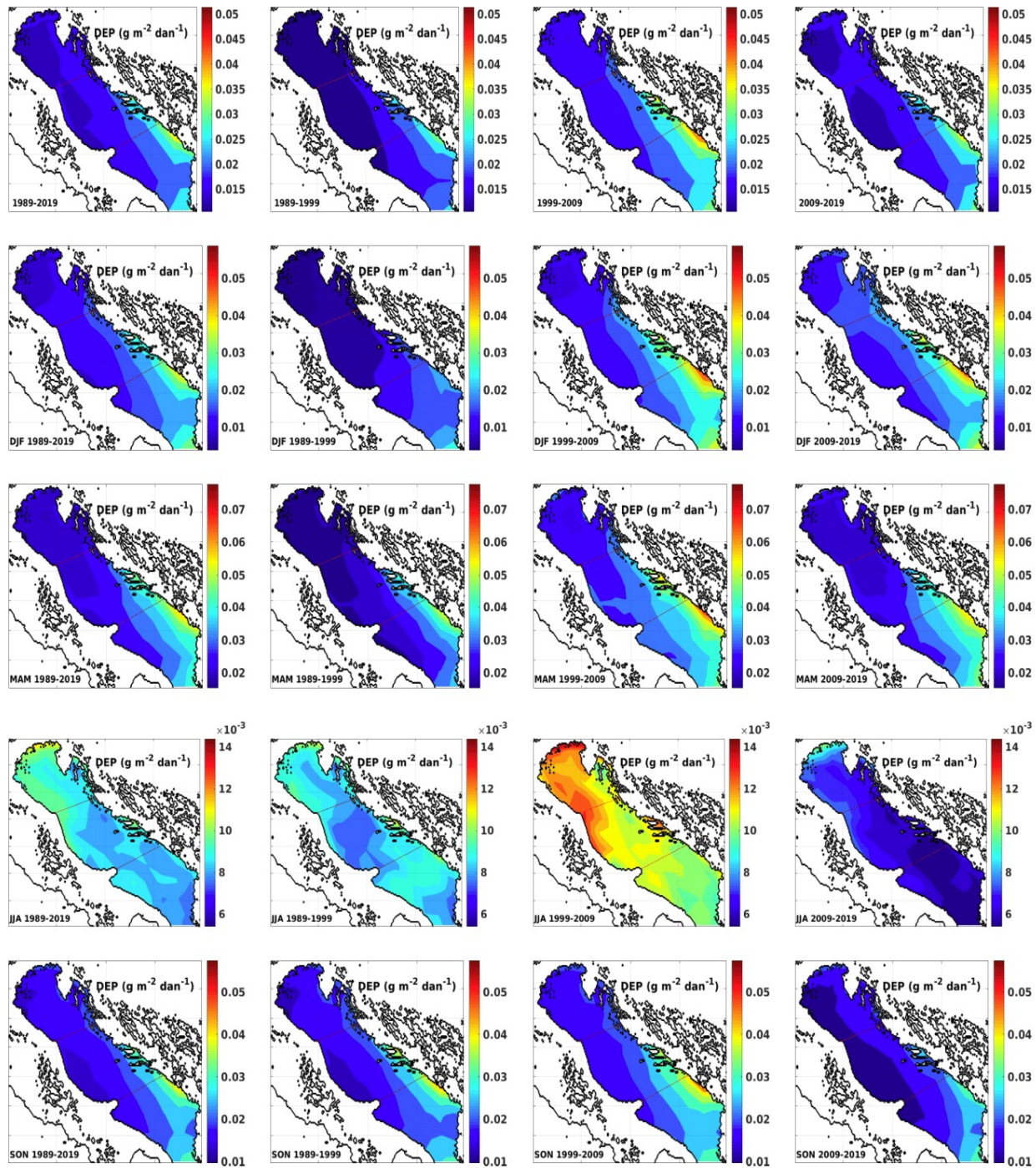
Opisani pristup je preuzet na način da je prag ($m_g \cdot \sigma_g$) izračunat u svakoj točki mreže reanalize (Slika 7d). Rezultati pokazuju da se jedinstveni prag ne može koristiti za cijelo jadransko područje. Prag vrijednosti ukazuje na gradijent u smjeru NW-SE s najvišim vrijednostima u SAd-u, osobito uz dalmatinsko, crnogorsko i albansko primorje južno od Rogozničkog jezera i na Otrantu. Vrijednosti praga su veće od onih u radu Vincenta i sur. (2016): Mallorca, Lampedusa i Frioul imaju $0.093 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$, a Korzika i Le Casset imaju 0.05, odnosno $0.036 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$. Prosječna vrijednost za Jadransko more je $0.019 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ ($0.132 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$). U NAd-u ta je vrijednost niža (Slika 7d) i iznosi $0.107 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$, u CAd-u je $0.129 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$, te u SAd-u iznosi $0.159 \text{ g m}^{-2} \text{ tj}^{-1}$. Stoga je prosječni prag u Jadranskom moru približno 1.4 puta veći od vrijednosti na Lampedusi koja graniči sa sjevernom afričkom obalom.

Jedan od mogućih razloga većih vrijednosti praga za taloženje u Jadranskom moru potencijalno proizlazi iz negativne pristranosti MERRA-2 vrijednosti taloženja (pokazano u odjeljku 4.1.1). S druge strane, zbog nedostatka mjerenja taloženja, postojanje i predznak pristranosti iznad Jadranskog mora su nepoznati. Drugi razlog odnosi se na razmjer intenziteta taloženja prašine zbog kiše, a što je vezano uz najučinkovitiji mehanizam taloženja (prikazano na Slici 6). Prema tome, iako se veće opterećenje prašinom očekuje na Lampedusi, Majorci, i u Frioulu, vjerojatnost pojave intenzivnijeg TW-a očekuje se nad Jadranom. To posebno vrijedi za obalno područje južnog Jadrana (SAd-a; Slike 7b i 7c, Slika 9).



Slika 8. Vremenski niz srednjeg godišnjeg taloženja: (a) ukupno taloženje prašine (DEP; $\text{g m}^{-2} \text{god}^{-1}$), (b) ukupno mokro taloženje (TW; $\text{g m}^{-2} \text{god}^{-1}$), (c) ukupno suho taloženje (TD; $\text{g m}^{-2} \text{god}^{-1}$) i (d) događaji taloženja prašine (DDE).

Nadalje, postaje CARAGA smještene su u zapadnom Sredozemlju, gdje se pojavljuju perjanice prašine slabijeg intenziteta uglavnom tijekom ljeta i jeseni, transport prašine i taloženje veći su tijekom proljeća u istočnom i središnjem Sredozemlju, tj. u području gdje se nalazi Jadransko more (Moulin i sur., 1998; Barnaba i Gobbi, 2004; Israelevich i sur., 2012; Varga i sur., 2013). Ova razlika se također može vidjeti iz godišnjeg hoda taloženja za različite dijelove Jadrana (Slika 6). Naposljetku, u ovom istraživanju vrijednosti pragova za DDE dobivene su iz skupa podataka duljine trajanja 30 godina, dok su pragovi za skup podataka CARAGA izračunati iz razdoblja u trajanju od 3 godine, a koje je označeno događajima taloženja niskog intenziteta.



Slika 9. Prosječno ukupno taloženje prašine (DEP) u Jadranskom moru. Prvi stupac je za razdoblje 1989–2019, a preostali za tri desetljeća (1989.–1999., 1999.–2009. i 2009.–2019.; vidi tekst za detalje). Prvi red odgovara cijelom istraživanom razdoblju (1989.–2019.), a ostali redovi odgovaraju godišnjim dobima; zimi (DJF), proljeću (MAM), ljetu (JJA) i jeseni (SON).

U Jadranu, u prosjeku, DDE čine 16.5 % (60.2 DDE dan god^{-1}) razdoblja od 30 godina (Slike 7a i Slika C1 u Dodatku C), što je u skladu s vrijednostima dobivenim za europske postaje mreže CARAGA (2011–2013): Le Casset (15 %), Frioul (17 %), Korzika (14 %) i Mallorca (18 %); dok je na Lampedusi ova vrijednost veća (37 %). Doprinos DDE ukupnom taloženju (Slika 7b) također je u skladu s rezultatima Vincent i sur. (2016); 55 % za Frioul (gdje je uočen dodatni antropogeni doprinos), 61 % za Le Casset, 73 % za Korziku, 80 % za Mallorcu, a 87 % za Lampedusu. U Jadranu su se vrijednosti kretale od 80 % do 90 % s gradijentom od talijanske do hrvatske obale (sličan gradijent primijećen je za udio TW-a u DEP-u, Slika 7c i Slika B3 u Dodatku B).

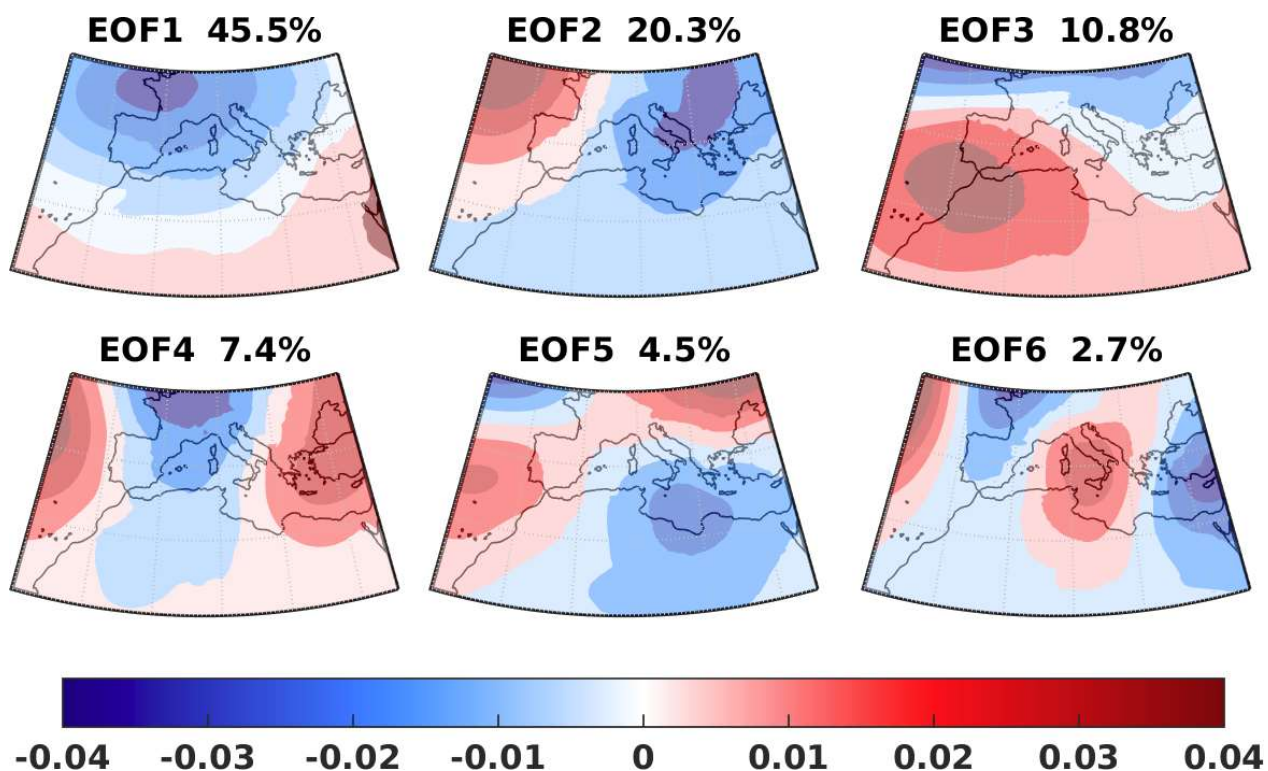
Najjače taloženje bilo je tijekom 2. desetljeća 30-godišnjeg razdoblja. Tada su zabilježene najveće vrijednosti za Jadran u cjelini i to 2002. i 2004. ($11.5 \text{ g m}^{-2} \text{ god}^{-1}$) te 2009. (Slika 9). U posljednjem desetljeću maksimalne vrijednosti postignute su 2014. i 2018., dok je prvo desetljeće imalo najslabije taloženje. Pozitivan značajan trend za 30-godišnji niz taloženja za sve dijelove Jadrana pojedinačno potvrđuje ovaj zaključak, dok su trendovi različiti ovisno o desetljeću i sezoni u istom razdoblju (Slike A1–A3, Dodatak A). Zanimljivo je primijetiti kako trend porasta taloženja prašine u razdoblju 1996.–2020. prati trend pada saliniteta na površini Rogozničkog jezera (Slika A4, Dodatak A). Također je uočeno da je taloženje u Rogozničko jezero u prosjeku veće nego u nekim dijelovima Jadrana.

Što se tiče prostorne raspodjele prosječnog DEP-a, najveće taloženje je duž istočne obale Jadrana, s NAd-om kao regijom s najslabijim i SAd-om kao područjem s najjačim taloženjem (Slika 9). Najveće vrijednosti su duž crnogorske obale u SAd-u tijekom pojedinih desetljeća i većeg dijela godine. Izuzetak je sezona JJA kada su prosječne maksimalne vrijednosti približno četiri puta niže od onih u drugim godišnjim dobima s drugačijim prostornim rasporedom. Ljetne maksimalne vrijednosti javljaju se duž sjeverozapadne talijanske i zapadne istarske obale. Prostorna razdioba prosječnog TW-a odgovara razdiobi DEP-a (Slika B1 u Dodatku B), dok TD ima gradijent u smjeru jugoistok-sjeverozapad (Slika B2 u Dodatku B) za sva godišnja doba osim za JJA kada je gradijent usmjeren od talijanske prema hrvatskoj obali (jugozapad-sjeveroistok). Osim toga, usporedba Slika 6 i 9 pokazuje da je prostorni raspored DEP-a u različitim desetljećima u skladu s prosječnim godišnjim vremenskim nizovima te u različitim sezonama s godišnjim hodom.

4.1.3 Empirijske ortogonalne funkcije

Primjenom metode EOF u ovom istraživanju identificirano je da prva tri moda objašnjavaju ~ 77 % ukupne varijance u podacima geopotencijala 850-hPa plohe. Prvi mod (EOF1) je u obliku monopola koji se proteže preko većeg dijela domene sa središtem iznad Biskajskog zaljeva (Slika 10) i objašnjava 45.5 % varijance. Drugi (EOF2) i treći (EOF3) mod su u obliku dipola i odnose se na 20.3 % odnosno 10.8 % ukupne varijance. Orijentacija drugog moda je u smjeru zapad-istok sa središtima iznad Atlantskog oceana i Balkana, dok je treći mod u smjeru jugozapad-sjeveroistok. Viši modovi (EOF4-EOF6) imaju oblik kompleksne strukture višestrukih polova, ali objašnjavaju mali dio ukupne varijabilnosti i nisu uzeti u razmatranje. Rezultati su slični onima u Schepanski i sur. (2016) za razdoblje lipanj-srpanj tijekom 1979.–2015. dobiveni pomoću skupa podataka iz reanalize ERA-Interim. EOF za razdoblje lipanj-srpanj iz 30-godišnjeg niza podataka reanalize MERRA-2 daje udjele varijance za prva tri moda redom: 37.4 %, 22.6 %, odnosno 9.2 % što uvelike potvrđuje rezultate rada Schepanski i sur. (2016) koji su ujedno vrlo slični onima za cijelu godinu (Slika 10).

Kako bi se objasnila fizikalna pozadina određenog moda, može se primjerice usporediti izvorno polje u nekom trenutku s poljem reproduciranim samo za taj mod. Međutim, meteorološki učinci različitih sinoptičkih uvjeta na prostrano područje, koje se sastoji od sjeverne Afrike te dijelova Atlantskog oceana i Europe, su kompleksni i zato se u ovoj studiji promatraju učinci više modova koji radi ortogonalnosti simultano djeluju na dnevnoj bazi. Stoga su, za prepoznavanje karakterističnih sinoptičkih obrazaca koji utječu na taloženje u Jadransko more, ispitane kombinacije prva tri moda i one su dovedene u vezu s emisijom, transportom i taloženjem prašine. Budući da svaki mod ima pozitivnu i negativnu fazu, ukupan broj kombinacija je 2^3 . Kombinacije su navedene u Tablici 7, odnosno na Slikama 11–14 i 16–19. Kombinacije faza modova (C1–C8, Tablica 7) zastupljene su s podjednakim postotkom u odnosu na ukupne podatke (CC, %), što je posljedica ortogonalnosti PC-a. Većina DDE-a događa se tijekom pozitivne faze EOF1 (PC1+), kada udio DDE-a u ukupnim DDE-ovima (DDEC) iznosi 64.4 %, a također se to odnosi i na masene udjele DDE-a (DDEMC) koji sumarno za kombinacije C1–C4 iznose 77.6 %. Najvažnije kombinacije su C2 i C4, s DDEMC-ima od 33.1 % odnosno 23.0 %. Vrijednosti DDEC za ove kombinacije su manje, što je posljedica odabira kriterija za prag DDE-a.

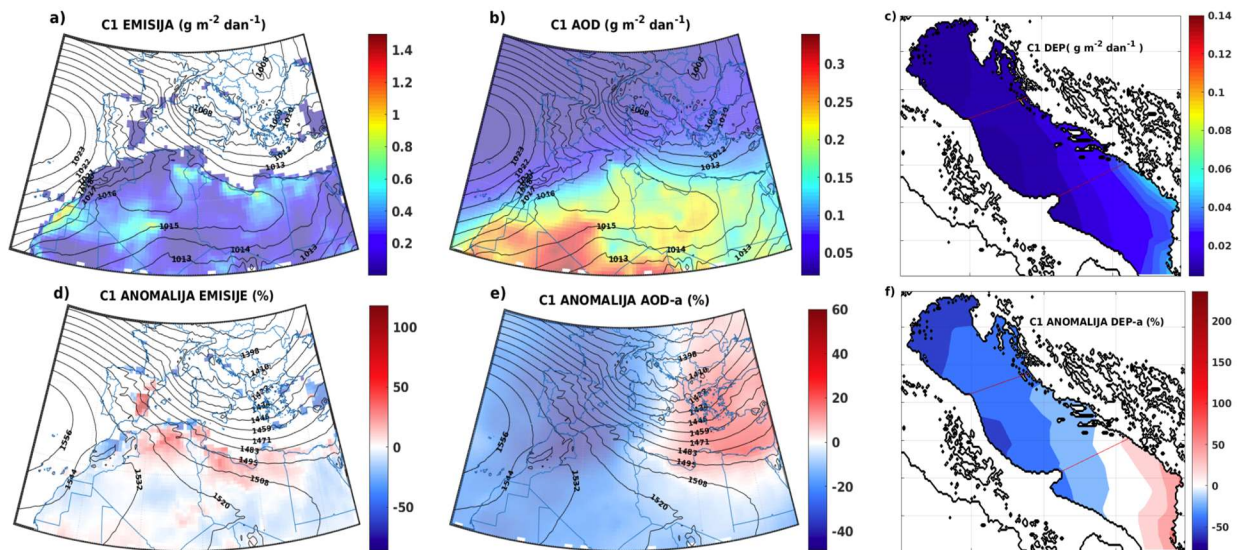


Slika 10. Prvih šest EOF-ova geopotencijala 850-hPa plohe u 30-godišnjem razdoblju (1989.–2019.) preuzetog iz reanalize MERRA-2.

Tablica 7. Faze koeficijenta EOF-a (PC), udjeli kombinacija (C1–C8) u ukupnim podacima (CC, %), udjeli DDE-a (DDEC) i maseni udjeli DDE-a (DDECM) u podacima za $DEP > m_g \cdot \sigma_g$.

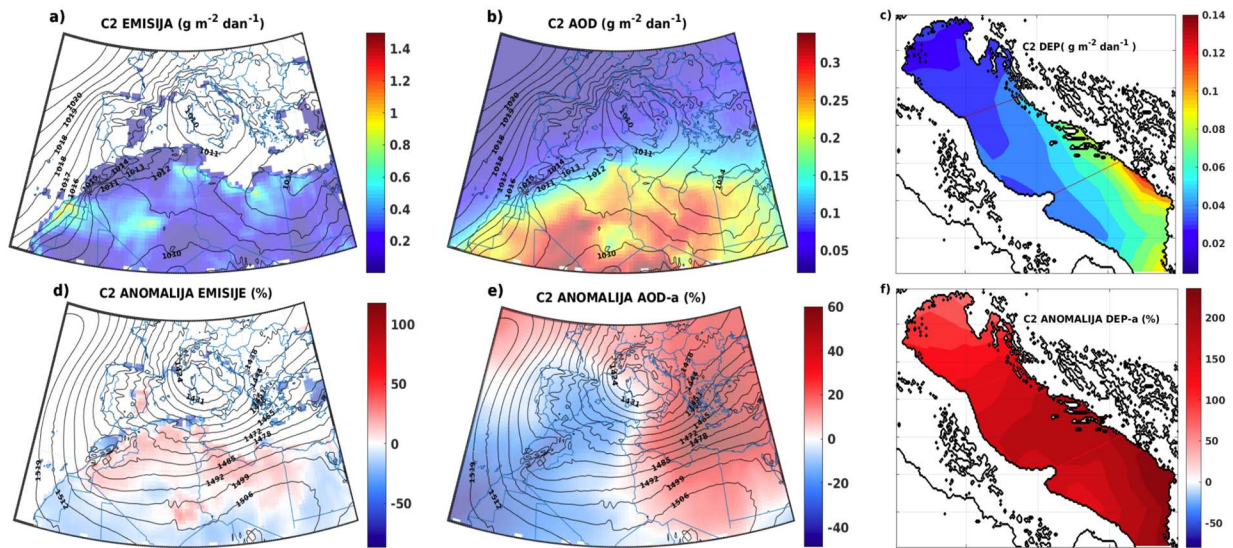
| Kombinacija | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PC1 | + | + | + | + | - | - | - | - |
| PC2 | + | + | - | - | + | + | - | - |
| PC3 | + | - | + | - | + | - | + | - |
| CC (%) | 10.7 | 10.9 | 11.4 | 10.4 | 12.8 | 14.7 | 14.4 | 14.6 |
| DDEC (%) | 9.5 | 21.6 | 13.5 | 19.8 | 6.2 | 13 | 7.3 | 9.1 |
| DDECM (%) | 9.6 | 33.1 | 11.8 | 23 | 3.3 | 9.5 | 3.7 | 6 |

Kako bi se objasnio učinak određene kombinacije C1–C8, izračunata je prosječna vrijednost za svaku točku mreže za polja AOD-a, emisije te DEP-a prašine. Izračunate su i anomalije, tj. relativni doprinosi razlike između srednje mase DEP-a za pojedine kombinacije i srednje mase DEP-a za 30-godišnje razdoblje. Pozitivna faza PC1 unutar kombinacija C1–C4 označava prisutnost visinske doline koja se rasprostire uglavnom iznad sjevernog dijela domene (Slike 11–14). Tijekom negativnih predznaka faze PC1 uočena je prisutnost grebena (Slike 16–19). Za kombinaciju C1, prijenos prašine odvija se iz izvora smještenih u sjevernom Alžiru, Tunisu i Libiji duž zaljeva Sirte (Slike 11a i 11d) prema istočnom Balkanu i Turskoj (Slike 11b i 11e). Transport je na prednjoj strani visinske doline koju prati prizemna ciklona sa središtem nad Apeninskim poluotokom. Ova kombinacija je relativno nevažna za taloženje prašine (Tablica 7), osim duž istočne obale SAD-a (Slike 11c i 11f).



Slika 11. Karte kombinacije C1 za prosječne vrijednosti: (a) emisije prašine (EM), (b) optičke debljine aerosola (AOD) s prizemnim tlakom zraka (SLP), (c) ukupnog taloženja prašine (DEP), i anomalije (%): (d) emisije prašine, (e) AOD-a s geopotencijalnom visinom za 850-hPa plohu (HGT) i (f) DEP-a.

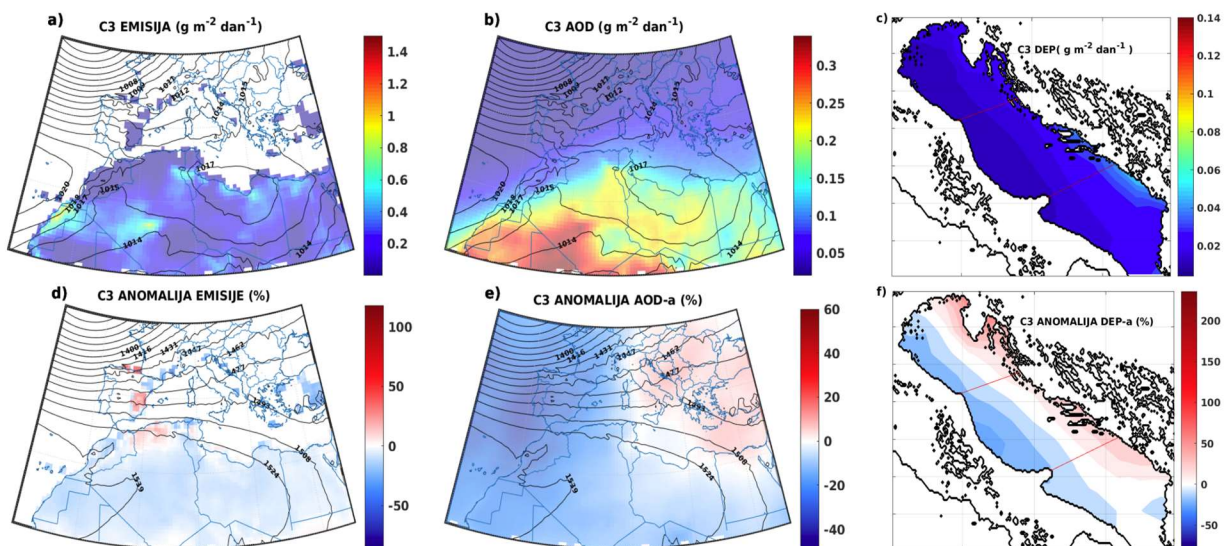
Kombinacija C2 (Slika 12) najvažnija je kombinacija modova za taloženje prašine u Jadranskom moru, a čiji je pokretač visinska dolina položena u smjeru jugozapad-sjeveroistok s dubokom Sredozemnom ciklonom čije središte se nalazi nad Korzikom.



Slika 12. Karte za kombinaciju C2 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.

Kombinacija C2 također je pronađena u studiji Varge i sur. (2014) i identificirana je kao važan sinoptički obrazac za povećanje indeksa aerosola u istočnom Mediteranu, što objašnjava gradijent taloženja u Jadranskom moru. Ova kombinacija također odgovara udjelu od 24.8 % epizoda prašine u Karpatskom bazenu (Varga, 2020). U prvoj od spomenutih studija identificirane su Sharav ciklone (Alpert i Ziv, 1989) koje putuju sjevernom obalom Afrike i pritom podižu prašinu koja se advektira prema Jadranu. Završna pozicija Sharav ciklona je često nad Korzikom što odgovara i (klimatološkom) rezultatu temeljenom na EOF kombinacijama u ovoj studiji (Slika 12d i 12e). Karte emisija prašine i anomalija (Slike 12a i 12d) pokazuju da se izvori prašine za ovu kombinaciju nalaze u sjeverozapadnom (planine Atlas) i jugoistočnom Alžiru (blizu nigerijske i libijske granice), te duž zaljeva Sirte u Libiji i u Maroku. Prijenos prašine odvija se na istočnom dijelu ovih ciklona, što rezultira značajnim povećanjem AOD-a nad istočnim Sredozemljem, Europom i Turskom (Slike 12b i 12e). Taloženje u Jadran raste s gradijentom od sjevera prema

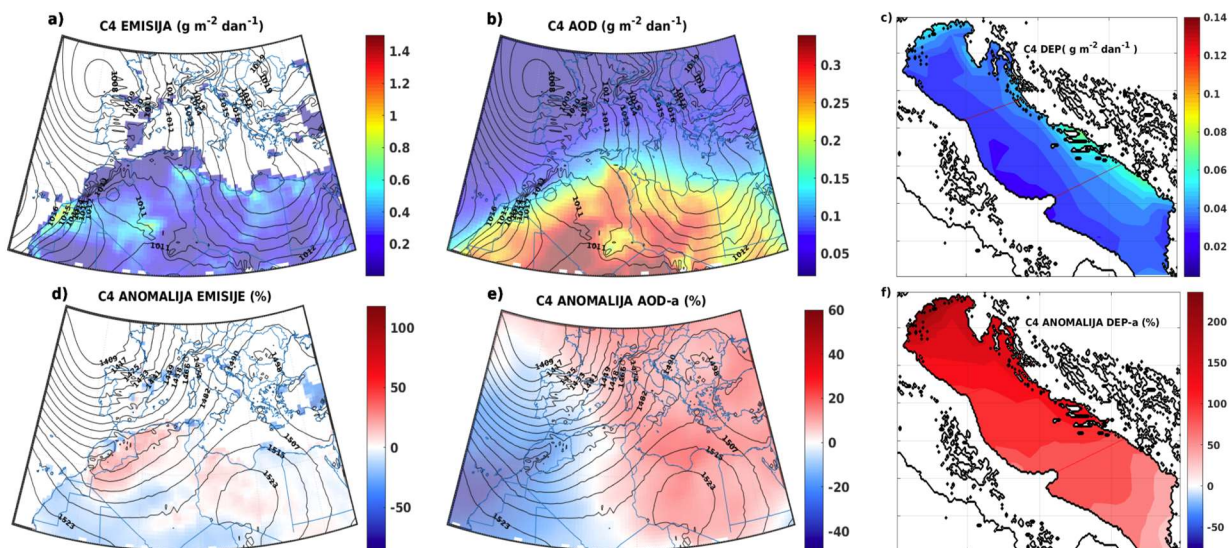
jugu Jadrana, osobito duž dalmatinske obale u CAD-u (uključujući Rogozničko jezero) i SAD-u, s maksimalnim vrijednostima do $0.14 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ duž crnogorske obale (Slike 12c i 12f). Drugo žarište taloženja nalazi se na Otrantu.



Slika 13. Karte za kombinaciju C3 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.

Iako su za kombinacije C3 i C4 sinoptičke situacije slične, učinak taloženja prašine je značajno drugačiji. Tijekom slučaja C3, visinska dolina preko Atlantika proteže se do sjevernoafričke obale, i relativno slabe emisije prašine javljaju se u planinama Atlas (Slike 13a i 13d). AOD (Slike 13b i 13e) je blago pozitivno anomalna iznad središnjeg i istočnog Sredozemlja i istočne Europe. Taloženje se javlja uglavnom uz istočnu obalu Jadrana (Slike 13c i 13f). U slučaju C4, zapadnim dijelom domene dominira visinska dolina iznad Atlantika s ciklonom u Biskajskom zaljevu, a koja se proteže prema jugu Alžira (Slika 14). Emisije prašine su u planinama Atlas u sjevernom Alžiru (kao i kod slučaja C3) i Maroku (Slike 14a i 14d). Povećanje iznosa AOD-a prošireno je na zapadno Sredozemlje, uključujući cijeli Jadran (Slike 14b i 14d). Taloženje je najjače duž istočne obale Jadrana (Slika 14c), ali ima relativno velik utjecaj u sjevernom dijelu Jadrana (NAd, Slika 14f). U radovima Varga i sur. (2014) i Varga (2020), ovo je najvažnija situacija za pojavu epizoda prašine u području središnjeg Sredozemlja i odgovorna je za 67.4 % epizoda prašine u Karpatskom bazenu.

Zbog različite metodologije u odabiru i analizi DDE različitih parametara, ovaj se broj ne može usporediti s rezultatima u ovoj studiji.

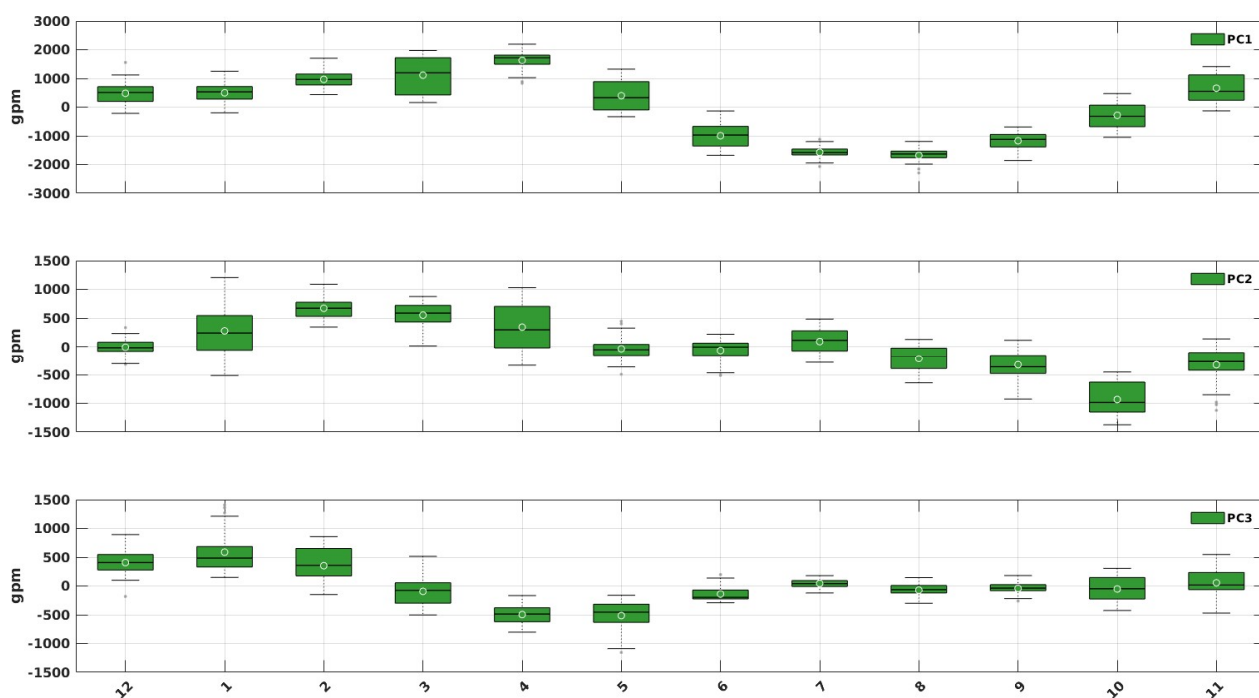


Slika 14. Karte za kombinaciju C4 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.

Sezonalnost različitih kombinacija može se proučavati pomoću godišnjeg hoda glavnih komponenta PC-a (Slika 15). Komponenta PC1 ima izražen godišnji hod s pozitivnom fazom od studenoga do lipnja i negativnom fazom od srpnja do listopada. Komponenta PC2 ima medijan pozitivne faze od siječnja do travnja, neutralnu fazu u svibnju i lipnju te negativnu fazu od kolovoza do prosinca. Treća komponenta PC3 ima pozitivnu fazu od studenoga do veljače i negativnu fazu od ožujka do lipnja, dok je ona neutralna od srpnja do rujna. Zimska sezona DJF ima najslabije taloženje prašine, pri čemu je kombinacija C1 dominantni sinoptički obrazac (Slike 15 i 3) tijekom prosinca i siječnja. Ova situacija može uzrokovati samo manje taloženje prašine u SAd (Slika 11). Alternativno, zbog moguće negativne faze PC2, kombinacija C3 može utjecati na povećanje taloženja u Kvarnerskom zaljevu u siječnju (Slika 13). U rijetkim slučajevima u veljači, komponenta PC3 može imati negativne vrijednosti, pri čemu se može pojaviti slučaj C2. Dodatno, komponente PC1 i PC2 mogu poprimiti veće vrijednosti nego u prethodnim mjesecima, što može objasniti pojačano taloženje (Slika 6). Najjače taloženje je u proljetnoj sezoni MAM, posebno u

središnjem i južnom dijelu Jadrana, CA_d i SA_d na Slici 6, što se podudara s pojavom kombinacije C2.

U ožujku je najveća varijabilnost kod komponente PC1, a u travnju kod pozitivnih faza komponente PC2. U ožujku, komponenta PC3 može postati pozitivna, što rezultira pojavom kombinacije C1 koja utječe na slabije taloženje u sjevernom Jadranu (NAd). Zbog veće varijabilnosti komponente PC1 u travnju se može pojaviti kombinacija C4 (ili u manjoj mjeri C3), što je druga kombinacija po jačini taloženja. Ovo je u skladu s rezultatima Varge i sur. (2014) koji su utvrdili da su ciklone na Sredozemlju (slučaj C2) i visinske doline (kombinacije C4 ili C3) dominantne u proljeće u istočnom i središnjem Sredozemlju.

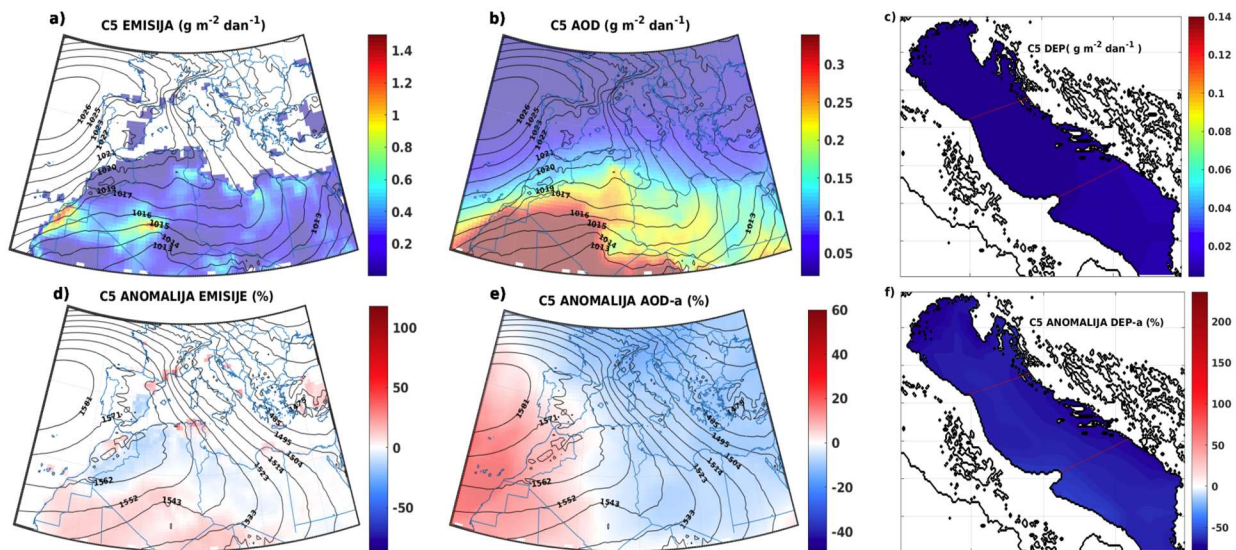


Slika 15. Godišnji hod glavnih komponenata PC1–PC3 dobiven EOF analizom za geopotencijalnu visinu 850-hPa plohe na temelju 30-godišnjeg razdoblja (1989.–2019.). Pravokutnik predstavlja interkvartilni raspon i medijan, dok donje i gornje horizontalne linije pokazuju minimalnu i maksimalnu vrijednost koje su od gornje i donje baze kutije udaljene za manje od 1.5 puta od interkvartilnog raspona (engl. *whiskers*). Srednje vrijednosti su označene kružićem, a vrijednosti koje su veće ili manje od 1.5 puta interkvartilnog raspona su označene točkama.

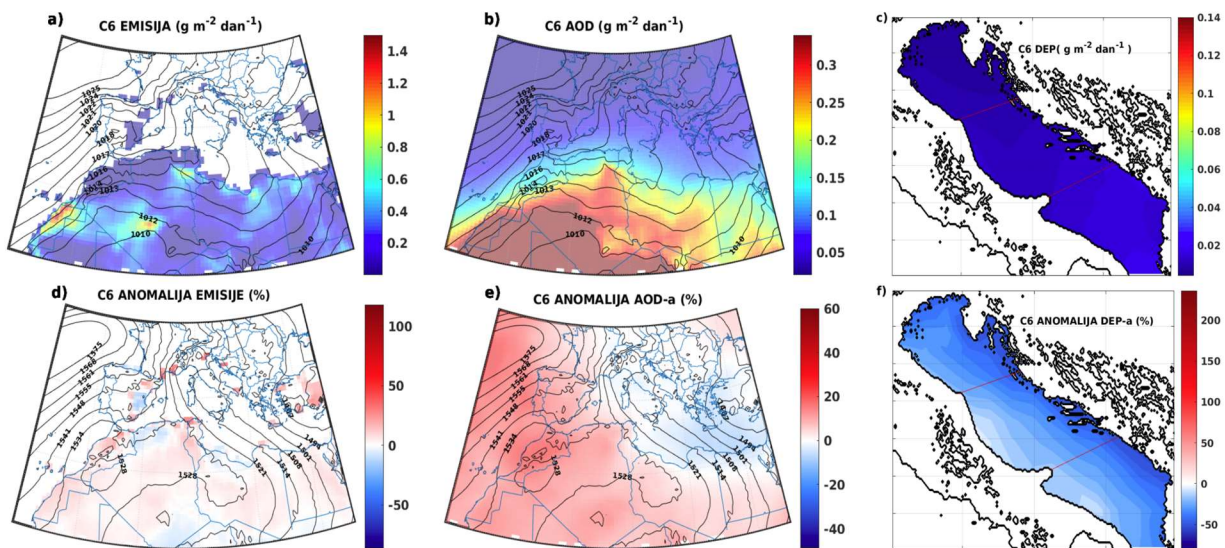
U svibnju je moguće da sve tri glavne komponente PC1–PC3 budu u negativnoj fazi, što rezultira kombinacijom C8. Dok je komponenta PC1 negativna tijekom ljetne sezone, JJA, komponente PC2 i PC3 su blizu nule. U lipnju i kolovozu nešto su vjerojatnije kombinacije C7 i C8, a u srpnju C5 i C6. Barkan i sur. (2005) uočili su da se dani s prašinom u središnjoj Europi javljaju pod utjecajem sinoptičkih uvjeta koji su slični onima na Slici 18. Slučajevi C7 i C8 su vezani za situacije koje će se najvjerojatnije dogoditi tijekom rujna i listopada, dok su kombinacije C3 i C4 tipične za studeni. Iznimno, kombinacija C2 se može pojaviti u listopadu.

Rezultati pokazuju da je sinoptički raspored u kombinaciji C8 glavni pokretač povećanja indeksa aerosola povezanog s prašinom tijekom ljeta u zapadnom Sredozemlju (Varga i sur., 2014). Nadalje, sinoptičke situacije vezane su uz kombinacije C5 ili C7 te su odgovorne za 7.8 % epizoda donosa prašine u Karpatski bazen (Varga, 2020). Istraživanja mnogih autora (Moulin i sur., 1998; Israelevich i sur., 2012; Varga i sur., 2013; Varga, 2020) općenito potvrđuju godišnju bimodalnu distribuciju aktivnosti saharske prašine u Sredozemlju, s izraženim maksimumom ljeti i sekundarnim maksimumom u proljeće. Advekcija prašine prema istoku Sredozemlja je tipična u proljetnoj sezoni, a perjanice prašine pomiču se prema središnjem i zapadnom Sredozemlju kasnije u ljeto i jesen. Međutim, glavni pokretač taloženja prašine je mokro taloženje velike skale. Godišnji hod oborine na obalnim Jadranskim postajama također ima bimodalnu raspodjelu, ali s jače izraženim maksimumom u jesen i slabijim sekundarnim maksimumom u proljeće (Penzar i sur., 2001).

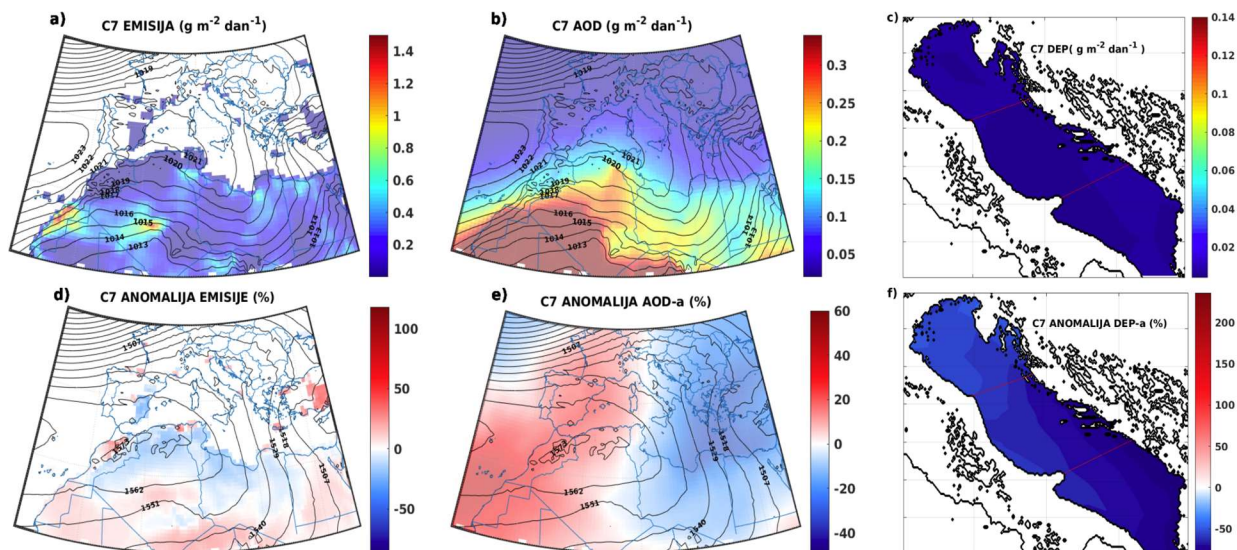
Gledajući cijeli Jadran, manje se uočava ovakva raspodjela na jugu, u SAd-u, pogotovo u Dubrovniku. Budući da je kombinacija C2 koja je najčešće povezana s najintenzivnijim donosom prašine na istočno Sredozemlje u proljeće, te se poklapa se s maksimumima oborine u SAd-u i CAd-u, ona rezultira s pojavom događaja s intenzivnijim taloženjem. S druge strane, sjeverni dio Jadrana, NAd, je pod većim utjecajem slučaja C4 (ili C3) u proljeće ili kasnu jesen (studeni) ili kod slučaja C7 i C8 u rujnu i listopadu. To se poklapa s godišnjim hodom taloženja (Slika 6). Taloženje prašine ljeti obično izostaje zbog nedostatka oborina, iako se u području sjevernog dijela Jadrana (NAd-u) mogu pojaviti manje količine istaložene prašine, osobito duž talijanske obale.



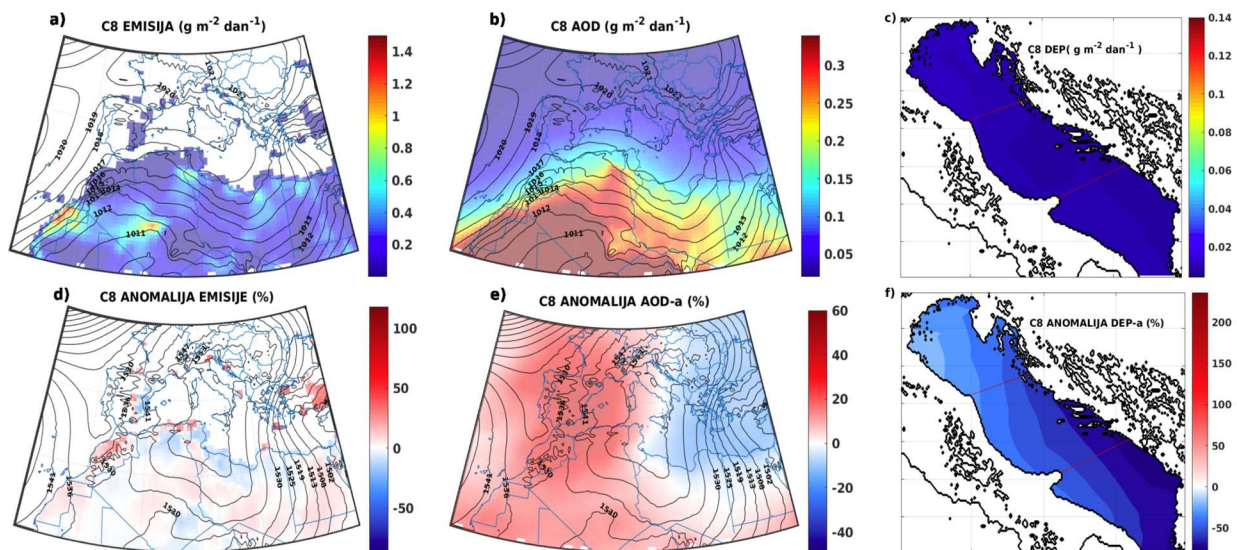
Slika 16. Karte za kombinaciju C5 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.



Slika 17. Karte za kombinaciju C6 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.



Slika 18. Karte za kombinaciju C7 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.



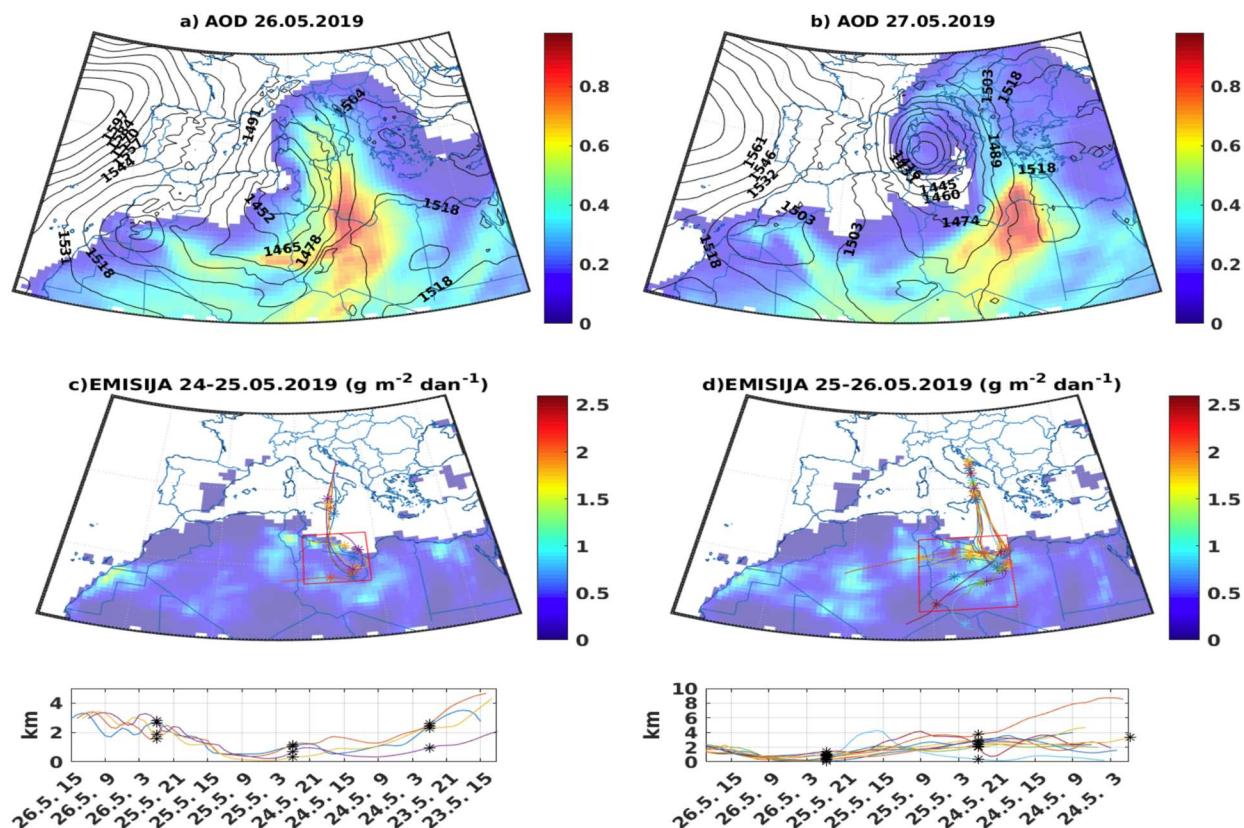
Slika 19. Karte za kombinaciju C8 za prosječne vrijednosti i anomalije, oznake su iste kao na Slici 11.

4.1.4 Kemijski sastav prašine i učinak taloženja na biološku aktivnost u morskom sustavu Rogozničkog jezera

Biološki odziv na taloženje prašine u Rogozničko jezero praćen je mjerenjem produkcije kisika unutar stupca vode u jezeru, a koja je izravna posljedica primarne proizvodnje. Ovaj odziv u Rogozničkom jezeru opažen je 26. i 27.5.2019. kada je zabilježeno izraženo taloženje prašine (Slike 20 i 21). Mjerenja vertikalnih profila temperature, saliniteta i razine zasićenosti kisikom u vodenom stupcu Rogozničkog jezera tijekom ove epizode ukazuju na jaku stratifikaciju i visoku razinu zasićenosti kisikom do 250 % u srednjem sloju vodenog stupca između 5 i 8 m (Slika 22). Visoka zasićenost kisikom može se tumačiti kao izravna posljedica intenzivnog cvjetanja fitoplanktona, uglavnom dijatomeja (Slika D1 u Dodatku D) vjerojatno izazvanog epizodama intenzivnog taloženja prašine.

Rogozničko jezero poznato je kao lokalitet s izraženim biološkim i mikrobiološkim aktivnostima, odnosno visokim razinama primarne i sekundarne proizvodnje (Ciglencečki i sur., 2017; Čanković i sur., 2019). Međutim, ekstremne vrijednosti zasićenosti kisikom u vodenom stupcu mjerene su samo povremeno (Ćosović i sur., 2000; Ciglencečki i sur., 2005). Pokazano je da su ovi događaji povezani s nano- i piko-planktonskim cvjetanjem (Ćosović i sur., 2000; Šestanović i sur., 2005), kao i s aktivnošću mikrofitoplanktona (*Chaetoceros curvisetus* i *Prorocentrum arcuatum*), te s mikсотrofnom aktivnošću (pojava mikroflagelata *Hermesinum adriaticum* i *Ceratium furca*, Svensen i sur., 2008; Burić i sur., 2009), za koje se zna da su povezani s unosom dodatnih izvora hranjivih tvari (Nygaard i Tobiesen, 1993; Nodwell i Price, 2001). Analizom baze podataka za proteklih 25 godina (u odnosu na 2022.) fizikalno-kemijskih stanja u jezeru koje karakterizira ekstremna zasićenost kisikom tijekom kasnog proljeća i ljetna stratifikacija, ustanovljeno je da se gotovo svaka situacija, za koju je bilo dovoljno podataka za rekonstrukciju, može objasniti kao posljedica taloženja prašine. Za analizirano razdoblje 26.–27.5.2019. (Slika 20) sinoptički uvjeti pogodovali su produbljivanju visinske ciklone sa središtem nad Tirenskim morem u blizini Sardinije. Advekcija prašine iz Libije prema središnjem i južnom dijelu Jadrana (CAd-u i SAd-u), na prednjoj strani ciklone utjecala je na povećanje (opažene) vrijednosti AOD-a. Talozenje 26.5.2019. iznosilo je $0.27 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ te $0.44 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ na dan 27.5.2019. Obje vrijednosti u oba dana su bile 14.5 i 23.7 puta više od praga za Rogozničko jezero ($0.0186 \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$). Glavnina mase nataložene prašine je posljedica procesa mokrog taloženja, a nešto veći postotni udio

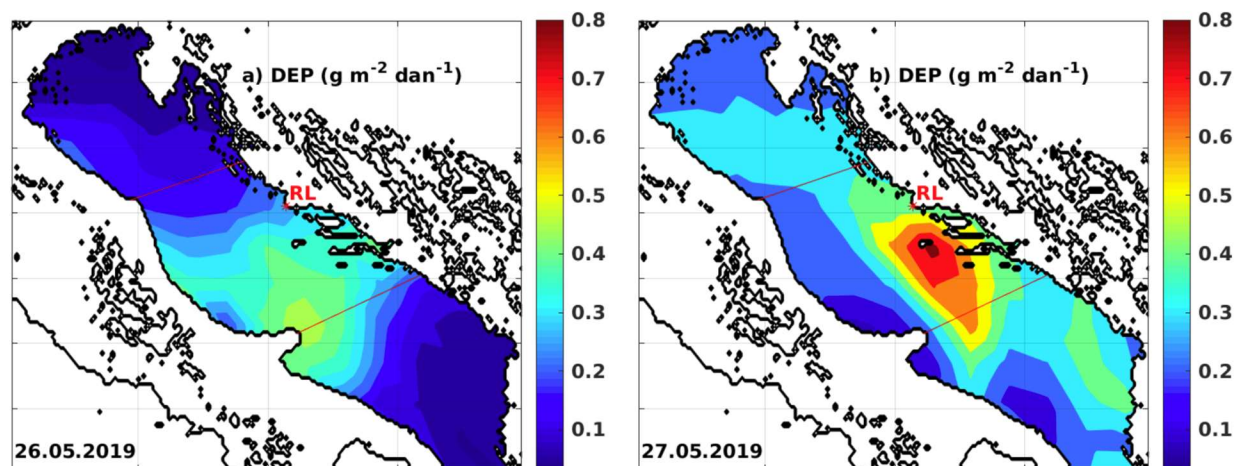
navedenog procesa u ukupnom taloženju zabilježen je nešto više 26.5.2019. (98 %) nego 27.5.2019. (93 %).



Slika 20. (a, b) Prostorna raspodjela geopotencijalne visine 850-hPa plohe (gpm) i optičke debljine aerosola (AOD) na dan (a) 26.5.2019. i (b) 27.5.2019. (c, d) Prosječne emisije prašine za (c) 24.–25.5.2019. i (d) 25.–26.5.2019. Na slikama (c, d) prikazane su putanje unazad ukazujući na izvor prašine iz modela HYSPLIT za (c) 26.5.2019. za svaki sat od 12 do 15 UTC i za (d) 27.5.2019. za svaki sat od 00 do 09 UTC.

Kako bi se odredili izvori i vrijeme emisije prašine, korištene su putanje unazad modela HYSPLIT koje ukazuju na izvor prašine u kombinaciji s poljima emisije prašine iz reanalize MERRA-2. Budući da je mokro taloženje dominantan proces taloženja prašine, vremena početka putanja za razdoblje 26.–27.5.2019. uzeta su za sate kad je bila prisutna oborina. Prema podacima (TRMM, 2011), oborina intenziteta 3 mm h^{-1} je zabilježena 26. svibnja 2019. u 12 i 15 UTC, te intenziteta većeg od 4 mm h^{-1} 27.5.2019. od 00 do 09 UTC.

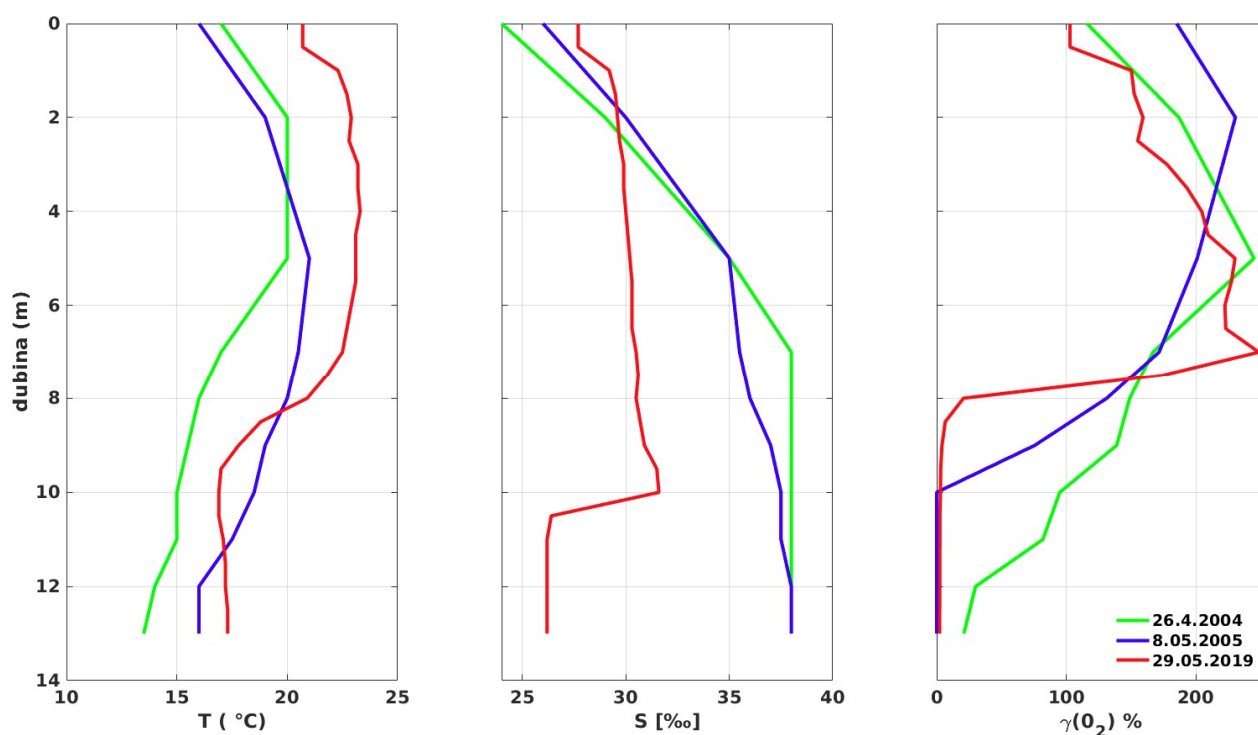
Prema prijašnjim istraživanjima, perjanice prašine u Sredozemnom moru pojavljuju se odvojeno u nekoliko slojeva na visinama od 1.5 do 5 km koji su međusobno odijeljeni čistim zrakom (Hamonou i sur., 1999), što se djelomično podudara i s ovim slučajem. Vertikalni profili omjera miješanja prašine (GMAO, 2015a, nije prikazano) iznad Rogozničkog jezera u satima kad je bila prisutna oborina tijekom epizode prašine imali su maksimalne vrijednosti na visinama između 1 i 3 km. Najveća koncentracija prašine po visini je na području iznad samog izvora (Alpert i sur., 2004). Ipak, tijekom transporta prašina se može naći na različitim visinama (npr. Collaud i sur., 2003), ali u prosjeku se transport odvija u sloju između 800 hPa do 600 hPa (Prospero, 1996). U mnogim studijama epizoda transporta prašine (npr. Barkan i sur., 2005; Rizza i sur., 2018) kao dominantna visina transporta prašine odabrana je izobarna ploha 700-hPa. U ovom slučaju, podudarnost između putanja i područja s anomalijama u emisiji prašine je veća kada putanja počinje u točki iznad 700 hPa. Pomoću odabranih putanja približno je određeno područje izvora prašine (Slika 20) za koje se računa prosječni postotak određenog minerala u erodibilnoj prašini.



Slika 21. Ukupno dnevno taloženje prašine (DEP, $\text{g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$) u Jadransko more za (a) 26.5.2019. i (b) 27.5.2019.

Mineraloška karta (Nickovic i sur., 2012) temeljena je na postotnim vrijednostima udjela pojedinih minerala pri razlučivosti od $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, koji su ovdje izračunati na mrežu točaka reanalize MERRA-2 ($0.65^\circ \times 0.5^\circ$) radi lakše usporedbe. Unatoč velikoj varijabilnosti u prostornoj razdiobi minerala u pustinjskom tlu (Nickovic i sur., 2012), postotak deponiranog fosfora (P) iznosio je

26.5.2019. oko 0.02 % te 27.5.2019. oko 0.03 %, dok je za željezo (Fe) iznosio oko 3.1 % za oba dana. Ova vrijednost za Fe je nešto niža od vrijednosti koje su pronađene u drugim studijima za udio Fe, 3.5 % u Duce i Tindale (1991) te 3.9 % u Rudnick i Gao (2003). Taloženje Fe u Rogozničko jezero procijenjeno je prema prosječnom prostornom udjelu minerala na spomenutim područjima. Ono je iznosilo $8.4 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ prvog dana i $13.5 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ drugog dana, što je u skladu s jačim emisijama te trajanjem i intenzitetom oborina tijekom drugog dana. Na isti način procijenjeno je i taloženje P u Rogozničko jezero, koje je prvi dan iznosilo $5.6 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$, a drugi dan $13 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$, što je dva reda veličine manje u odnosu na iznose taloženja Fe. Ukupno taloženje prašine u Jadranskom moru bilo je veće 27.5.2019. kad je došlo do pomaka područja maksimalnih vrijednosti od talijanske prema hrvatskoj obali u južnom dijelu Jadrana (CAD na Slici 21).



Slika 22. Vertikalni profili temperature, saliniteta i zasićenja kisikom u vodenom stupcu Rogozničkog jezera za vrijeme i/ili nakon taloženja prašine za tri termina: 26.4.2004. (zeleno), 08.5.2005. (plavo), te 29.5.2019. (crveno).

U kiši koja se pojavila 29.5.2019. na području Rogozničkog jezera izmjerena je povećana koncentracija Fe u česticama ($7.70 \mu\text{g L}^{-1}$) i u otopljenoj ($2.32 \mu\text{g L}^{-1}$) frakciji. Navedeno se može vidjeti na Slici 22 kao stanje vodenog stupca označeno crvenim linijama. Toga dana opaža se niži salinitet u jezeru što je posljedica proljetnih pljuskova koji su zabilježeni tijekom nekoliko prethodnih dana na tom području. Istovremeno, elektrokemijska mjerenja potvrdila su prisutnost otopljenog Fe (Bura-Nakić i sur., 2013) u uzorcima uzetim istog dana iz površinskog i srednjeg sloja Rogozničkog jezera (0 – 5 m). Ukupna koncentracija Fe izmjerena u površinskoj vodi jezera (0.5 m) bila je $2.45 \mu\text{g L}^{-1}$. To se dobro slaže s procijenjenom količinom deponiranog Fe ($2.9 \mu\text{g L}^{-1}$), ako uzmemo u obzir da je cjelokupni površinski sloj (0 – 7 m) bio izmješšan (Slika 22) i Fe je u tom sloju bio ravnomjerno zastupljen. Pretpostavlja se da postoji veza između zabilježenog intenzivnog cvjetanja fitoplanktona u svibnju i kasnije u lipnju 2019. (nije prikazano) i zasićenja kisikom u jezeru. Tada je uočeno povećanje zasićenja kisikom do 250 % potencijalno i zbog prethodnog mokrog taloženja prašine (odnosno pljuskova). Naime, oko 20.4.2019. smeđe-crvena kiša zabilježena je na području Rogozničkog jezera (Slika E3 u Dodatku E), kada je vjerojatno kao posljedica toga, povećana koncentracija otopljenog (DOC = 1.77 mg L^{-1}) i organskog ugljika u obliku čestica (POC = 2.39 mg L^{-1}) izmjerena u površinskoj vodi Rogozničkog jezera. Pokazalo se da je “crvena kiša” kao posljedica donosa prašine prilično bogat izvor čestica, zatim koloidnog i otopljenog Fe te da opskrbljuje površinske vode istočnog Sredozemlja topivim, bioraspoloživim Fe (Özsoy i Saydam, 2001).

Eksperimenti fertilizacije prašinom tijekom stratifikacije Sredozemnog mora ukazuju na značajno povećanje koncentracije klorofila, a i primarne produkcije (npr. Ridame i sur., 2014). Primijećeno je da “in situ” obogaćenje Fe, umjetno ili prirodno, rezultira cvjetanjem u kojem dominiraju velike dijatomeje, koje su obično rijetke u stojećoj zajednici mikroalgi (De Baar i sur., 2005). To uključuje posebice članove rodova *Fragilariopsis*, *Pseudo-nitzschia* i *Chaetoceros*. *Chaetoceros curvisetus* i *Cylindrotheca closterium* bile su prevladavajuće vrste fitoplanktona u površinskom sloju (0 – 8 m) Rogozničkog jezera u svibnju 2019. (Slika D1 u Dodatku D) koje su činile 98 % svih vrsta fitoplanktona, s maksimalnom brojnošću od 1.3×10^6 stanica L^{-1} na 5 m dubine (Slika D1 u Dodatku D). *Chaetoceros curvisetus* bio je potpuno odsutan u uzorcima prikupljenim kasnije u ljeto i jesen.

Osim Fe, u istoj kiši izmjerena je viša koncentracija otopljenog ($0.05 \mu\text{g L}^{-1}$) i čestičnog Co ($0.09 \mu\text{g L}^{-1}$) kao biološki relevantnog metala u tragovima, čije podrijetlo se također može vezati uz

donos saharske prašine (Penezić i sur., 2021). Na primjer, cijanobakterije *Synechococcus* i *Prochlorococcus* imaju apsolutnu potrebu za Co koju drugi metali u tragovima ne mogu zamijeniti (Mackey i sur., 2012).

Važno je napomenuti da ne postoji drugi izvor slatke vode za Rogozničko jezero osim oborine i tzv. oborinskih voda. Jezero je okruženo krškim stijinama, a u blizini nema polja, niti bilo kakvih poljoprivrednih i/ili industrijskih aktivnosti. Stoga se lokacija istraživanja Rogozničkog jezera može smatrati relativno čistim područjem (Cvitešić Kušan i sur., 2020) koje u razdoblju istraživanja nije bila pod utjecajem drugih atmosferskih izvora Fe (tj. izgaranja ili antropogenog aerosola). Naime, u razdoblju prije mjerenja zasićenosti kisikom u Rogozničkom jezeru (Slika 22) nije bilo značajnog taloženja drugih vrsta lebdećih čestica (BC, OC, morska sol i sulfati) osim prašine (Slika E1 u Dodatku E). Izuzetak su sulfati, čije je taloženje usporedivo s taloženjem prašine frakcije PM₁, ali je još uvijek značajno manje od ukupnog taloženja prašine. Međutim, sulfata ima u izobilju u morskom okolišu i oni ne mogu biti ograničavajući nutrijent.

Izgaranje kao izvor topivog Fe i produkcije u površinskom sloju mora moglo bi biti od lokalnog značaja, ali općenito pirogeni unos ima mali utjecaj na globalni morski ciklus Fe jer predstavlja najviše 10 % unosa pustinjske prašine (Guieu i sur., 2005). Iako je doprinos tih drugih izvora ukupnom Fe relativno nizak, njihova topljivost (dakle njihov potencijalni učinak na biogeokemiju) obično može biti veća od one mineralnog podrijetla (Ito i sur., 2021). Topivost Fe iz prašine može se povećati u procesu mokrog taloženja (Ito i Shi, 2016). U kiši uzorkovanoj 29.5.2019. izmjereni su povišeni DOC (3.74 mg L⁻¹), kao i sadržaj površinski aktivnih tvari (0.2 mg L⁻¹) (Orlović-Leko i sur., 2020) koje mogu povećati topljivost Fe (Gledhill i Buck, 2012.; Ito i sur., 2021). Slične koncentracije površinski aktivne organske tvari koje mogu zadržati Fe u otopljenoj fazi također su zabilježene u površinskoj vodi jezera. Međutim, taloženje se ne može gledati jednostavno samo kao izvor bioraspoloživog Fe na morskoj površini, već se radi o kompleksnijem procesu. Epizoda velikog taloženja prašine može ubrzati uklanjanje Fe iz vodenog stupca kroz čišćenje (“scavenging”) i može se opisati s kontraintuitivnim efektom zvanim efekt čišćenja prašine (engl. *dust cleaning effect*, Wagener i sur., 2010). Na primjer, u područjima ograničenim s P, kao što je Jadransko more, prva epizoda taloženja prašine može potaknuti biološku aktivnost potaknutu unosom ograničavajućih hranjivih tvari (Pulido-Villena i sur., 2010). Zauzvrat, može se očekivati povećani kapacitet vezanja Fe u morskoj vodi, pa bi još jedna oborina, ako se dogodi u sljedećih

nekoliko dana, mogla uzrokovati puno veće oslobađanje biorasploživog Fe (Wagener i sur., 2010).

S druge strane, pojava epizoda saharske prašine može predstavljati relevantan, iako povremen, izvor DOC-a u morskoj vodi (Galletti i sur., 2020), dok unos alohtonog DOC-a može biti vanjski čimbenik koji utječe na morske (jezerske) ekosustave, potičući rast miksotrofnih i heterotrofnih flagelata (Bergström, 2009).

Značajno povećanje razine zasićenosti kisikom u vodenom stupcu Rogozničkog jezera zabilježeno je 26.4.2004. i 8.4.2005. (Slika 22) tijekom relativno slabog DDE-a. Međutim, intenzivniji DDE-ovi prethodili su ovim događajima u razdoblju 11.–13. i 16.–19.4.2004., kao i 25.–28.3.2005. (Slike E1 i E2 u Dodatku E). Za oba događaja povećanog zasićenja kisikom 2004. i 2005., korelacija između taloženja prašine i koncentracije hranjivih tvari (TIN, NO₃ i SiO₄) pronađene su u površinskom sloju Rogozničkog jezera (0 – 2 m). Nakon epizoda u travnju 2004. u vodenom stupcu Rogozničkog jezera zabilježeno je intenzivno djelovanje heterotrofnih bakterija i autotrofnog pikoplanktona (cijanobakterija) zastupljenog gotovo isključivo rodом Synechococcus spp. (Šestanović i sur., 2005). To je u skladu s radovima koji su izvijestili o ključnoj ulozi taloženja saharske prašine i njenog kemijskog sastava u kontroli primarne proizvodnje, što pogoduje rastu određenih subpopulacija i mijenjanju sastava zajednice fitoplanktona (Mackey i sur., 2012; Ridame i sur., 2014). Mali fitoplankton (< 3 μm) i bakterije su pod većim utjecajem taloženja prašine nego primarni proizvođači, što rezultira više heterotrofički prirodnom sklopu (Richon i sur., 2017). Naime, pojava i sukcesija vrsta u fitoplanktonskim zajednicama često proizlaze iz konkurencije resursa, kao posljedica različitih strategija iskorištavanja hranjivih tvari (Litchman i sur., 2006, 2007). Za gore navedene događaje ostaje pitanje relativne važnosti između trenutnih i prethodnih DDE-ova, odnosno jačih i slabijih DDE-ova na zabilježene biološke aktivnosti. Stvarno taloženje na određenoj lokaciji nije osobito dobro ograničenje za prašinu ili čak za određene hranjive tvari. Ova neodređenost može biti osobito važna u područjima s malo prašine gdje paradoksalno niski unos prašine može imati posebno velik biogeokemijski utjecaj (Mahowald i sur., 2009). Za bolje razumijevanje biogeokemije hranjivih tvari povezanih s prašinom (Fe, N, P, C) u Jadranskom moru, koje je, prema našim rezultatima, sve više izloženo saharskoj prašini, potrebne su detaljnije informacije o atmosferskom unosu i čimbenicima koji utječu na koncentracije otopljenih hranjivih tvari i onih u čestičnom obliku, uključujući odziv prisutnog fitoplanktona i mikrobnih populacija na spomenuti unos, što može biti predmetom budućih istraživanja.

4.2 Analiza epizode donosa prašine iz ožujka 2020.

4.2.1 Opis epizode

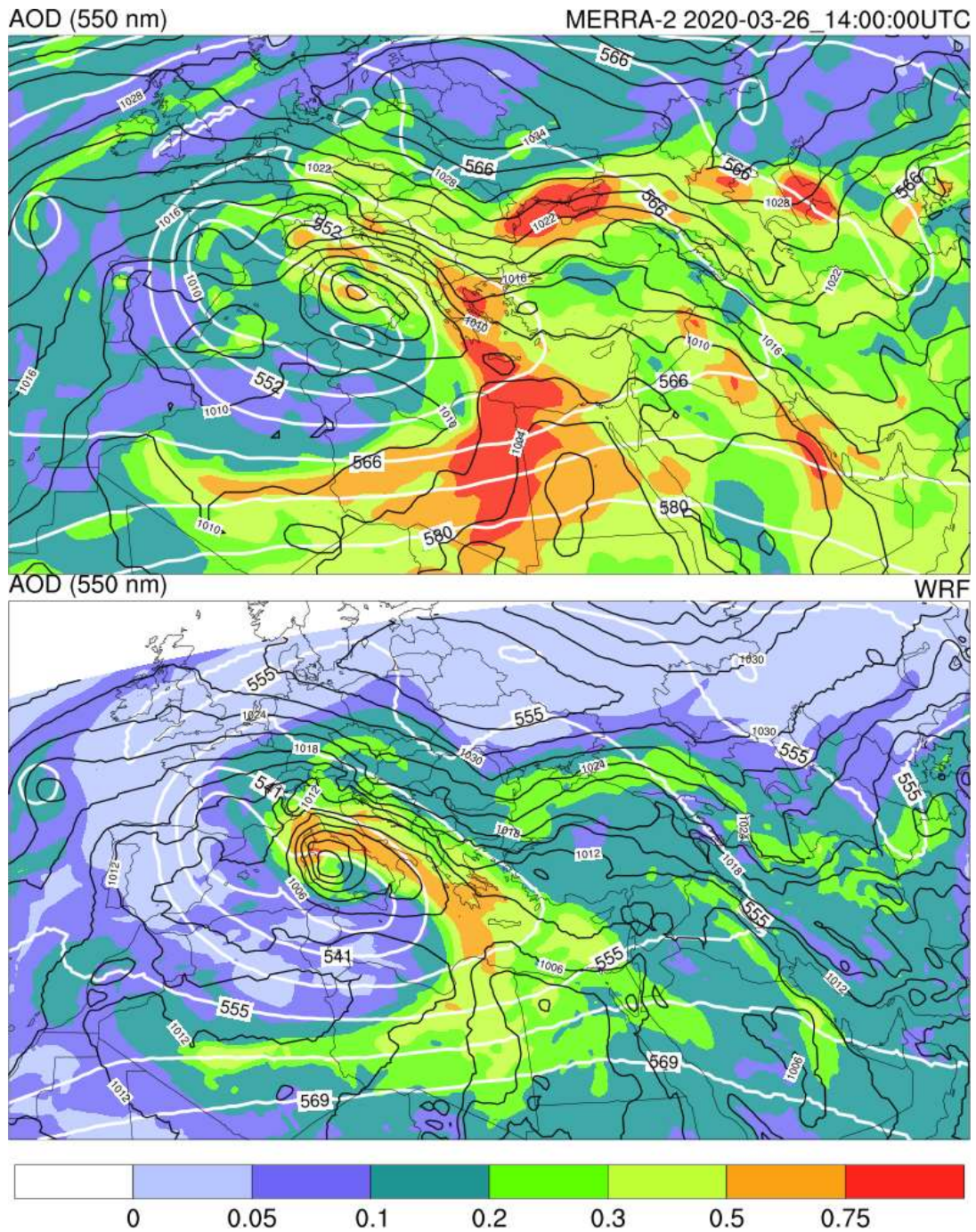
Izniman porast čestica zabilježen je 27.3.2020. na postaji NZZJZ (lokacija na Slici 3b). Koncentracija PM₁₀ izmjerena gravimetrijskom metodom na postaji NZZJZ iznosila je 216 µg m⁻³ na taj dan. Ova brojka znatno je veća od prosječne koncentracije za 2020. godinu koja je iznosila 28 µg m⁻³ i izračunata je iz ukupno 72 mjerenja. To je ujedno i najveća izmjerena vrijednost za ovu godinu, dok je 98. percentil iznosio 59 µg m⁻³. Također je vrijedno spomenuti da su samo dva mjerenja u 2020. godini bila iznad propisane granične vrijednosti na ovoj postaji. Ovi podaci mogu se pronaći u izvješću NZZJZ-a na <https://zzjzpgz.hr/publikacije/kvaliteta-zraka-na-podrucju-pgz-u-2020/>. U procesu upravljanja kvalitetom zraka iznimno je važno razlučiti doprinos prirodnih izvora kao što je mineralna prašina. Pri tome je preporuka da se oduzmu koncentracije izmjerene na regionalnim pozadinskim postajama od onih izmjerenih na urbanim pozadinskim. (<https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/document/fairmode/event/presentation/20100601-h13-107.pdf>). Prema tome, u budućim istraživanjima preporuča se uzeti u obzir i mjerenja na ruralnim postajama koja u ovom istraživanju nisu bila dostupna.

Sinoptička situacija koja je prethodila transportu prašine ukazuje na razvoj atmosferskih sustava odgovornih za transport kako iz sjeverne Afrike, tako i s istoka. Na dane 23. i 24.2.2020. nad Europom bila je prisutna prostrana visinska dolina čija je os bila postavljena u smjeru sjeveroistok-jugozapad od Rusije prema Sardiniji. Ova visinska dolina povezana je s formiranom prizemnom ciklonom iznad sjeverozapadne Afrike i Španjolske čiji je tlak u središtu iznosio 1005 hPa. Osim sniženog tlaka na jugu domene, nad Europom prizemno polje pokazuje velik utjecaj anticiklone na vremenske uvjete čije je središte bilo nad Baltičkim morem.

Uočena prizemna ciklona iznad sjeverozapadne Afrike poznata je i pod nazivom Sharav ciklona (Alpert i Ziv, 1984). Obično se javlja tijekom proljeća zbog povećane baroklinosti i jakog temperaturnog gradijenta između sjeverne Afrike i Sredozemnog mora. Njeno obilježje je da brzo putuje sjevernoafričkom obalom podižući saharsku prašinu, što se odnosi i na ovu situaciju. Na dan 25.3.2020., na jugu Europe, visinska ciklona u retrogradnom kretanju proteže se u jugozapadnom smjeru. Stoga se ciklonalno strujanje nastavlja i omogućuje prizemnoj Sharav cikloni da se pomiče prema središnjem dijelu Sredozemlja gdje se produbljuje. Takva situacija pogoduje transportu

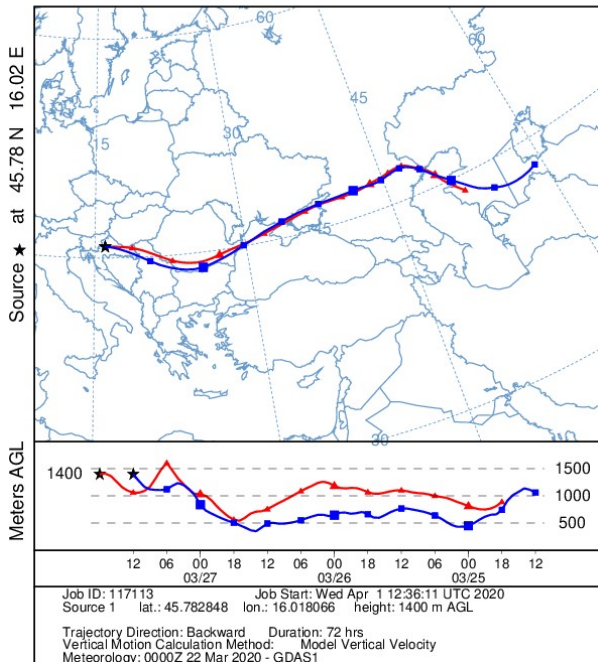
saharske prašine. Snažan gradijent tlaka između ciklone u Sredozemlju i anticiklone na sjeveru glavni je pokretač prijenosa prašine s istoka. Obje perjanice prašine bile su prisutne 26.3.2020. (Slika 23) i jasno se uočavaju kada se promatraju polja AOD-a.

Povratne putanje unatrag (72 sata) HYSPLIT modela potvrđuju postojanje dviju perjanica prašine koje se stapaju jedna s drugom na širem području Balkana (Slika 24). Prema izmjerenim vrijednostima PM_{10} u Zagrebu vrhunac epizode i najveće koncentracije izmjerene su 27.3.2020. u ranim poslijepodnevnim satima. Stoga su na ovoj lokaciji odabrane dvije putanje sa završetkom u 12 i 18 UTC. Putanje u sloju zraka do ~ 4000 m iznad tla mogu se povezati s transportom prašine s istoka, a sloj najbržeg transporta pronađen je u sloju između ~ 1350 i 1750 m nad tlom. (Slika 24a). Putanje završavaju unutar sloja miješanja budući da temperaturna inverzija u 12 UTC počinje na 1600 m (Slike F1 i F3, Dodatak F). Također, ove putanje prelaze pustinjsko područje između Kaspijskog i Aralskog mora 24.3. i 25.3.2020., kada je došlo do emisije prašine (Slika F2, Dodatak F). Navedeno se može zaključiti prema povećanom AOD-u u ovom području. Visina putanja na ovom području također je unutar atmosferskog graničnog sloja (Slike F2 i F3, Dodatak F). Putanje koje završavaju iznad ~ 5000 m nadmorske visine (Slika 24b) ukazuju na visinsku advekciju prašine iz sjeverne Afrike, što se poklapa s premještanjem Sharav ciklone u Tirensko more (Slika 23). Može se primijetiti kako navedene putanje formiraju petlju nad širim područjem Balkana (Slika 24) otprilike od 25.3.2020. u 12 UTC do 27.3.2020. u 18 UTC. Prisutnost azijske perjanice na istom području počinje 26.3.2020. u 18 UTC. Ako se situacija promatra u horizontalnoj ravnini i ako se uzmu u obzir najviše izmjerene koncentracije PM_{10} , saharska prašina bila je prisutna ~ 1 dan prije azijske, a 26.3.2020. obje perjanice bile su prisutne nad istim dijelom Balkanskog poluotoka.

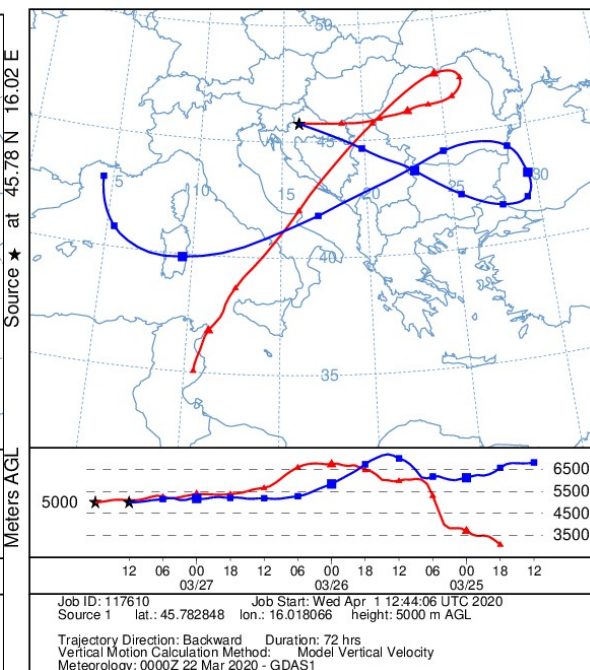


Slika 23. Geopotencijal 500-hPa plohe (gpm), tlak na srednjoj razini mora (hPa) i AOD na 550 nm tijekom epizode donosa prašine 26.3.2020. u 14 UTC: (a) reanaliza MERRA-2 i (b) WRF-Chem.

a) NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 1800 UTC 27 Mar 20
GDAS Meteorological Data



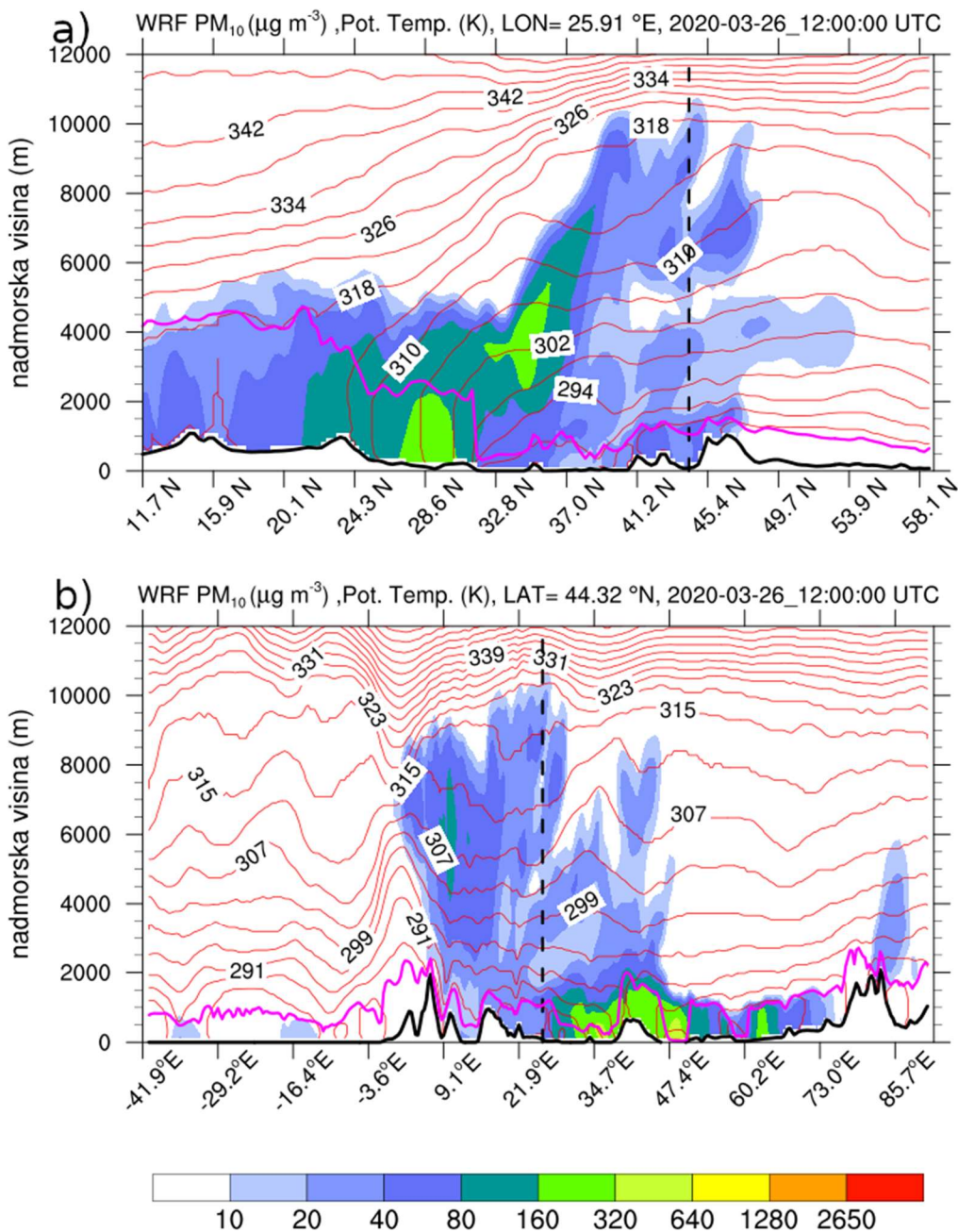
b) NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 1800 UTC 27 Mar 20
GDAS Meteorological Data



Slika 24. Putanje unazad modela HYSPLIT 27.3.2020. koje završavaju iznad Zagreba: (a) 1400 m i (b) 5000 m nadmorske visine. Trajektorije koje završavaju u 18 UTC označene su plavom bojom, a one u 12 UTC crvenom.

S obzirom na rezultate, zaključak je ove analize da je do miješanja dvije perjanice prašine došlo nad područjem Balkana istočno od Zagreba. Ipak ostaje pitanje koliki je relativni utjecaj mogućih izvora (Sahare i Arala). Kemijska i SEM analiza filtra uzorkovanog na NZZJZ-u u Rijeci mogu pridonijeti rasvjetljavanju udjela izvora emisije, što je prikazano kasnije u poglavljima 4.2.3 i 4.2.4. Prema analizi putanja unazad s pripadnim završnim vremenima tijekom maksimalnih izmjerenih koncentracija, prisutnost saharske prašine iznad Balkana bila je duža, ali se advekcija odvijala po visini i iznad atmosferskog graničnog sloja (Slika 25a). Više informacija o advekciji može se dobiti promatrajući meridionalne i zonalne vertikalne poprečne presjeke koncentracije prašine na plohama s presjekom na približnoj lokaciji Bukurešta (Slika 3a, Slika 25). Rezultati HYSPLIT-a upućuju na odvijanje advekcije azijske prašine ispod 2000 m nad tlom. Stoga se iz vertikalnih presjeka može zaključiti da je prva pojava azijske perjanice zapravo bila 25.3.2020. u 18 UTC (Slika 25), ali je u tom trenutku advekcija bila iznad atmosferskog graničnog sloja. Zbog porasta visine graničnog sloja, "prva azijska prašina" unutar graničnog sloja bila je 26.3.2020. oko

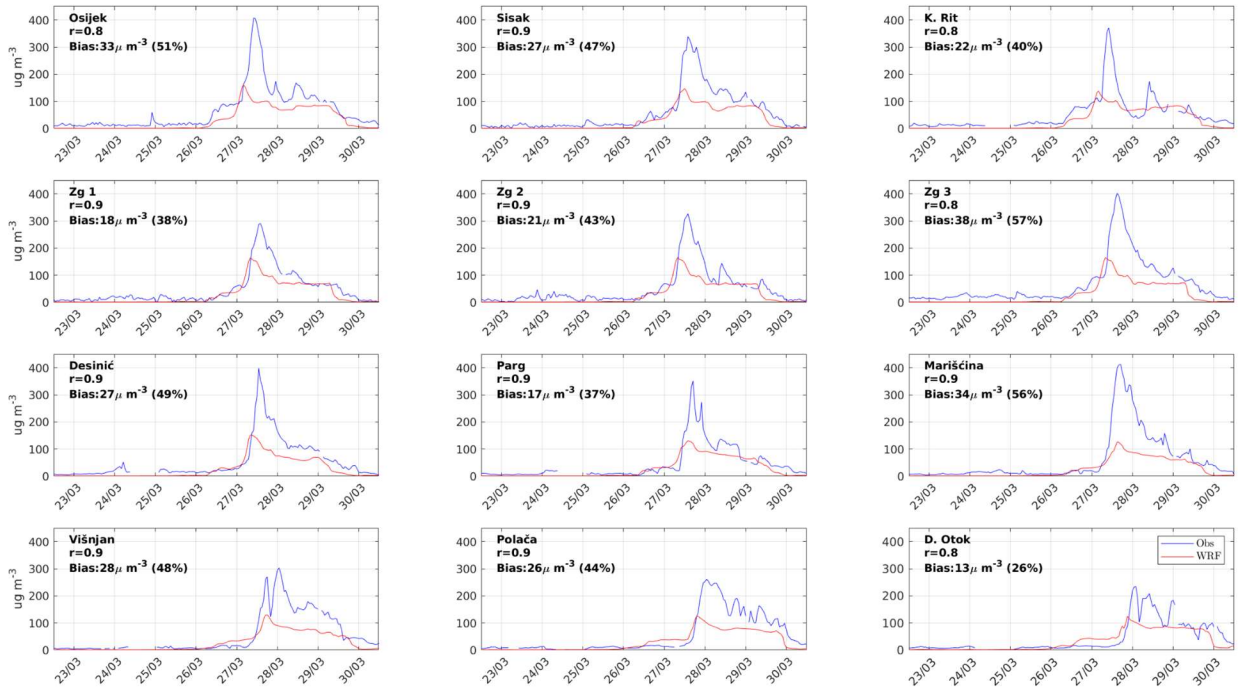
podneva, što se podudara s putanjom koja završava iznad Zagreba u 12 UTC. Iz toga možemo zaključiti da je maksimum PM₁₀ iznad Zagreba povezan s azijskim izvorom prašine.



Slika 25. Modelirani vertikalni presjeci koncentracije prašine (PM₁₀, $\mu\text{g m}^{-3}$) prikazane legendom; potencijalna temperatura (K) (crvene linije), visina atmosferskog graničnog sloja (m) (ružičasta linija) i visina topografije duž presjeka (m) (crna linija): a) meridionalni i b) zonalni na približnoj lokaciji Bukurešta, Rumunjska.

4.2.2 Usporedba rezultata modela WRF-Chem s prizemnim mjerenjima

Uz porast PM_{10} koji je uočen 27.3.2020. na (urbanoj prometnoj) postaji NZZJZ, satne vrijednosti ovog parametra izmjerene su i na više postaja za kvalitetu zraka u Hrvatskoj (Jeričević i sur., 2016), (Slika 26) i u okolnim zemljama (nije prikazano). Izmjerene koncentracije ukazuju da se radi o iznimnoj epizodi donosa prašine. Korištenjem ovih vrijednosti provedena je evaluacija uspješnosti rezultata modela WRF-Chem za simulaciju koncentracija PM_{10} . Vrijednosti koje su preuzete s najnižeg nivoa modela i najfinije domene (d03) uspoređene su s mjerenjima na postajama za kvalitetu zraka u Hrvatskoj korištenjem najbliže susjedne točke u modelu. Kako bi se procijenila uspješnost modela, izračunao se i analizirao skup statističkih parametara (donekle slično kao u Gašparac i sur., 2020) za razdoblje 22.3.2020. u 12 UTC do 30.3.2020. u 12 UTC; standardne devijacije modeliranih (σ_m) i opaženih (σ_o) koncentracija PM_{10} , korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), korijen srednje kvadratne pogreške nakon uklanjanja konstantne pristranosti (RMSD), zatim pristranost i koeficijent korelacije (R). Kriteriji za procjenu uspješnosti modela isti su onima opisanima u poglavlju 2.3, a koji su primijenjeni na evaluaciju taloženja prašine u poglavlju 4.1.1 (npr. Pielke i Mahrer, 1978; Teixeira i sur., 2014; Kehler-Poljak i sur., 2017). Oni su sljedeći: (1) $\sigma_m \approx \sigma_o$, (2) $RMSE \lesssim \sigma_o$, i (3) $RMSD \lesssim \sigma_o$. Prema dobivenim omjerima i zadanim kriterijima, ukupna uspješnost modela pri simuliranju epizode donosa prašine je zadovoljavajuća (Tablica 8, Slika 26). Osim podejnjivanja koncentracija PM_{10} i veličina AOD-a, slaganje modeliranih vrijednosti i mjerenja je prihvatljivo. Modelirani σ_m je nešto manje nego dvostruko veći od izmjerenog σ_o za većinu postaja. Važno je naglasiti da iako antropogene emisije i modeliranje složenih kemijskih procesa nisu uključeni u ovu simulaciju, RMSD, a posebno RMSE, nisu puno drugačiji od σ_o (Tablica 8).



Slika 26. Mjereni i modelirani vremenski nizovi koncentracija PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$) na postajama u Hrvatskoj (lokacije su prikazane na Slici 2b) uz podatak o koeficijentu korelacije (r) te pristranosti (bias) za razdoblje 23.3.–30.3.2020.

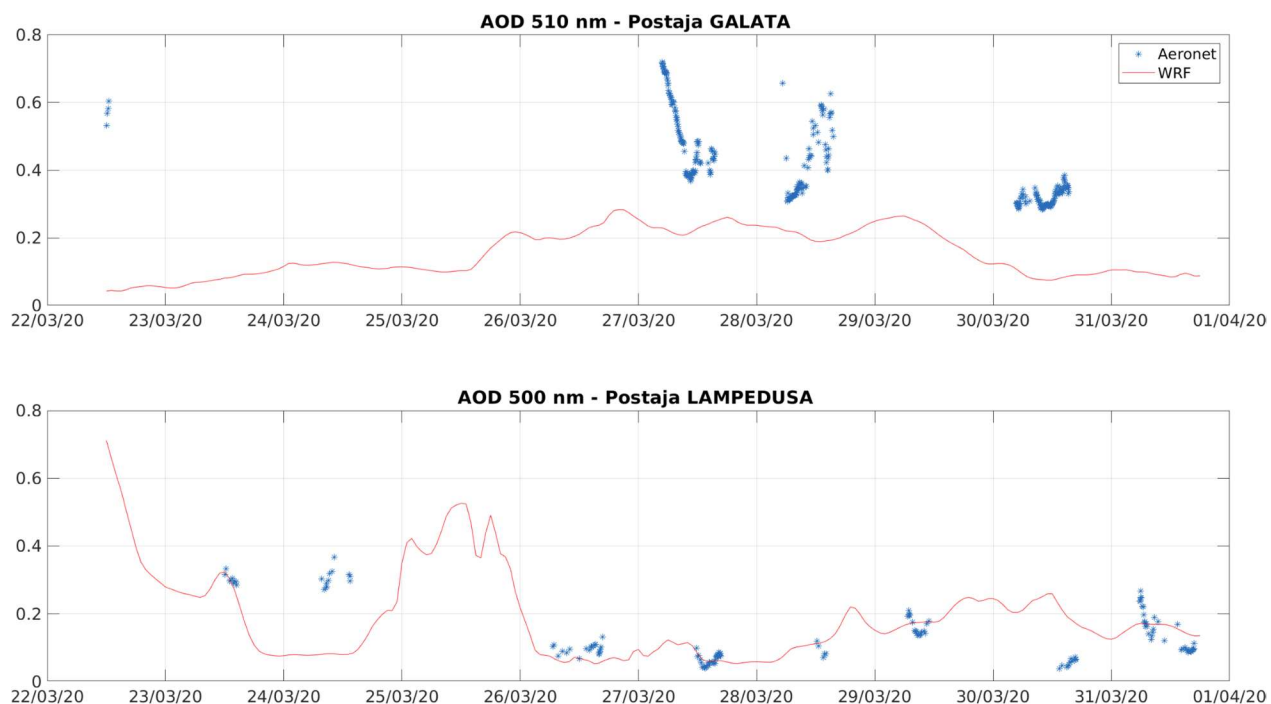
Izuzimanje antropogenih emisija vjerojatno može objasniti postojeću pristranost, ali samo djelomično. Međutim, to se ne može razaznati iz ove analize, budući da se ne može primijetiti sistematska razlika u pristranosti ako se gledaju ruralne i urbane postaje. Osim toga, uspoređujući AOD tijekom vremena emisije prašine (Slika F1), može se zaključiti da WRF-Chem podcjenjuje emisiju prašine. Nekoliko studija pokazuje da polja AOD-a iz reanalize MERRA-2 imaju najbolje slaganje s mjerenjima u usporedbi s raznim modelima (Wu i sur., 2020; Kok i sur., 2021a). Međutim, u modelima se općenito prizemne koncentracije i taloženje često precjenjuju budući da se uglavnom koristi sferična aproksimacija realno asferičnih čestica prašine (Kok i sur., 2021a). S druge strane, emisija i vrijeme boravka u atmosferi grubih čestica prašine ($5 \mu\text{m} < \text{promjer} < 20 \mu\text{m}$) obično se podcjenjuju. U ovoj studiji koristi se GOCART model u kojem je najveća čestica ona efektivnog promjera od $16 \mu\text{m}$. Za većinu modela dodatni problem je pojava pristranosti u atmosferskom opterećenju prašinom na području iznad izvora prašine (Ridley i sur., 2016; Kok i sur., 2021a). Ova studija dodatno potvrđuje tu činjenicu; kao što je prije spomenuto, kvalitativno

se može zaključiti da je tijekom procesa emisije, veličina AOD iznad izvora prašine niža u rezultatima WRF-Chem-a u usporedbi s onima iz reanalize MERRA-2 (Slika F1). Izvori pustinjske prašine približno su određeni putanjama unazad HYSPLIT, ali se podcjenjivanje može vidjeti i na širem/cijelom području simulacije. Kao što je spomenuto u odjeljku 3.4.1, prikaz izvora prašine u modelu GOCART temelji se na jednostavnoj funkciji izvora (Jednadžba 4) koja pokriva široko područje u gruboj mreži točaka ($10^\circ \times 10^\circ$) i izračunava se iz podataka o nadmorskoj visini/topografiji pri razlučivanju od $1^\circ \times 1^\circ$ što je prihvatljivo razlučivanje za velika područja poput Sahare. U studiji Cremadesa i sur. (2017) pokazalo se da zadana karta erodibilnosti u modelu WRF-Chem dovodi do podcjenjivanja emisija prašine u manjim područjima kada se simulacije rade s finijim razlučivanjem. Ta činjenica je najvjerojatnije objašnjenje za podcjenjivanje AOD-a i PM_{10} u ovoj simulaciji, posebno zato što je erodibilnost iznad pustinje Aralkum nula. Gašparac i sur. (2020) u procjeni koncentracija PM_{10} koje su dobivene modelom WRF-Chem također navode da podcijenjene modelirane koncentracije PM-a mogu biti zbog lošije procjene regionalnog donosa onečišćenog zraka u slučaju statički stabilnih atmosferskih uvjeta uobičajenih za anticiklonalne situacije.

Kako bi se dodatno potvrdila ta činjenica, radila se usporedba vremenskih nizova AOD iz modela WRF-Chem s vrijednostima preuzetim s dvije postaje unutar mreže AERONET. Postaje su izabrane ovisno o lokaciji u odnosu na azijske i afričke putove transporta i advekcije prašine u atmosferi (Slika 27). Jedna postaja, Galata, nalazi se na zapadnoj obali Crnog mora ($43^\circ 2' 42''$ N, $28^\circ 11' 34.8''$ E), dok je druga smještena na Lampedusi ($35^\circ 31' 1.2''$ N, 12.632 E), otoku koji se nalazi u Sredozemlju sjeverno od afričke obale. Ova usporedba sa staničnim opažanjima dodatno je potvrdila da model podcjenjuje AOD. Veće podcjenjivanje je uočeno na postaji Galata, gdje su vrijednosti 27.3.2020. bile i do 3.5 puta veće od onih iz modela. Iako na postaji Lampedusa sporadično nedostaju mjerenja 25.3.2020. tijekom transporta iz Afrike (zbog naoblake), može se reći da se simulacije na toj postaji bolje podudaraju s dostupnim opažanjima. Budući da su te postaje u relativnoj blizini izvora prašine (osobito Lampedusa), povećanje AOD-a može se pripisati mineralnoj prašini emitiranoj tijekom epizode. Osim toga, na pojavu pristranosti rezultata modela mogu utjecati drugi čimbenici kao što je simulirana vlažnost tla (npr. Sardo i sur., 2022).

Tablica 8. Usporedba satnih koncentracija PM₁₀ (µg m⁻³) modeliranih pomoću WRF-Chem-a (PM_{10m}) s mjerenjima (PM_{10o}) na postajama za praćenje kvalitete zraka u Hrvatskoj razdoblje 23.3.–30.3.2020. Usporedba se radi pomoću skupa statističkih parametara: standardne devijacije modeliranih (σ_m) i opaženih (σ_o) koncentracija PM₁₀, korijena srednje kvadratne pogreške (RMSE), korijena srednje kvadratne pogreške nakon uklanjanja konstantne pristranosti (RMSD), zatim pristranosti (BIAS) i koeficijenta korelacije (R).

| STAT. | <PM _{10o} > | <PM _{10m} > | σ_o | σ_m | RMSE | RMSD | σ_m/σ_o | RMSE/ σ_o | RMSD/ σ_o | R | BIAS |
|------------------|----------------------|----------------------|------------|------------|------|------|---------------------|------------------|------------------|-----|------|
| Osijek | 65.3 | 32.2 | 78.9 | 40.7 | 60.5 | 50.7 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 33.1 |
| Sisak | 57.7 | 30.5 | 75.6 | 39.7 | 51.5 | 43.8 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.9 | 27.1 |
| K. Rit | 53.8 | 32.2 | 64.2 | 37.7 | 48.4 | 43.3 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 21.6 |
| Zg 1 | 46.4 | 28.6 | 60.9 | 40.2 | 36.6 | 32 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.9 | 17.8 |
| Zg 2 | 49.8 | 28.5 | 66.1 | 40 | 43.8 | 38.2 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.9 | 21.3 |
| Zg 3 | 67.2 | 28.9 | 82.6 | 40.4 | 65.9 | 53.6 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 38.3 |
| Desinić | 55.3 | 28.3 | 72.6 | 38.3 | 51.7 | 44.1 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.9 | 26.9 |
| Parg | 47.4 | 30 | 64.2 | 37.1 | 40.4 | 36.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 17.4 |
| Mariščina | 60.2 | 26.6 | 92.2 | 33.7 | 71.6 | 63.2 | 0.4 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 33.7 |
| Višnjan | 58.2 | 30.5 | 76 | 34.6 | 54.3 | 46.7 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.9 | 27.7 |
| Polača | 59.1 | 33.3 | 74.3 | 36 | 53.2 | 46.6 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.9 | 25.8 |
| D. Otok | 48.7 | 36.1 | 59.2 | 36.3 | 39 | 36.9 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 12.5 |



Slika 27. Opaženi i modelirani vremenski nizovi AOD-a na 500 nm za postaje Galata i Lampedusa (lokacije su prikazane na Slici 2a) za razdoblje 22.3.–1.4.2020.

4.2.3 Kemijski sastav PM₁₀ prikupljenih tijekom intenzivnog donosa prašine u ožujku 2020.

Kako bi se bolje identificirali mogući izvori, provedene su kemijske analize uzoraka prašine odnosno prisutnost tipičnih saharskih markera prašine. Također se procijenila moguća prisutnost onečišćujućih tvari povezanih s različitim zračnim masama. Tijekom intenzivnog prodora prašine u sjeveroistočnom dijelu Jadrana na postaji NZZJZ (lokacija vidljiva na Slici 2b) izmjerene su i do 7 puta veće koncentracije od uobičajenih PM₁₀ (216 $\mu\text{g m}^{-3}$) (Tablica 9). Koncentracije metala (Pb, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn) ukazuju na povišene vrijednosti Fe (2.676 $\mu\text{g m}^{-3}$) i Mn (3.495 $\mu\text{g m}^{-3}$) nakon usporedbe s uzorcima prikupljenim prije i poslije intenzivnog donosa prašine (Tablica 9). Te su koncentracije također nekoliko puta veće od onih uobičajeno mjerenih na istom području (Mifka i sur., 2021). Obično su koncentracije Fe i Mn, kao i Ca i Ti veće tijekom advekcije saharske prašine u usporedbi s godišnjim srednjim vrijednostima za određeno područje (Federici i sur., 2018). Ukupna koncentracija PAU-a iznosila je 2.636 $\mu\text{g m}^{-3}$ i bila je u granicama prethodno izmjerenih koncentracija na istom mjestu za dane kad nije zabilježen donos prašine (Tablica 10). Značajno

veće vrijednosti izmjerene su za BbF, BkF, Chr i IP. Utvrđeno je da su BbjF i Bghip prevladavajući PAU-i u lukama i transektima u atmosferi iznad morske površine južnog i istočnog Sredozemlja (Romagnoli i sur., 2016). Dijagnostički omjeri PAU-a koji se obično koriste za identifikaciju izvora (Bap/BghiP = 0.337 ne-prometni; Flo/(Flo+Pyr) = 0.31 emisija benzina i Ant/(Ant+Phe) = 0.092 petrogeni izvor) pokazuju da su identificirani PAU-i preživjeli kemijsku i fotokemijsku razgradnju tijekom daljinskog transporta, te su vjerojatno petrogenog podrijetla (Federici i sur., 2018). Iako bi se očekivalo da prašina koja dolazi iz pustinjskog područja Aralkuma također može sadržavati povišene PAU-e, s obzirom da se to područje smatra zagađenim (O'Hara i sur., 2000; Whish-Wilson, 2002), izmjerene koncentracije PAU-a nisu povećane u odnosu na prosječne vrijednosti (Tablica 10).

Tablica 9. Masene koncentracije PM₁₀ (µg m⁻³) i metala (µg m⁻³) iz uzoraka prikupljenih na postaji NZZJZ u Rijeci tijekom događaja donosa prašine (27.3.2020.) te u uzorcima sakupljenim prije i nakon.

| Datum | PM ₁₀ | Pb | Cd | Cu | Zn | Fe | Mn |
|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11/03 | 31 | 0.019 | 0.338 | 0.194 | 0.187 | 1.804 | 0.469 |
| 18/03 | 24 | 0.011 | 0.279 | 0.221 | 0.167 | 0.793 | 0.354 |
| 27/03 | 216 | 0.018 | 0.247 | 0.268 | 0.016 | 2.676 | 3.495 |
| 30/03 | 19 | 0.006 | 0.083 | 0.143 | 0.129 | 0.272 | 0.364 |

Tablica 10. Masene koncentracije ($\mu\text{g m}^{-3}$) PM_{10} i PAU-a (ng m^{-3}) dobivene iz uzoraka prikupljenih na postaji NZZJZ u Rijeci 27.3.2020.

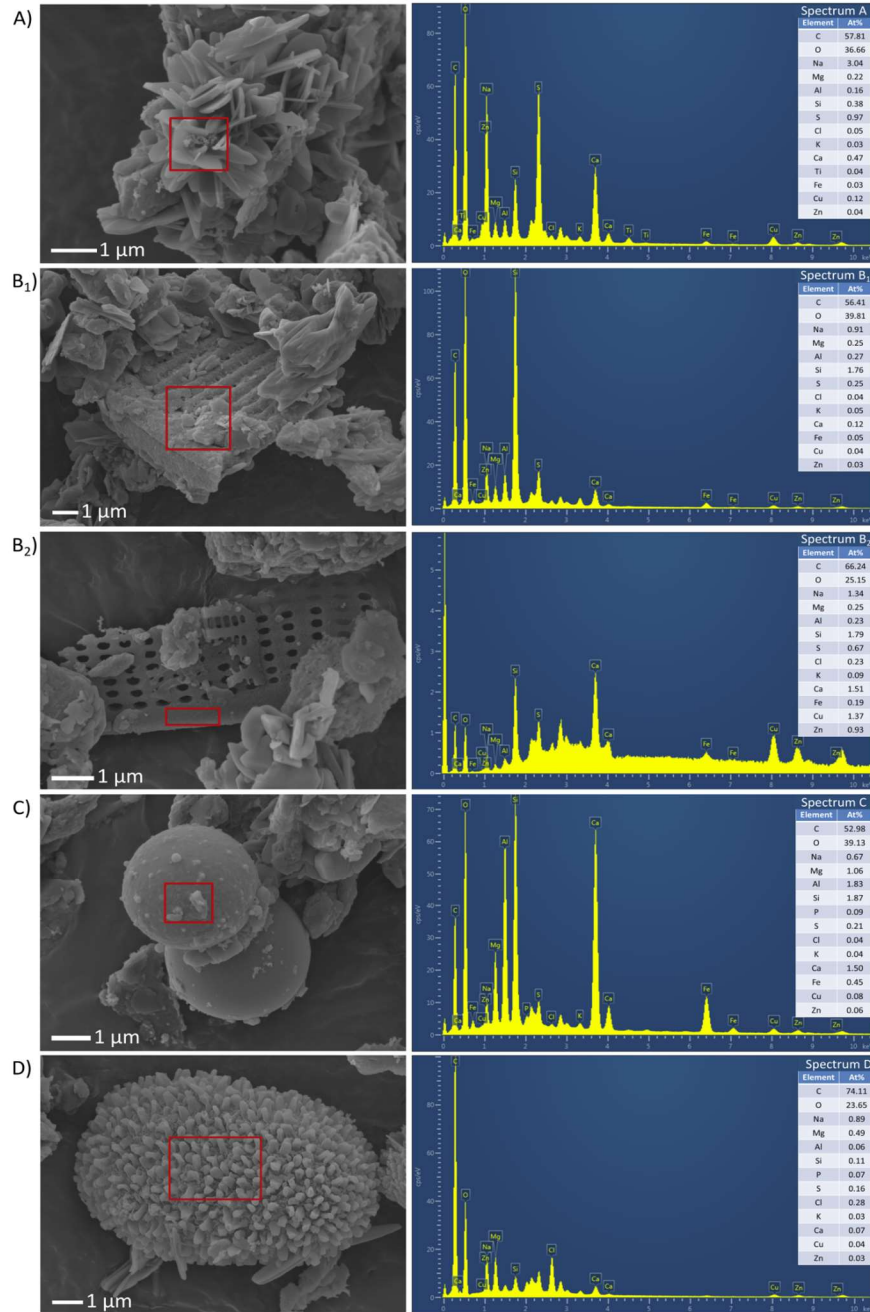
| Datum | 11/03 | 18/03 | 27/03 | 30/03 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| PM₁₀ | 31 | 24 | 216 | 19 |
| Naph | <0.003 | <0.003 | <0.003 | <0.003 |
| Ace | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| Flr | <0.007 | <0.007 | <0.007 | <0.007 |
| PHE | 0.037 | 0.028 | 0.089 | 0.13 |
| ANTH | 0.007 | <0.003 | <0.003 | 0.004 |
| FLO | 0.164 | 0.125 | 0.163 | 0.305 |
| PY | 0.19 | 0.105 | 0.147 | 0.186 |
| BaA | 0.033 | 0.052 | 0.092 | 0.076 |
| Chr | 0.23 | 0.08 | 0.155 | 0.124 |
| BbF | 2.205 | 0.416 | 0.805 | 0.47 |
| BkF | 1.042 | 0.244 | 0.464 | 0.244 |
| BaP | 0.545 | 0.142 | 0.173 | 0.098 |
| DBA | 0.014 | 0.003 | 0.008 | 0.006 |
| BghiP | 0.423 | 0.09 | 0.164 | 0.081 |
| IP | 1.043 | 0.208 | 0.375 | 0.224 |
| UKUPNO PAU | 5.933 | 1.493 | 2.635 | 1.948 |

4.2.4. Mineralni sastav PM₁₀

Slike SEM (Slike 28 i G1 u Dodatku G) filtra s PM₁₀ uzorkovanim 27.3.2020. na postaji NZZJZ potvrđuju morfologiju tipičnu za: glauberit (Na₂Ca(SO₄)₂) ili CaSO₄ x 2H₂O gips pustinjsku ružu (Slika 28A), aluminosilikat s ugrađenim Fe (Slika 28C), kalcit (Slike G1 i 28A), natrijev klorid (Slike G1 i 28B) i čestice primarnog biološkog aerosola (Slika 28D). Na nekim slikama vidljiv je i biološki materijal (Slike 28B1 i 28B2) sličan kosturu dijatomeje. Dostupni mineraloški rezultati nisu nužno dovoljni za točno određivanje izvora, ali identificirani minerali podupiru podrijetlo iz Sahare, slično onome što sugerira analiza metala. Prašinu iz Aralkuma karakteriziraju uglavnom kvarc, kalcit i dolomit (Groll i sur., 2019).

Zanimljivo je da je na području Ljubljane u Sloveniji, tijekom iste intenzivne epizode donosa prašine, zabilježena vrlo visoka satna koncentracija PM₁₀ (do 400 µg m⁻³). Rezultati na temelju analize SEM⁵ (neobjavljeni rezultati), pokazali su da su zrnca prašine bila prevladavajuće u rasponu veličine od 1 µm do 100 µm, a većinom su bila veličine oko 6 µm (tako da su to doista čestice PM₁₀). Kemijska analiza pojedinih zrnaca pokazala je da se prašina najvećim dijelom sastoji od zrnaca kvarca, željeznih oksida i hidroksida, aluminijevih oksida i raznih soli. Između zrnaca prašine utvrđena je prisutnost fragmenata pojedinačnih mikrofosila, uglavnom dijatomeja, što je u skladu s ovdje prikazanim rezultatima (Slika 28 B1/B2).

⁵<https://bojanambrozic.com/2020/04/02/analiza-puscavskega-peska-z-elektronskim-mikroskopom>



Slika 28. Reprezentativni SEM (lijevo) i EDX spektar (desno) filtra koji nosi PM₁₀ prikupljene tijekom epizode intenzivnog donosa prašine u ožujku 2020. te prikazuje: (A) glauberit Na₂Ca(SO₄)₂ i/ili CaSO₄ x 2H₂O, pustinjsku gips ružu tipičnu za sjever Afrike; (B1/B2) skelet dijatomeja pomiješanih s prašinom; (C) alumosilikate s ugrađenim Fe; (D) primarne biološke lebdeće čestice slične onima pronađenim u Barkley i sur. (2021).

4.3 Analiza epizode donosa prašine iz rujna 2015.

4.3.1 Analiza sinoptičke situacije

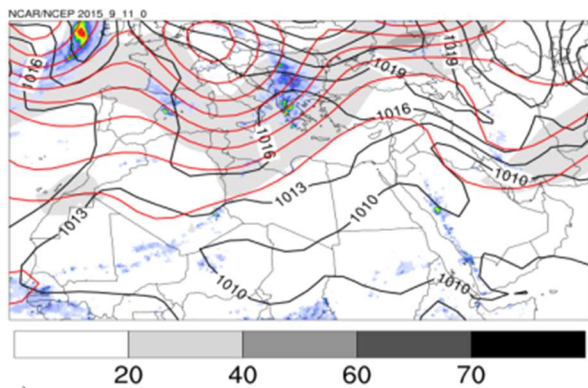
Prema porastu koncentracije PM₁₀ zabilježenom na talijanskim postajama ističe se još jedan slučaj značajnijeg donosa prašine (Tablica 3). Događaj je zabilježen od 14. do 19.9.2015. U cilju daljnjeg istraživanja odnosa između sinoptičkih procesa i donosa prašine, korišteni su podaci reanalize NCAR/NCEP⁶ (Kalnay i sur., 1996) za brzinu vjetera, geopotencijala 200-hPa plohe, prizemni tlak sveden na srednju razinu mora, te 24-h akumulirana oborina iz satelitskih podataka⁷ (Slika 29). Na dan 10.9.2015. visinska dolina protezala se preko cijelog Sredozemnog mora, a greben anticiklone bio je prisutan nad Iberijskim poluotokom. Ovaj sustav se premještao prema istoku, te je istog dana primijećena slaba oborina nad područjem od Mauritanije preko Malija, jugoistočnog Alžira, sjeveroistočnog dijela Nigerije, pa do zapada Libije (blizu granice Tunisa). Tijekom 11.9. i 12.9.2015. prednji dio visinske doline premještao se s Atlantika prema sjeveru Afrike, te se protezao južno sve do sjeverozapadne granice između Alžira i Maroka. Na stražnjoj strani doline bila je prisutna subtropska mlazna struja, a koja se može uočiti na 200 hPa, dok smjer vjetera na prednjoj strani doline na 500 hPa postaje jugozapadni. Istovremeno, jezgra spomenute mlazne struje na pozadinskoj strani doline počinje formirati ciklonu sa središtem nad Irskom. Akumulirana 24-h oborina nad Atlas gorjem i sjevernim Marokom 12. i 13.9.2015. bila je do 50 mm (Slika 29c). U razdoblju do 16.9.2015. jezgra mlazne struje pomiče se južno prema osi doline, a ciklona nad Irskom se produbljuje do 998 hPa i premješta nad Biskajski zaljev (Slika 29g). Desno, tj. izlazno područje mlazne struje proteže se od sjevera Afrike preko Azurne obale, pa do sjevernog Jadrana. Brzina vjetera po vertikali, ali i u vremenu se mijenja. U popodnevrim satima brzina vjetera jugozapadnog smjera s brzinama do 30 m s⁻¹ na 700 hPa raste do 60 m s⁻¹ na 200 hPa. Posljedica toga je brza advekcija prašine nad Sredozemlje/Jadran.

Iako model 11.9.2015. precjenjuje jačinu ogranka anticiklone koji se tada pružao od Rusije prema središnjoj Europi, što dovodi do precijenjene vrijednosti akumulirane oborine, on je dobro reproducirao glavne sinoptičke strukture i prostornu razdiobu oborine (Slika 29). Posebno dobro je model reproducirao visinska sinoptička polja. To se odnosi i na greben, koji se protezao od sjevera

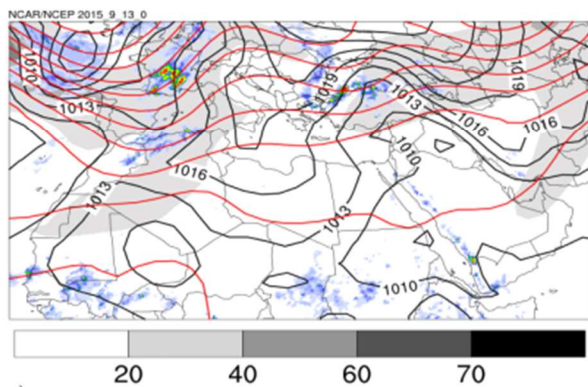
⁶ <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

⁷ <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>

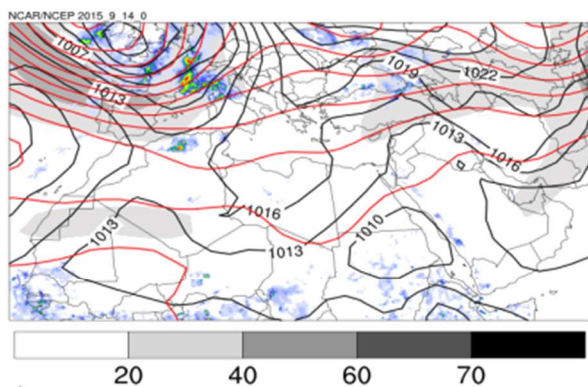
Afrike prema sjeveroistoku Europe, i na visinsku ciklonu s pripadnom dolinom koja se spuštala od Beneluksa prema Jadranu. Posljedica ovakve razdiobe sustava bilo je jugozapadno visinsko strujanje. Sličan zaključak vrijedi i za 13. i 14.9.2015.; model dobro reproducira sinoptičke strukture, ali je oborina radi pojačane ciklone nad Balkanskim poluotokom pomaknuta više prema istoku 13., a 14.9.2015. iz tog razloga WRF-Chem precjenjuje oborinu na južnoj obali Crnog mora. Dana 16.9.2015. model jako dobro reproducira produbljivanje ciklone nad Biskajskim zaljevom, ali visinsko strujanje ima jače izraženu zapadnu komponentu nad Jadranom, odnosno, greben po visini je u modelu malo slabije izražen, a sve to dovodi do razlike u oborini pa model daje akumuliranu oborinu nad Jadranom, dok u reanalizi u kojoj imamo jugozapadnu struju ta oborina izostaje.



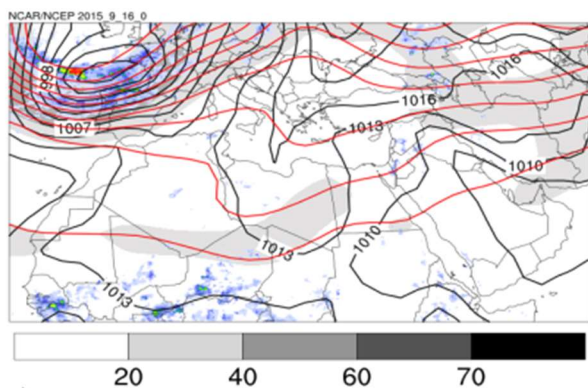
a)



c)

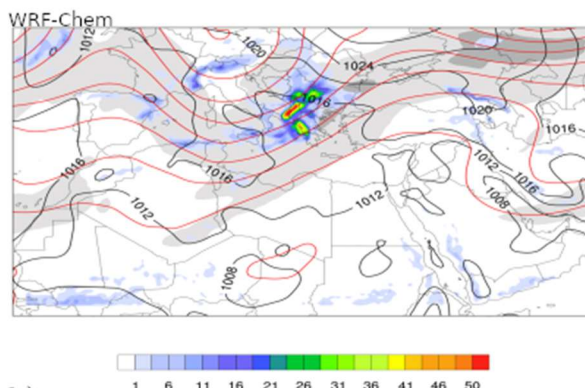


e)

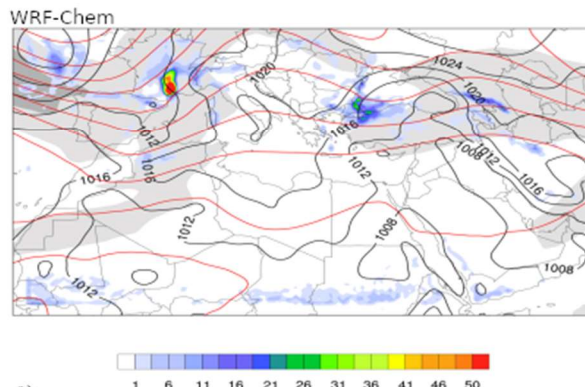


g)

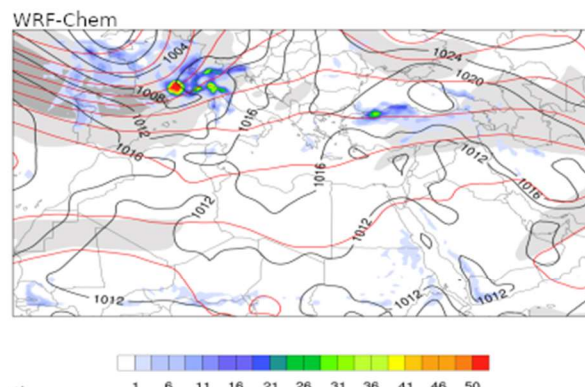
Vjetar na 200 hPa (m/s)



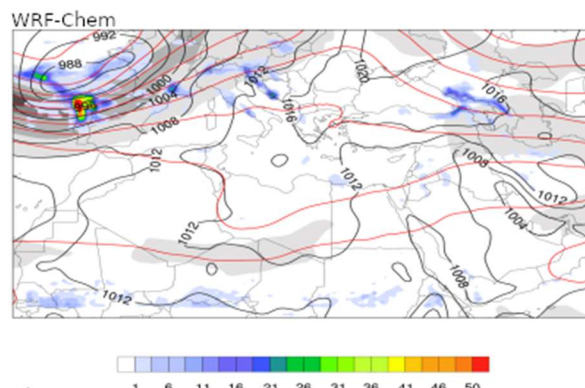
b)



d)



f)



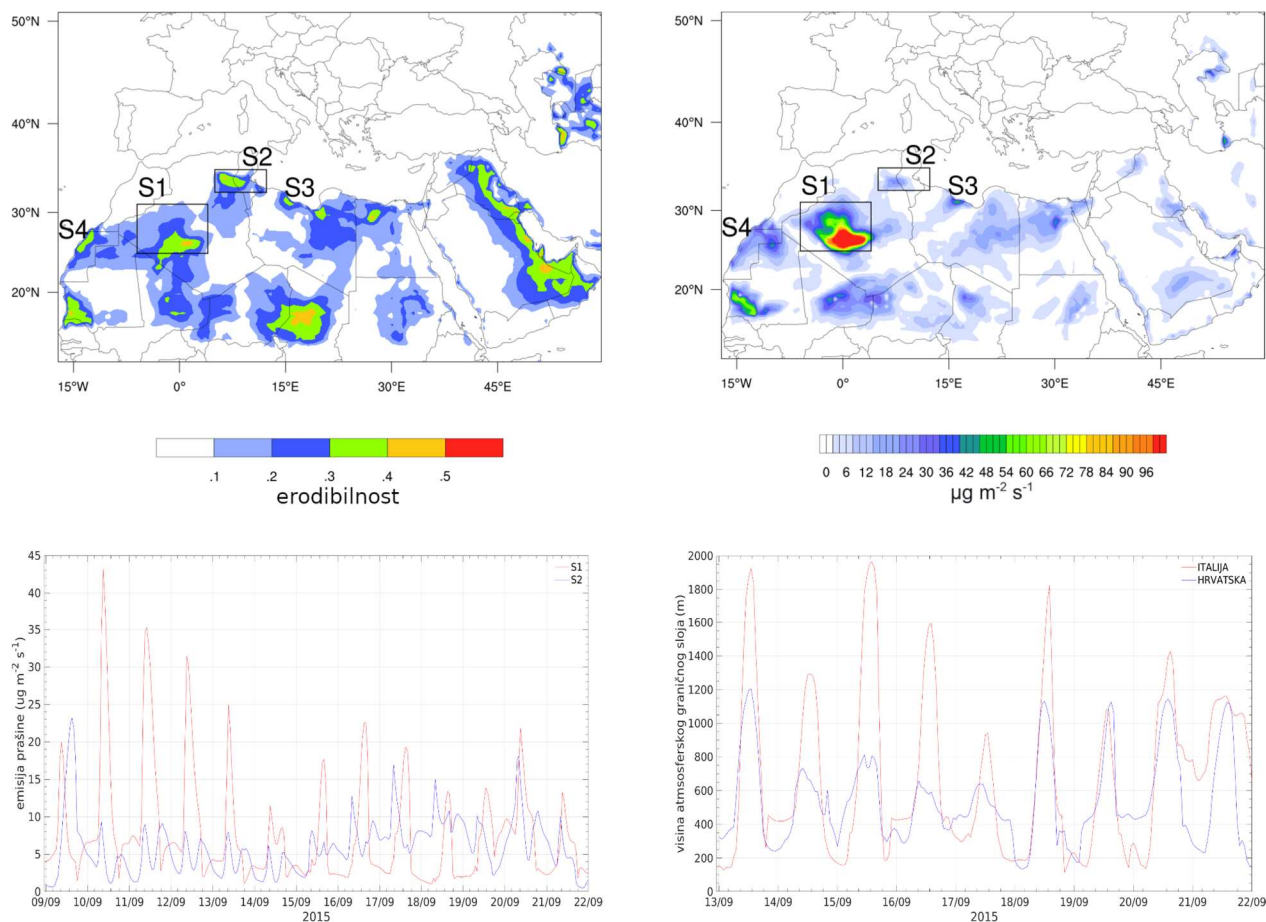
h)

24-hr akumulirana oborina (mm)

Slika 29. Sinoptička situacija uoči i tijekom donosa prašine drugog simuliranog slučaja. Polja (a, c, e, g) se odnose na mjerenja i polja iz reanalize te (b, d, f, h) na modelirana polja iz modela WRF. Prikazan je geopotencijal 200-hPa plohe (crvene linije) i pripadna brzina vjetra (sivo sjenčanje, ms^{-1}), prizemni tlak sveden na razinu mora (crne izobare, hPa) iz reanalize NCAR/NCEP i 24-h akumulirana oborina iz GPM-a (sjenčanje u boji, mm) za: (a, b) 11.9.2015., (c, d) 13.9.2015., (e, f) 14.9.2015., (g, h) 15.9.2015. u 00 UTC.

4.3.2 Identifikacija izvora prašine

Glavni uvjeti za emisiju prašine su erodibilna površina tla (Jednadžba 4, Slika 30a), što ovisi o prisutnom vegetacijskom pokrovu, količini vlage u tlu i brzini vjetra iznad određene granične brzine, a što je objašnjeno u poglavlju 3.3.1. Da bi se otkrila područja izvora tijekom ove epizode, odnosno potvrdila hipoteza o donosu iz Sahare (Tablica 3), ukupna emisija iz modela WRF-Chem izračunata je kao zbroj emisija prašine svih pet veličinskih razreda unutar sheme za emisiju prašine modula GOCART. Potom su satne emisije u svakoj točki modela vremenski usrednjene u razdoblju 10.–16.9.2015. Time su određena četiri glavna izvora prašine na području sjevera Afrike (Slika 30b). Razvoj sinoptičke situacije (opisano u prethodnom poglavlju) u tom razdoblju pogodovao je donosu prašine iz izvora S1 koji se nalaze u jugozapadnom Alžiru, i S2 koji se nalazi na granici između Tunisa i Alžira. Odgovarajuća karta erodibilnosti (Slika 30a, Jednadžba 4) ukazuje na visoki postotak erodibilnosti na područjima izvora. Vremenska promjena prostorno usrednjenih emisija prašine za odabrane izvore prašine ukazuje na dominaciju u aktivnosti izvora S1 u odnosu na S2 prije 16.9.2015.



Slika 30. Emisije prašine iz modela WRF-Chem: (a) erodibilnost, (b) ukupna emisija prašine vremenski usrednjena u točkama modela na izvorima prašine S1 i S2, (c) vremenski niz emisije prašine ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) iz područja ograničenog pravokutnicima prikazanim u (a) i (b), (d) visina atmosferskog graničnog sloja (PBL, m) iz točaka mreže WRF-Chem u blizini Ancone (Italija) i Rijeke (Hrvatska).

Prašina emitirana nakon 16.9.2015. zbog razvoja sinoptičke situacije bila je advektirana dalje prema istoku, što izlazi iz domene interesa ovog istraživanja. Vremenski niz emisija na Slici 30c ukazuje na intenzivan dnevni hod relevantnih izvora. U izvoru S1 snažan jutarnji maksimum javlja se oko 09 UTC, dok S2 uglavnom ima dodatni maksimum u poslijepodnevni satima. Prema rezultatima modela WRF-Chem, polje vjetra ukazuje na postojanje noćne niske mlazne struje te na promjenu njene strukture s čime je najvjerojatnije povezan jutarnji maksimum. Ova veza je dobro poznata iz nekoliko studija (Knippertz, 2008.; Fiedler i sur., 2013), dok su poslijepodnevne i večernje emisije relativno slabije i uzrokovane su procesima nejasnih uzroka. Heinold i sur. (2013)

u studiji modeliranja otkrili su da se 40 % prašine emisije odnose na proces promjene u strukturi noćne niske mlazne struje i 40 % na pješćane konvektivne oluje (Haboob), dok se 20 % emisija odnosi na neidentificirane procese kao što su: suha konvekcija, pojava obalne cirkulacije zraka (smorca) između kopna i mora i/ili pojava dolinskog vjetra odnosno uzlaznog vjetra obronka, a događaju se oko podneva. Identifikacija procesa emisije prašine vrlo je složena i zahtijeva simulacije na gustoj mreži točaka s razlučenom konvekcijom (Heinold i sur. 2013; Roberts i Knippertz, 2014; Pantillon i sur. 2015). Budući da je slaganje modela i mjerenja PM₁₀ na jadranskim postajama iznimno dobro, a što će se pokazati u kasnijim poglavljima, ovdje nisu provedene takve detaljne simulacije uzroka prijenosa prašine s pustinjske površine u atmosferu.

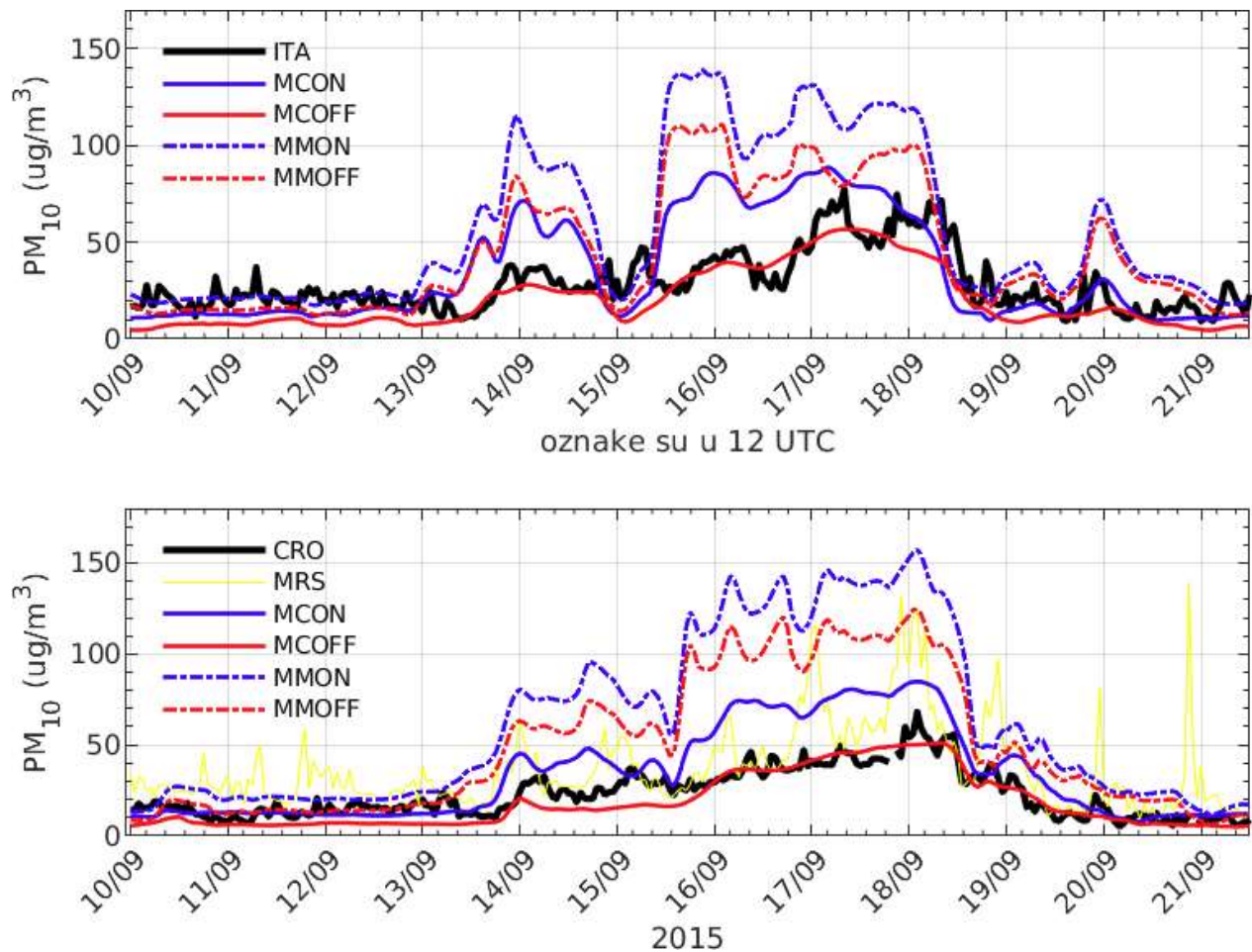
4.3.2.1 Odnos između porasta PM₁₀ i emisija prašine

Analiza putanja unaprijed modela HYSPLIT nad Jadran u ovoj studiji napravljena je za kvalitativnu procjenu učinaka maksimalnih emisija na područjima izvora S1 i S2. Cilj je ispitati njihov utjecaj na maksimume koncentracija PM₁₀ koji su izmjereni na postajama u Italiji i Hrvatskoj. Sve putanje imaju polaznu točku nad područjima izvora na visini 500 m iznad tla uz pretpostavku da je emisija prašine dosegla ovu visinu (Heinold i sur., 2013, Kok i sur., 2021a). Donos prašine može biti iznad i ispod visine atmosferskog graničnog sloja. Ovdje se uzima u obzir pretpostavka da su čestice unutar atmosferskog graničnog sloja, tj. sloja miješanja tijekom dana ravnomjerno raspoređene. Prema tome je koncentracija čestica jednaka po visini kroz cijeli atmosferski granični sloj, što dovodi do zaključka da putanje koje se mogu povezati s porastom koncentracije na prizemnim postajama moraju imati završetak unutar graničnog sloja. Također, na prizemne koncentracije utječu i učinci procesa uvlačenja i gravitacijskog taloženja aerosola, a koji nisu uzeti u obzir u ovoj kvalitativnoj analizi. Uz to nije uzeto u obzir niti da površinski sloj ispod sloja miješanja može utjecati na prizemne koncentracije.

Analiza utjecaja izvora ovdje je provedena prema proceduri:

1. određivanje vremena maksimalnih emisija u S1 i S2
2. izračun putanja unaprijed nad Jadran (engl. *forward trajectories*) iz modela HYSPLIT, a čije je ishodište na područjima izvora
3. provjera prolaze li putanje iznad talijanskih i/ili hrvatskih postaja
4. provjera jesu li putanje na navedenim lokacijama postaja unutar atmosferskog graničnog sloja
5. usporedba s maksimumom PM₁₀

Visina atmosferskog graničnog sloja (Slika 30d) iznad postaja u blizini Ancone i Rijeke (Slika 4, Tablica 4) preuzeta je iz modela WRF-Chem. Prvo povećanje PM₁₀ pod utjecajem saharske prašine zabilježeno je na talijanskim postajama 14.9.2015. u 00 UTC, te šest sati kasnije na hrvatskim postajama (Slika 31). Kraći “puls” zabilježen je 15.9.2015., a dulji 16.9.2015. Najveća srednje dnevna koncentracija PM₁₀ na obje hrvatske postaje bila je 18.9.2015. te je iznosila 50 µg m⁻³. Nakon 19.9.2015. u 12 UTC nagli pad u koncentracijama zabilježen je na svim postajama što se može pripisati pojavi jake bure. Stoga će se, radi ilustracije, najveći maksimum 18.9.2015. istraživati prema predloženoj analizi. Ova analiza ukazuje na kompleksnost u transportu prašine s emisijama na različita mjesta i u različito vrijeme.



Slika 31. Satne i prostorno usrednjene mjerene koncentracije PM₁₀ na 6 talijanskih i 2 hrvatske postaje (pune crne linije) i prostorno usrednjene vrijednosti iz modela WRF-Chem u točkama najbližim mjernim postajama. Plave krivulje su za slučajeve kad se primjenjuju rubni uvjeti za prašinu iz modela MOZART-4, a crvene linije u slučaju kad se ovi rubni uvjeti ne koriste. Pune linije su za modul GOCART, a crtkane za MOSAIC. Puna žuta linija pokazuje mjerene koncentracije PM₁₀ u blizini odlagališta otpada Mariščina.

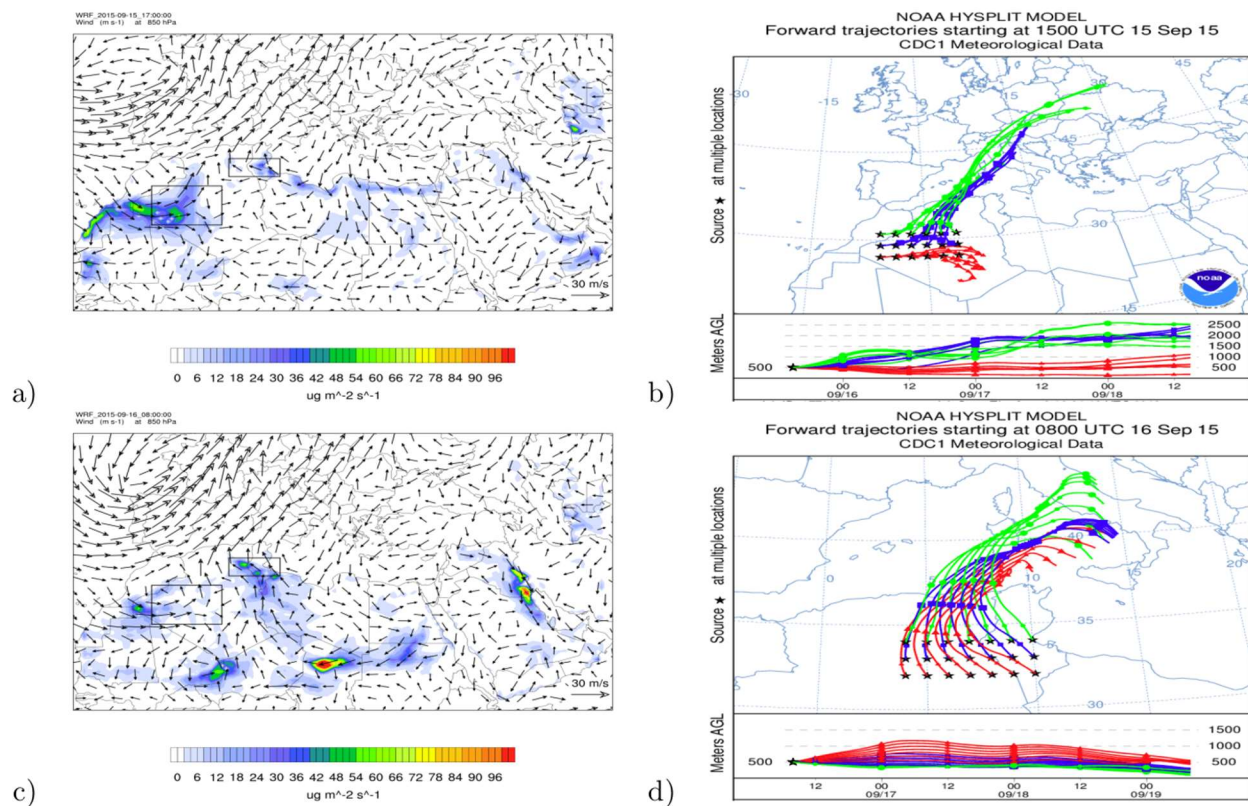
4.3.2.2 Analiza porasta koncentracije lebdećih čestica 18.9.2015.

Maksimum emisije prašine na području izvora S1 bio je 15.9.2015. u 15 UTC. Putanje usmjerene prema naprijed (Slika 32b) u slaganju su s vjetrom na 850 hPa koji je dobiven iz modela WRF-Chem (Slika 32a). Putanje čije se ishodište nalazi na $\sim 31^\circ\text{N}$ prolaze područjem velikih brzina

(objašnjeno u 4.3.1) te one kroz 72 sata završavaju u Ukrajini. Putanje koje prolaze preko Italije i Hrvatske imaju početak na $\sim 29^\circ\text{N}$, što je bliže područje gdje je uočena jača emisija prašine, S1. Putanje označene plavom bojom prve stižu do talijanske regije Marche 18.9.2015. u 04 UTC, a posljednja od njih napušta regiju oko 11–12 UTC istog dana te se približava hrvatskim postajama između 08–15 UTC. Ovo se poklapa s porastom PM_{10} od 06 do 11 UTC na talijanskim postajama i od 11 do 18 UTC na postajama u okolici Rijeke. Ipak, visine tih putanja su veće od 2000 m iznad razine tla, što je prema simulacijama iznad visine atmosferskog graničnog sloja.

Još jedan maksimum PM_{10} , zabilježen 18.9.2015. nakon 18 UTC na postajama u Italiji te oko ponoći u Hrvatskoj, bio je najvjerojatnije pod utjecajem snažnih emisija na području izvora S2 u 08 UTC na dan 16.9.2015. (Slika 30c). Putanje označene zelenom bojom ulaze nad područje regije Marche u 14 UTC i odlaze u ponoć. Njihova visina iznad razine tla je manja od 400 m, a visina atmosferskog graničnog sloja veća je od one prije 19 UTC. Početna visina putanja nalazi se na 500 m iznad područja S2 koje obuhvaća pustinjska područja: Chott Jerid (33.7°N , 8.4°W), Melrhir (34.25°N , 6.3°W) i Felrhir (34°N , 6°W). Ove putanje završavaju nad jadranskom obalom regije Marche. Međutim, putanje s početkom na visini od 700 m i više dosežu Kvarnerski zaljev u ponoć i to na visinama od oko 1000 m, što je iznad pripadajućeg atmosferskog graničnog sloja (145 m). Zbog intenziviranja ciklone (poglavlje 4.3.1.) putanje koje počinju nakon pojave maksimuma emisije prašine na području S2 dosežu regiju Marche oko 05 UTC 18.9.2015. te oko 12 UTC područje Rijeke. Početna visina ovih putanja je 800 metara i više. Iznad Italije i Hrvatske njihova visina ide ispod 600 m što dovodi do zaključka da će prašina koja je emitirana nekoliko sati kasnije prije stići do postaja. Zbog kompleksnosti interakcija putanja vezanih za transportne putove prašine emitirane iz različitih izvora, pitanje je koji je doprinos odgovoran za prvo povećanje koncentracija PM_{10} 18.9.2015. Perjanica iz S1 počinje 15.9.2015. u 17 UTC i stiže u istovremeno kad i prašina iz S2 čija je emisija bila 16.9.2015. u 12 UTC. Doprinos iz S1 ide do 2000 m nad tlom što je visoko iznad razine noćnog atmosferskog graničnog sloja, a drugi (S2) ide ispod 600 m u Italiji i Hrvatskoj. Također, na visinu atmosferskog graničnog sloja u modelu utječe i primjena metode asimilacije. Kako se podaci preuzimaju iz modela ECMWF, ista promjena visine graničnog sloja se pojavljuje u više točaka modela WRF-Chem. Isto se može reći i za emisiju prašine, ali u manjoj mjeri. Zaključno, veća je vjerojatnost da je na porast površinskih koncentracija PM_{10} na jadranskim postajama imao utjecaj izvor S2 radi veće blizine i radi transporta koji se odvijao u nižim slojevima atmosfere. Ovaj zaključak nalazi analogiju i kod prethodno obrađene epizode iz 2020. godine. Za

navedenu epizodu analiza meteoroloških polja je pokazala da je dominantni doprinos na prizemne koncentracije nastao advekcijom u prizemnim slojevima atmosfere, a tek manjim dijelom uslijed advekcije po visini i dodatnih dinamičkih procesa.

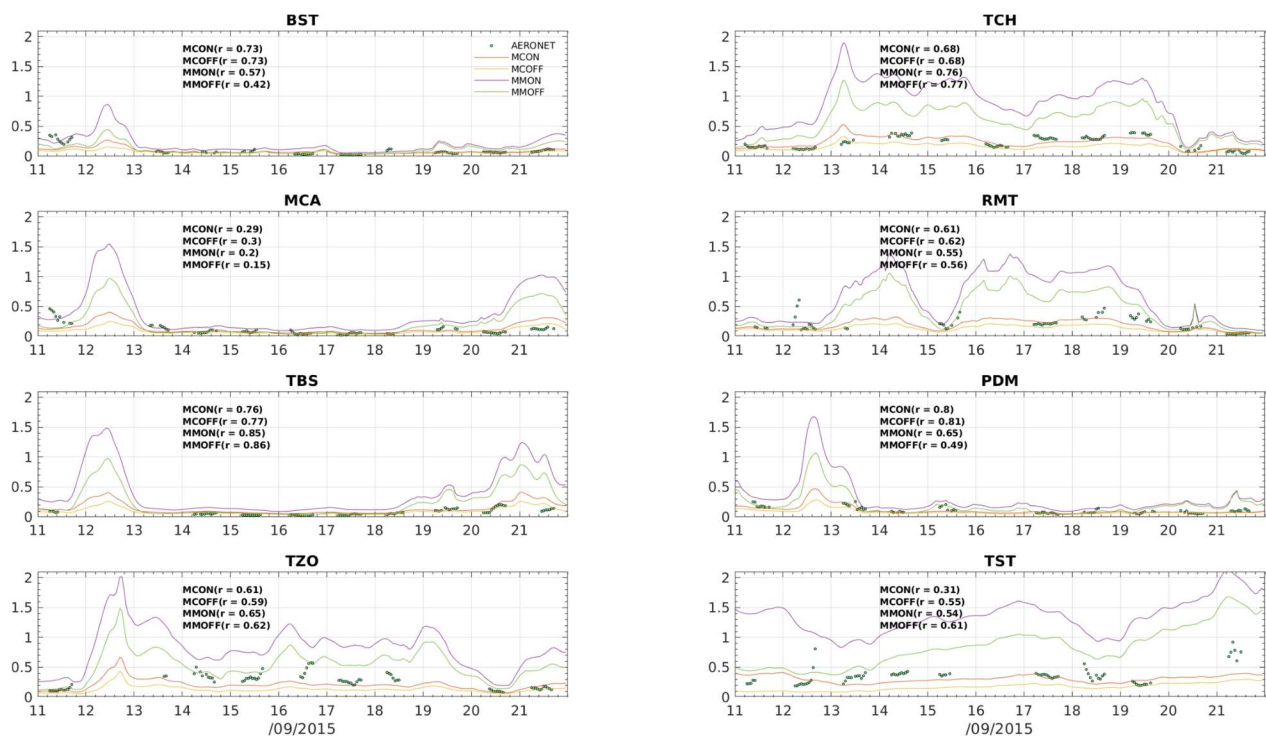


Slika 32. WRF-Chem karte s maksimalnim emisijama prašine i putanje HYSPLIT unaprijed s počecima u trenutku pojave maksimuma (a) 15.9.2015. u 17 UTC i (b) odgovarajuće putanje iz S1 te na (c) 16.9.2015. u 08 UTC i (d) odgovarajuće putanje iz S2. Vektori horizontalne brzine vjetra su na razini 850 hPa.

4.3.3. Usporedba parametra optičke debljine aerosola dobivenih modelom i mjerenjima na prizemnim postajama

Simulirani vremenski nizovi AOD-a na 500 nm iz modela WRF-Chem uspoređeni su s mjerenjima s postaja (sa Slike 4 i Tablica 2b) na temelju metode opisane u poglavlju 2.4. Vremenski nizovi

mjerenja i rezultati modela za sva 4 testa osjetljivosti (Tablica 5) s obzirom na odabir modula za lebdeće čestice i rubne uvjete za prašinu prikazani su na Slici 33. Postaje na obalama Iberijskog poluotoka, Burjassot i Murcia, zabilježile su porast AOD-a do 0.4, odnosno 0.5 tijekom 11.9.2015. prije 12 UTC, a nešto manje poslijepodne. Parametar AOD u iznosu od 0.25 zabilježen je na postaji Palma de Mallorca u isto vrijeme, ali postaja Tabernas koja se nalazi južno od Murcije ne bilježi nikakav porast u to vrijeme. Model je uspješno simulirao navedeni maksimum na postaji Burjassot, dok se na postaji Murcia modelirani maksimum javlja jedan dan ranije. Model podcjenjuje iznos ovog maksimuma, ali simulacije s modulom MOSAIC bolje odgovaraju mjerenjima. Na španjolskim postajama za 12.9.2015. svi testovi pokazuju značajan porast AOD-a, ali to se ne može potvrditi mjerenjima koja su izostala radi pojačane naoblake. Simulirani maksimum 12.9.2015. oko 12 UTC događa se na sjevernoafričkoj postaji Tizi Ouzou, a postaja Tunis Carthage bilježi slabiji porast dan nakon toga. Navedeno je u skladu s mjerenjima za test osjetljivosti MCOFF pri čemu se dostiže vrijednost od 0.3. Ovaj maksimum je znatno precijenjen od strane modula MOSAIC kada je dostignuta vrijednost od 1.82. Nakon 13.9.2015. na španjolskim postajama AOD ostaje ispod ~ 0.2 , dok su AOD vrijednosti na postajama Tizzi-Ouzou i Tunis Carthage dosežu vrijednosti od 0.5 14.9.2015. odnosno 0.38 15.9.2015. (“posljednji” transport prašine prema Sjevernom Jadranu je prema analizi putanja započeo 16.9.). Zanimljiva je činjenica da maksimalni AOD (ako se gledaju sve postaje za ovu epizodu i ako se ne uvaži postaja Tamanrasset), koji je iznosio 0.61 i zabilježen je na postaji Rim Tor-Vergata, nije simuliran niti u jednom provedenom testu osjetljivosti. Povećanje AOD-a koje simulira model (i koje je u skladu s porastom PM_{10}) od 13. do 15.9. ne može se objasniti u mjerenjima AOD-a budući da ona za to razdoblje nedostaju. Naredni porast na ovoj postaji uočen je 15.9.2015. u 12 UTC, a porast 18.9.2015. nakon 12 UTC se slaže s analizom u prethodnom poglavlju te se može pripisati snažnoj emisiji iz izvora S2 dana 16.9.2015. u 08 UTC (Slika 30c).



Slika 33. Usporedba vremenskih nizova AOD-a (na 500 nm) dobivenih iz četiri testa osjetljivosti modelom WRF-Chem te iz mjerenja na osam postaja mreže AERONET (lokacije prikazane na Slici 4 i u Tablici 2b).

Statistička usporedba modela pomoću mjerenja na postajama AERONET provedena je pomoću metode opisane u poglavlju 2.3, a rezultati su prikazani u Tablici 11. Koeficijenti korelacije pokazuju da model na zadovoljavajući način opisuje varijabilnost AOD-a za većinu testova osjetljivosti osim za postaju Murcia. Moguće objašnjenje moglo bi se povezati s lokacijom postaje na Iberijskom poluotoku koja je smještena rubno u odnosu na položaj perjanice 11.9.2015. Najbolja korelacija postignuta je za test osjetljivosti MCOFF u kojem se za razliku od ostalih slučajeva tehnika asimilacije podataka primjenjuje unutar atmosferskog graničnog sloja. Ovaj test također ima i najbolju korelaciju i bez korištenja spomenute tehnike. Također, za ovaj slučaj je napravljen i dodatni test u kojem je shema za prikaz temperature i vlažnosti u tlu (model tla NOAH) zamijenjena s drugom parametrizacijom, tj. jednostavnom shemom u modelskom sustavu (model tla s prikazom toplinske difuzije kroz 5 slojeva). Posljednji test je predložen u Roberts i Knippertz (2014), gdje su autori su pokazali da je NOAH bolji za “hvatanje” točnog vremena inicijacije konvektivnih oluja, dok je ponašanje mezoskalnih konvektivnih sustava bilo bolje simulirano

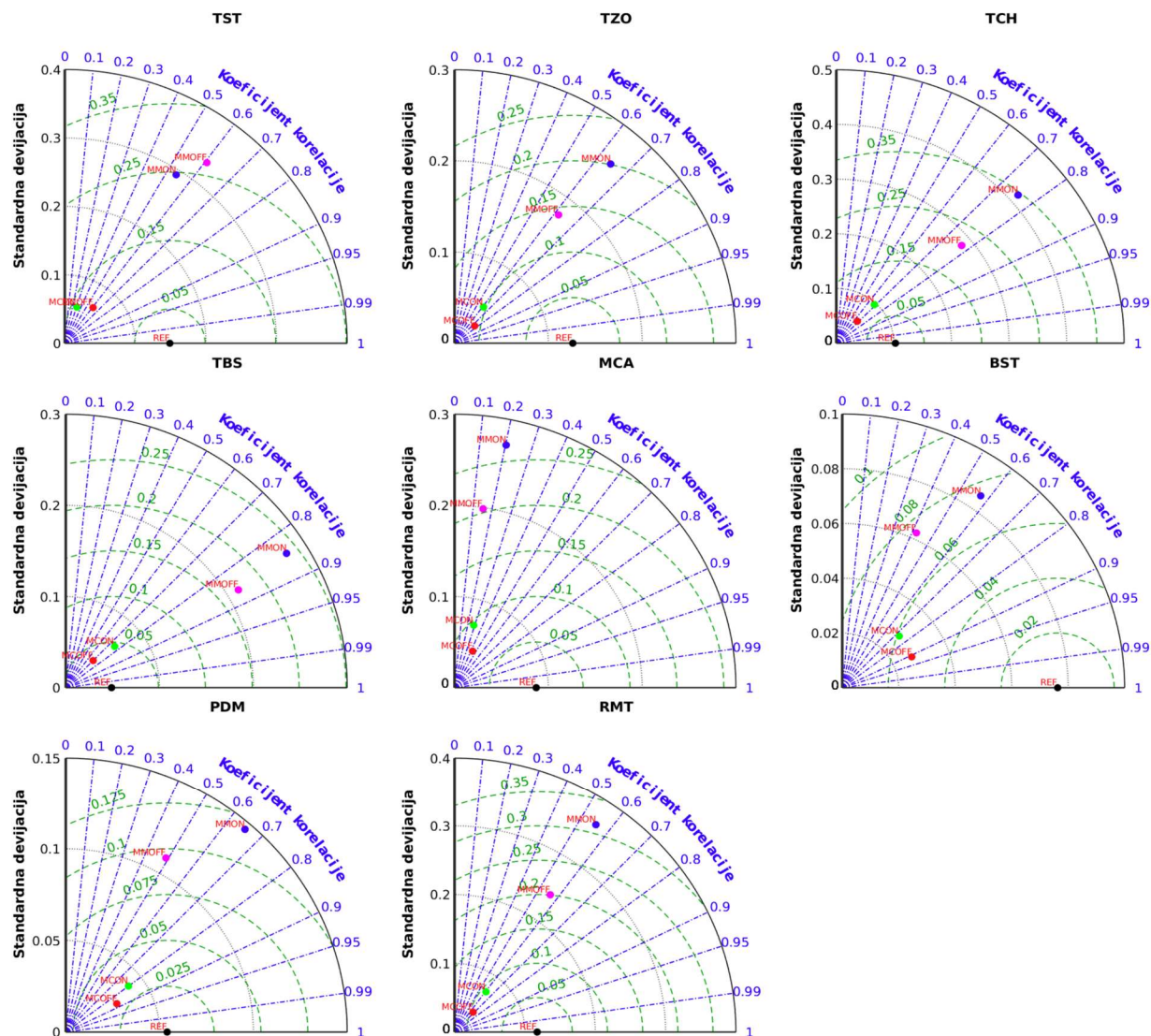
shemom koja prikazuje tlo pomoću toplinske difuzije kroz 5 slojeva. Ipak, ovaj test nije ukazao na značajno poboljšanje u rezultatima.

Tablica 11. Usporedba AOD-a iz modela WRF-Chem (AOD_m) s mjerenjima (AOD_o) na postajama za praćenje kvalitete zraka u Hrvatskoj. Usporedba se radi pomoću skupa statističkih parametara: standardne devijacije modeliranih (σ_m) i opaženih (σ_o) koncentracija PM_{10} , korijena srednje kvadratne pogreške (RMSE), korijena srednje kvadratne pogreške nakon uklanjanja konstantne pristranosti (RMSD), zatim pristranosti (BIAS) i koeficijenta korelacije (R).

| Postaja | Test | σ_o | σ_m | RMSE | RMSD | σ_m/σ_o | RMSE/ σ_o | RMSD/ σ_m | R | BIAS |
|---------|-------|------------|------------|------|------|---------------------|------------------|------------------|------|-------|
| BST | MCON | 0.08 | 0.03 | 0.06 | 0.06 | 0.36 | 0.79 | 0.78 | 0.73 | 0.01 |
| | MCOFF | 0.08 | 0.03 | 0.06 | 0.05 | 0.35 | 0.75 | 0.69 | 0.91 | 0.02 |
| | MMON | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 1.12 | 1.41 | 0.99 | 0.57 | -0.08 |
| | MMOFF | 0.08 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.82 | 1.02 | 0.99 | 0.42 | -0.02 |
| TCH | MCON | 0.1 | 0.1 | 0.08 | 0.08 | 0.94 | 0.78 | 0.77 | 0.68 | -0.01 |
| | MCOFF | 0.1 | 0.05 | 0.11 | 0.08 | 0.53 | 1.03 | 0.76 | 0.67 | 0.07 |
| | MMON | 0.1 | 0.42 | 0.71 | 0.34 | 4.05 | 6.89 | 3.36 | 0.76 | -0.62 |
| | MMOFF | 0.1 | 0.28 | 0.41 | 0.21 | 2.74 | 3.95 | 2.07 | 0.77 | -0.35 |
| MCA | MCON | 0.09 | 0.07 | 0.1 | 0.1 | 0.82 | 1.1 | 1.1 | 0.29 | 0 |
| | MCOFF | 0.09 | 0.04 | 0.08 | 0.08 | 0.51 | 0.95 | 0.9 | 0.43 | 0.02 |
| | MMON | 0.09 | 0.27 | 0.32 | 0.27 | 3.12 | 3.7 | 3.08 | 0.2 | -0.18 |
| | MMOFF | 0.09 | 0.2 | 0.22 | 0.2 | 2.28 | 2.48 | 2.35 | 0.15 | -0.07 |
| RMT | MCON | 0.12 | 0.07 | 0.1 | 0.09 | 0.63 | 0.87 | 0.8 | 0.61 | 0.04 |
| | MCOFF | 0.12 | 0.04 | 0.12 | 0.1 | 0.33 | 1.04 | 0.81 | 0.67 | 0.08 |
| | MMON | 0.12 | 0.36 | 0.43 | 0.31 | 3.09 | 3.7 | 2.67 | 0.55 | -0.3 |
| | MMOFF | 0.12 | 0.24 | 0.24 | 0.2 | 2.06 | 2.07 | 1.71 | 0.56 | -0.14 |
| TBS | MCON | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 1.41 | 1.22 | 0.93 | 0.76 | -0.04 |
| | MCOFF | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.85 | 0.77 | 0.73 | 0.7 | -0.01 |
| | MMON | 0.05 | 0.28 | 0.34 | 0.24 | 5.69 | 6.93 | 4.87 | 0.85 | -0.24 |
| | MMOFF | 0.05 | 0.21 | 0.22 | 0.17 | 4.36 | 4.42 | 3.54 | 0.86 | -0.13 |
| PDM | MCON | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.77 | 0.65 | 0.6 | 0.8 | 0.01 |
| | MCOFF | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.58 | 0.73 | 0.57 | 0.87 | 0.02 |
| | MMON | 0.05 | 0.15 | 0.18 | 0.12 | 2.71 | 3.32 | 2.19 | 0.65 | -0.14 |
| | MMOFF | 0.05 | 0.11 | 0.11 | 0.1 | 2.02 | 2.12 | 1.76 | 0.49 | -0.06 |
| TZO | MCON | 0.13 | 0.05 | 0.13 | 0.1 | 0.4 | 1.06 | 0.82 | 0.61 | 0.08 |
| | MCOFF | 0.13 | 0.03 | 0.17 | 0.11 | 0.23 | 1.37 | 0.84 | 0.75 | 0.14 |
| | MMON | 0.13 | 0.26 | 0.46 | 0.2 | 2.04 | 3.61 | 1.59 | 0.65 | -0.41 |
| | MMOFF | 0.13 | 0.18 | 0.22 | 0.14 | 1.42 | 1.72 | 1.12 | 0.62 | -0.16 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TST | MCON | 0.15 | 0.06 | 0.16 | 0.14 | 0.37 | 1.07 | 0.95 | 0.31 | 0.07 |
| | MCOFF | 0.15 | 0.07 | 0.23 | 0.12 | 0.44 | 1.58 | 0.81 | 0.61 | 0.2 |
| | MMON | 0.15 | 0.29 | 0.93 | 0.25 | 1.96 | 6.24 | 1.66 | 0.54 | -0.9 |
| | MMOFF | 0.15 | 0.33 | 0.48 | 0.27 | 2.23 | 3.23 | 1.81 | 0.61 | -0.4 |

Kriteriji za procjenu uspješnosti simulacije modela (poglavlje 2.3) nisu zadovoljeni za većinu testova osjetljivosti. U slučaju kada se koristi modul MOSAIC, statistički parametri RMSE, RMSD i standardna devijacija modeliranih vrijednosti značajno su veći od standardne devijacije promatranih vrijednosti (u većini slučajeva). Naveden odnos je u skladu s pozitivno pristranim rezultatima modela za ove slučajeve. Za testove u kojima se koristi GOCART opcija za lebdeće čestice, uvjeti vezani za usporedbu statističkih parametara RMSD i RMSE sa standardnom devijacijom mjerenih podataka su zadovoljeni, ali su one približno dvostruko veće od simuliranih vrijednosti. U slučaju postaje Murcia, model je u testovima MCON i MCOFF zadovoljavajuće reproducirao opaženo stanje, ali je korelacija bila niža, 0.29 odnosno 0.43.



Slika 34. Taylorov dijagram za parametar AOD, mjereno na osam postaja (Tablica 2b) (crna točka) i simulirano s četiri različita postava modela (Tablica 5): MCON (zelena točka), MCOFF (crvena točka), MMON (plava točka) i MMOFF (roza točka). Standardna devijacija je predstavljena crnom točkastom, koeficijent korelacije plavom, a RMSD sa zelenom isprekidanom linijom.

Taylorov dijagram (Slika 34) je grafički prikaz iz kojeg se može ocijeniti uspješnost reprodukcije modelom (Taylor i sur., 2001). Na njemu su istovremeno prikazani statistički parametri (korelacija, RMSD, standardna devijacija mjerenja i simulacija). Time se na jednom dijagramu vizualno može ocijeniti uspješnost simuliranoga događaja i odrediti najbolje postavke modela s obzirom na testove osjetljivosti. Svaki od testova u ovom prostoru predstavljen je točkom od kojih je ona najbliža

referentnoj točki (odnosi se na mjerenja) ujedno i najbolje rješenje. Najbolje simulacije prema ovoj metrici su MCON i MCOFF, unatoč činjenici da imaju pozitivnu pristranost. S druge strane, testovi MMON i MMOFF ponekad su u boljoj korelaciji s mjerenjima, iako ih uglavnom značajno precjenjuju. Glavne razlike između opcija MOZART-GOCART i MOZART-MOSAIC u smislu emisije prašine su zbog različitih parametrizacija emisije prašine; dok se u prvom slučaju koristi shema GOCART (Jednadžba 3), u drugom slučaju moguće je koristiti jedino shemu GOCART-AFWA (LeGrand i sur., 2019) shemom, za koju je prethodno utvrđeno da precjenjuje emisiju prašine (Rizza i sur., 2016).

4.3.4. Usporedba koncentracija PM₁₀ dobivenih modelom i mjerenjima na prizemnim postajama

Kako bi se istražio utjecaj donosa saharske prašine na koncentracije PM₁₀ na sjevernom Jadranu, rezultati simulacija modelom WRF-Chem uspoređeni su s mjerenjima na 10 prizemnih postaja za praćenje kvalitete zraka (Tablica 2b). Talijanske postaje nalaze se u blizini grada Ancone, a hrvatske u blizini grada Rijeke (Slika 4). Dok su postaje u regiji Marche pozadinske postaje, dvije hrvatske postaje u Kvarnerskom zaljevu rade u svrhu praćenja kvalitete zraka u blizini rafinerije Urinj (koja se nalazi na obali mora), a dvije postaje nalaze se u blizini lokalnih odlagališta otpada u prigradskom dijelu grada Rijeke.

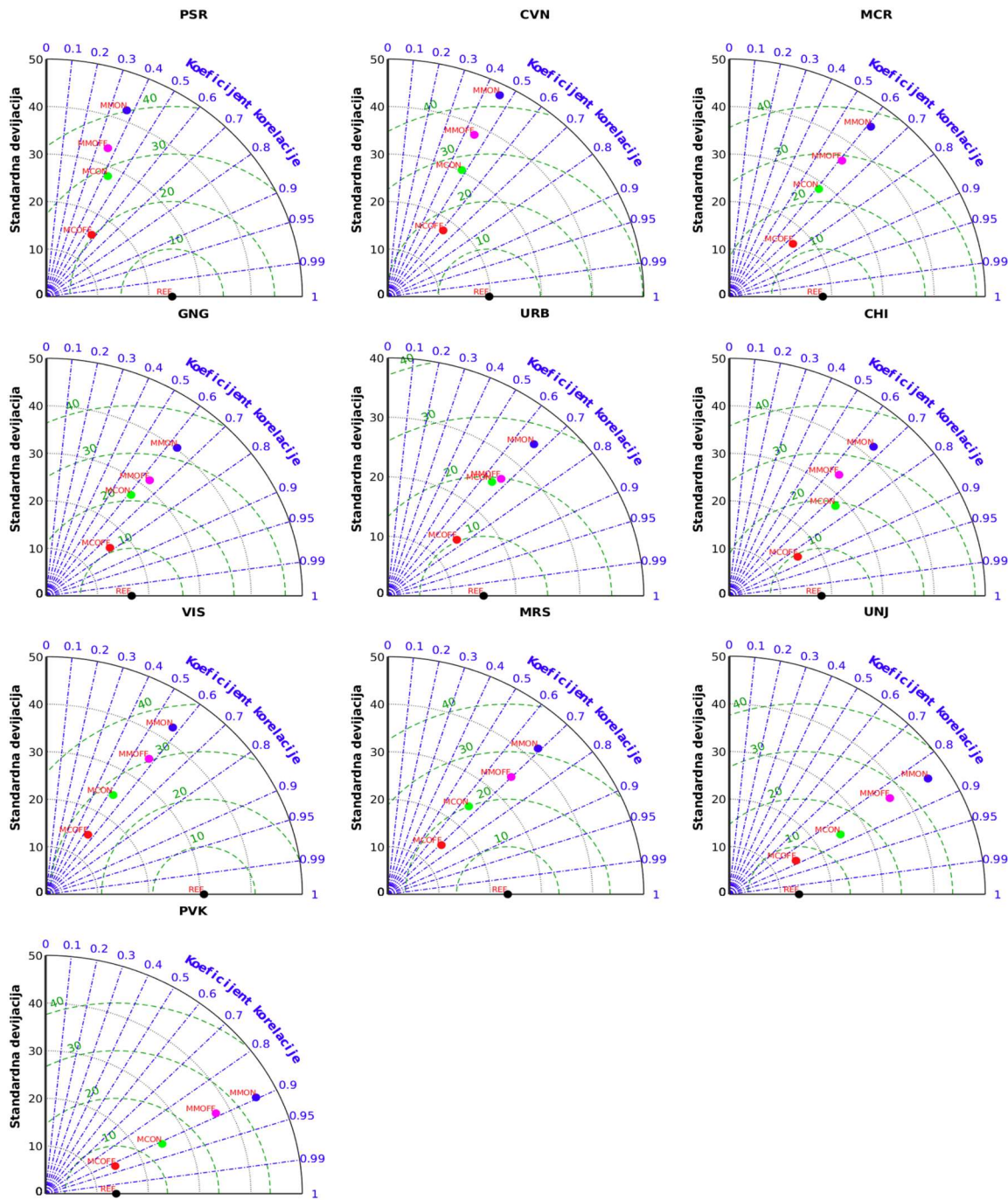
Slična vremenska varijabilnost satnih vrijednosti PM₁₀ uočena je i na svim talijanskim postajama i stoga su, u svrhu jasnijeg grafičkog prikaza situacije, prostorno usrednjeni nizovi na šest postaja. Detaljna statistička usporedba za pojedine postaje provedena je na isti način kao i za AOD. Vrijednosti modela su radi toga prostorno usrednjene na isti način, koristeći vrijednosti u točkama modela koje su najbliže mjernim postajama (Slika 35). U Hrvatskoj se usrednjavanje primjenjuje samo za postaje Urinj i postaju Paveki jer se na postajama Viševac i Marišćina može uočiti izrazitiji dnevni hod. Više koncentracije zabilježene su tijekom dana, s vrhuncima u podne ili rano poslijepodne. Maksimumi su najvjerojatnije uzrokovani resuspenzijom prašine s neasfaltirane ceste koju su uzrokovali kamioni zbog prijevoza otpada između deponija Viševac i Marišćina. Budući da se obje mjerne postaje nalaze u blizini te ceste, vjerojatno je to bio uzrok izmjerene porasta u koncentracijama PM₁₀. Naravno, porast radi ovog uzroka nije moguće simulirati

modelom WRF-Chem radi neadekvatnih karti erodibilnosti (Jednadžba 4) i pregrube razlučivosti modela. Također, navedeno je od male važnosti za analizu epizode saharske prašine.

Tablica 12. Usporedba PM₁₀ iz modela WRF-Chem (PM_{10m}) s mjerenjima (PM_{10o}) na postajama za praćenje kvalitete zraka u Hrvatskoj. Oznake su kao i u Tablici 11.

| Postaja | Test | σ_o | σ_m | RMSE | RMSD | σ_m/σ_o | RMSE/ σ_o | RMSD/ σ_m | R | BIAS |
|---------|-------|------------|------------|-------|-------|---------------------|------------------|------------------|------|--------|
| MCR | MCON | 18.27 | 28.61 | 25.15 | 22.65 | 1.57 | 1.38 | 1.24 | 0.61 | -10.94 |
| | MCOFF | 18.27 | 16.67 | 13.24 | 12.54 | 0.91 | 0.72 | 0.69 | 0.75 | 4.26 |
| | MMON | 18.27 | 45.21 | 51.06 | 36.98 | 2.47 | 2.8 | 2.02 | 0.61 | -35.21 |
| | MMOFF | 18.27 | 36.11 | 35.88 | 28.86 | 1.98 | 1.96 | 1.58 | 0.61 | -21.33 |
| CVN | MCON | 19.8 | 30.3 | 28.41 | 27.16 | 1.53 | 1.43 | 1.37 | 0.48 | -8.32 |
| | MCOFF | 19.8 | 17.63 | 17.69 | 16.58 | 0.89 | 0.89 | 0.84 | 0.61 | 6.18 |
| | MMON | 19.8 | 47.69 | 54.83 | 42.44 | 2.41 | 2.77 | 2.14 | 0.46 | -34.72 |
| | MMOFF | 19.8 | 38.02 | 40.07 | 34.17 | 1.92 | 2.02 | 1.73 | 0.44 | -20.92 |
| GNG | MCON | 16.66 | 26.91 | 23.17 | 21.22 | 1.62 | 1.39 | 1.27 | 0.62 | -9.3 |
| | MCOFF | 16.66 | 16.02 | 12.16 | 10.97 | 0.96 | 0.73 | 0.66 | 0.78 | 5.26 |
| | MMON | 16.66 | 40.28 | 44.08 | 32.39 | 2.42 | 2.65 | 1.94 | 0.63 | -29.9 |
| | MMOFF | 16.66 | 31.6 | 29.81 | 24.56 | 1.9 | 1.79 | 1.47 | 0.64 | -16.89 |
| CHI | MCON | 18.01 | 28.07 | 19.9 | 19.11 | 1.56 | 1.1 | 1.06 | 0.74 | -5.56 |
| | MCOFF | 18.01 | 15.69 | 13.84 | 9.44 | 0.87 | 0.77 | 0.52 | 0.85 | 10.12 |
| | MMON | 18.01 | 42.18 | 45.87 | 32.99 | 2.34 | 2.55 | 1.83 | 0.67 | -31.87 |
| | MMOFF | 18.01 | 33.3 | 31.65 | 25.7 | 1.85 | 1.76 | 1.43 | 0.64 | -18.46 |
| URB | MCON | 14.97 | 25.13 | 19.74 | 19.18 | 1.68 | 1.32 | 1.28 | 0.65 | -4.64 |
| | MCOFF | 14.97 | 14.32 | 13.32 | 10.31 | 0.96 | 0.89 | 0.69 | 0.75 | 8.43 |
| | MMON | 14.97 | 34.22 | 33.76 | 26.67 | 2.29 | 2.25 | 1.78 | 0.67 | -20.7 |
| | MMOFF | 14.97 | 26.46 | 22.05 | 19.85 | 1.77 | 1.47 | 1.33 | 0.67 | -9.61 |
| PSR | MCON | 24.57 | 28.05 | 28.31 | 28.3 | 1.14 | 1.15 | 1.15 | 0.43 | -0.83 |
| | MCOFF | 24.57 | 15.74 | 25.11 | 20.4 | 0.64 | 1.02 | 0.83 | 0.56 | 14.64 |
| | MMON | 24.57 | 42.23 | 48.41 | 40.19 | 1.72 | 1.97 | 1.64 | 0.37 | -27 |
| | MMOFF | 24.57 | 33.47 | 36.37 | 33.67 | 1.36 | 1.48 | 1.37 | 0.36 | -13.76 |
| UNJ | MCON | 13.63 | 25.09 | 18.66 | 14.94 | 1.84 | 1.37 | 1.1 | 0.87 | -11.19 |
| | MCOFF | 13.63 | 14.82 | 8.4 | 7.08 | 1.09 | 0.62 | 0.52 | 0.88 | 4.52 |
| | MMON | 13.63 | 45.8 | 53.54 | 35.01 | 3.36 | 3.93 | 2.57 | 0.85 | -40.51 |
| | MMOFF | 13.63 | 37.31 | 38.05 | 26.88 | 2.74 | 2.79 | 1.97 | 0.84 | -26.93 |
| PVK | MCON | 13.75 | 25.02 | 17.83 | 13.78 | 1.82 | 1.3 | 1 | 0.91 | -11.32 |
| | MCOFF | 13.75 | 14.76 | 7.22 | 5.8 | 1.07 | 0.52 | 0.42 | 0.92 | 4.3 |
| | MMON | 13.75 | 45.7 | 52.77 | 33.91 | 3.32 | 3.84 | 2.47 | 0.9 | -40.44 |
| | MMOFF | 13.75 | 37.23 | 37.26 | 25.73 | 2.71 | 2.71 | 1.87 | 0.89 | -26.94 |
| MRS | MCON | 23.43 | 24.35 | 20.43 | 20.01 | 1.04 | 0.87 | 0.85 | 0.65 | 4.13 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|--------|
| | MCOFF | 23.43 | 14.73 | 24.96 | 16.59 | 0.63 | 1.07 | 0.71 | 0.71 | 18.65 |
| | MMON | 23.43 | 42.46 | 34.87 | 31.25 | 1.81 | 1.49 | 1.33 | 0.69 | -15.48 |
| | MMOFF | 23.43 | 34.49 | 24.86 | 24.69 | 1.47 | 1.06 | 1.05 | 0.7 | -2.93 |
| VIS | MCON | 30.79 | 24.62 | 28.79 | 27.39 | 0.8 | 0.94 | 0.89 | 0.53 | 8.87 |
| | MCOFF | 30.79 | 14.94 | 34.83 | 25.89 | 0.49 | 1.13 | 0.84 | 0.54 | 23.3 |
| | MMON | 30.79 | 42.91 | 37.19 | 35.62 | 1.39 | 1.21 | 1.16 | 0.58 | -10.7 |
| | MMOFF | 30.79 | 34.84 | 30.51 | 30.46 | 1.13 | 0.99 | 0.99 | 0.58 | 1.83 |



Slika 35. Taylorov dijagram za parametar PM_{10} mjeren na 10 postaja u Italiji i Hrvatskoj (Tablica 2b) (crna točka) i simuliran s četiri različite postavke modela (Tablica 5): MCON (zeleno točka), MCOFF (crvena točka), MMON (plava točka) i MMOFF (roza točka). Standardna devijacija je predstavljena crnom točkastom linijom, koeficijent korelacije plavom, a RMSD sa zelenom isprekidanom linijom.

Za kvantitativnu evaluaciju modela u odnosu na mjerenja PM₁₀ s talijanskih i hrvatskih postaja ponovno je primijenjena metoda opisana u poglavlju 2.3. Koeficijent korelacije na pojedinoj postaji ima slične vrijednosti s obzirom na testove osjetljivosti te je veći od 0.6 u većini slučajeva (Tablica 12). To znači i da su sve točke u Taylorovim dijagramima (Slika 35) u blizini iste “korelacijske” linije. U smislu standardnih devijacija i RMSD metrike, MCOFF vrijednosti su najbliže referentnoj točki za sve postaje. Također, za ovaj test osjetljivosti, model pokazuje uspješnost na svim stanicama unatoč maloj pozitivnoj pristranosti. Najveća pristranost je iznosila 23.3 μm⁻³ za postaju Viševac najvjerojatnije zbog problema prometa kamiona između dva odlagališta. U drugim testovima osjetljivosti model pokazuje uspješnost na samo tri postaje: Viševac, Marišćina i Pesaro (r = 0.4) za MCON i u Pesaru za MMOFF (r = 0.58). Za MCON, MMON i MMOFF, kriteriji nisu zadovoljeni zato što su statistički parametri, standardna devijacija, RMSE i RMSD viši od standardne devijacije mjerenja. Također, velika negativna pristranost uočava se na postajama Urinj i Paveki za opciju MMON gdje je pristranost 40 μm⁻³, što je za oko dvostruko više od promatranih vrijednosti. Općenito, za testove kada su primijenjeni rubni uvjeti za prašinu iz modela MOZART-4, model precjenjuje izmjerene vrijednosti (Slika 35). Općenito je zaključak da je modul MOZART-GOCART bez primjene rubnih uvjeta (MCOFF) najbolja opcija za simuliranje PM₁₀ na talijanskim i hrvatskim postajama (puna crvena linija na Slici 31). Sličan zaključak vrijedi i za slučaj kada se ne primjenjuje tehnika asimilacije podataka (nije prikazano).

5. ZAKLJUČAK

U ovoj studiji po prvi put je napravljena klimatološka analiza taloženja prašine u Jadransko more. Zbog potpunog manjka bilo kakvih mjerenja taloženja prašine na ovom području korišteni su podaci taloženja reanalize MERRA-2. Iako je verifikacija uz pomoć geografski najbližih dostupnih mjerenja pokazala da MERRA-2 precjenjuje taloženje, korelacija na većini postaja je velika i statistički značajna. Nedavna verifikacija parametra taloženja prašine iz MERRA-2 od strane Wu i sur. (2020) također je dokazala kvalitetu ovog skupa podataka što je predstavljalo dobru bazu za daljnju analizu. Unatoč relativno gruboj prostornoj razlučivosti mreže reanalize nad malim jadranskim bazenom, otkrivene su glavne prostorno-vremenske značajke taloženja. Bimodalni godišnji hod taloženja prašine pokazuje primarni maksimum u travnju i sekundarni maksimum u studenome. Budući da je ovdje utvrđeno da je ukupno mokro taloženje u rasponu ~ 62 – 90 % od ukupnog taloženja, može se zaključiti da je oborina dominantan uzrok taloženja prašine u Jadranskom moru. Stoga se bimodalnost godišnjeg ciklusa taloženja prašine podudara s najvećim opterećenjem prašinom u proljeće i godišnjim hodom oborine koji je potaknut pojačanom ciklonalnom aktivnošću u jesen i proljeće.

Iako metoda EOF ne objašnjava cjelokupnu varijabilnost u podacima, ona izdvaja najvažnije značajke u rasporedu sinoptičkih sustava, koje su ovdje proučene u odnosu na emisiju prašine, AOD i intenzitet taloženja u Jadransko more. To je naširoko korištena tehnika, ali ovdje se primjenjuje na relativno nov način gdje se prva tri moda EOF-a koriste za identifikaciju osam glavnih kombinacija s obzirom na EOF faze. Sinoptički modovi povezani s pozitivnim kombinacijama faza prvog moda objašnjavaju bimodalni godišnji hod taloženja. Povezani su s visinskim dolinama koje utječu na ukupno 78 % deponirane mase i 66 % DDE-a. Pritom su dvije najznačajnije kombinacije C2 i C4. Travanjski maksimum vezan je za kombinaciju C2 čiji je pokretač visinska dolina koja je položena u smjeru jugozapad-sjeveroistok i u sprezi je s dubokom Sredozemnom ciklonom koja na svojoj istočnoj strani prenosi prašinu iz prostranog područja koje se proteže od Maroka do Egipta. Ova ciklona je Sharav ciklona koja tipično putuje sjevernom obalom Afrike i pritom podiže prašinu koja se prenosi prema Jadranu. Završna pozicija Sharav ciklona je često nad Korzikom što odgovara i (klimatološkom) rezultatu baziranom na EOF kombinacijama u ovoj studiji. Ova kombinacija uzrokuje gradijent taloženja od sjevernog dijela Jadrana prema južnom dijelu i od zapadne prema istočnoj jadranskoj obali sa žarištima duž dalmatinske i crnogorske obale te kod Otranta. Jesenski maksimum taloženja posljedica je

dominantno kombinacije C4. U ovom slučaju zapadnim dijelom domene dominira visinska dolina iznad Atlantika s ciklonom u Biskajskom zaljevu, a koja se proteže prema jugu Alžira. Emisije prašine locirane su u planinama Atlas u sjevernom Alžiru i Maroku. Povećanje iznosa AOD-a prošireno je na zapadno Sredozemlje, uključujući cijeli Jadran, a taloženje je najveće duž istočne obale Jadrana dok je anomalija taloženja najveća u sjevernom dijelu Jadrana. Sinoptička situacija vezana za kombinaciju C3 slična je onoj za C4, ali je učinak depozicije znatno slabiji. Tijekom slučaja C3, visinska dolina preko Atlantika proteže se tek do sjevernoafričke obale, a relativno slabe emisije prašine javljaju se u gorju Atlas.

Rogozničko jezero kao jedinstveni, izraženo stratificirani morski sustav na središnjoj obali Jadrana, bez izravnih veza s otvorenim morem podložno je samo atmosferskom unosu slatke vode koja donosi hranjive tvari. Kao takvo, Rogozničko jezero je idealno mjesto za praćenje biološkog odziva potaknutog taloženjem prašine, odnosno kroz primarnu proizvodnju fitoplanktona. Pokazalo se da je DEP u prosjeku na Rogozničkom jezeru veći nego u nekim drugim dijelovima Jadrana. Biološka aktivnost je ovdje dokazana kroz visoku razinu zasićenosti kisikom (do 250 %), a koja je posljedica povećane brojnosti i aktivnosti fitoplanktona (uglavnom dijatomeja) ($> 10^6$ stanica L^{-1}) u srednjem sloju stratificiranog vodenog stupca Rogozničkog jezera (5 – 8 m dubine) nakon intenzivnih epizoda taloženja. U kišnici povezanoj s epizodom taloženja, izmjerene su povišene vrijednosti Fe, Co i površinski aktivnog otopljenog organskog ugljika, DOC-a. Ovaj DOC je vjerojatno pridonio organskom kompleksiranju Fe i time povećao njegovu topljivost i bioraspoloživost. Istodobno, unos alohtonog DOC-a može utjecati na morski ekosustav potičući rast miksotrofnih i heterotrofnih organizama (flagelata) (Bergström, 2009). Dodatno, u prašini koja dolazi iz Libije, taloženje Fe i P procijenjeno je pomoću putanja unazad HYSPLIT i mineraloške karte, pri čemu je dobiveno prilično dobro slaganje između procijenjenog i izmjerenog Fe na površini Rogozničkog jezera. Naši rezultati potvrđuju pozitivan i značajan trend za 30-godišnje vremenske nizove taloženja prašine u Jadransko more s većom učestalošću jakih epizoda mokrog taloženja nakon 2000. godine. Ove činjenice su u proporcionalnom odnosu sa zabilježenim silaznim trendom saliniteta u površinskom sloju Rogozničkog jezera, što izravno doprinosi pojačanoj stratifikaciji vodenog stupca ovog morskog sustava. Pojačana stratifikacija morskih sustava uslijed zagrijavanja površinskog sloja jedna je od glavnih obilježja globalnih promjena.

Unatoč činjenici da taloženje prašine ima relativno nizak fertilizacijski učinak (6 – 10 % u prosjeku), ono može povećati primarnu produktivnost i do 30 % tijekom razdoblja stratifikacije

površinske morske vode (Richon i sur., 2017). Za plitka mora kao što je Jadran, za koja je poznato da su ograničena s P, učestaliji su događaji taloženja prašine (DDE-ovi) koji nose biološki relevantne hranjive tvari imat će snažan utjecaj na biogeokemijske procese.

Klimatološka analiza taloženja prašine na području Jadranskog mora na temelju podataka reanalize MERRA-2 omogućila je izdvajanje ekstremnih događaja u bazu podataka. Iz baze podataka, uvažavajući iznadprosječne satne (a jedan uzorak je bio dnevni) koncentracije PM₁₀ izmjerene na prizemnim postajama za praćenje kvalitete zraka na području Jadrana, odabrane su dvije epizode koje su simulirane i detaljno istražene modelom WRF-Chem.

U prvom slučaju analizirano je ekstremno povećanje koncentracije lebdećih čestica u zraku uzrokovano epizodom donosa prašine na području Balkana. Dnevna vrijednost PM₁₀ izmjerena u Nastavnom zavodu za javno zdravstvo u Rijeci (NZZJZ) 27.3.2020. bila je ~ 7.7 puta veća od prosječne vrijednosti u 2020. Rezultati reanalize i modeliranja pokazali su utjecaj dvaju različitih izvora. Transport iz izvora smještenih na sjeveru Afrike odvijao se po visini u srednjoj troposferi dan uoči zabilježenih maksimalnih vrijednosti PM₁₀, a koje su prema rezultatima modela WRF-Chem vrlo vjerojatno uzrokovane advekcijom u sloju debljine do 2 km nad tlom iz izvora istočno od Kaspijskog jezera. Rezultati modeliranja pokazali su visoku korelaciju sa satnim vrijednostima PM₁₀ izmjerenim na više postaja za kvalitetu zraka u Hrvatskoj, ali podcjenjuju mjerenja u prosjeku za 26 do 57 %. Iako se pokazalo kako je uobičajeno da modeli podcjenjuju koncentracije PM kako tijekom standardnih okolnosti tako i tijekom epizoda donosa prašine (Gašparac i sur. 2020), u ovom slučaju se usporedbom s parametrom optičke debljine aerosola pokazalo da postoji razlika između meridionalnog i zonalnog transporta. Prema mjerenjima mreže AERONET na postajama Lampedusa i Galata, perjanica iz azijskih izvora više je podcijenjena u modelu nego ona iz sjeverne Afrike. Putanje unazad HYSPLIT ukazuju na izvor koji se nalazi na području isušenog Aralskog mora. Karta erodibilnosti, temeljena na jednostavnoj funkciji izvora (S) u modelu WRF-Chem, dokazano je neprikladna za manja pustinjska područja. U ovom slučaju, vrijednosti erodibilnosti nad Aralskim jezerom su nula, i to je najvjerojatniji razlog za pristranost modela u odnosu na mjerenja PM₁₀ i optičku debljinu aerosola, AOD. Analiza metala u tragovima i SEM analiza iz PM₁₀ uzorkovanih na dan pojave maksimalnih vrijednosti tijekom ove epizode na postaji NZZJZ-

a koja je smještena na sjevernom Jadranu dovode do zaključka da sastav čestica upućuje na saharsko porijeklo.

Relativni doprinosi dvaju izvora prašine prizemnim koncentracijama PM₁₀ u Hrvatskoj ne mogu se sa sigurnošću utvrditi. Dok rezultati modeliranja i reanalize (kvalitativno) podupiru zaključak da bi donos iz azijskih izvora, a posebno iz onih na području pustinje Aralkum, trebao objasniti veći dio porasta lebdećih čestica, kemijski i SEM rezultati ukazuju dominantno na prašinu podrijetlom iz Sahare. Rezultati koji govore u prilog tome da su azijski izvori najznačajniji su sljedeći. Povećana AOD identificira perjanice iz saharskog i azijskog smjera. Dok je advekcija s istoka bila u nižoj troposferi i unutar PBL-a, afrička perjanica je bila u srednjoj troposferi i iznad sloja miješanja. Pitanje je kako čestice s te visine mogu završiti u površinskom sloju. Mogući odgovor nalazi se u studiji (Kok i sur., 2021a), gdje autori ukazuju na podejnjavanje emisije i transporta čestica veće frakcije ($5 \mu\text{m} < \text{promjer} < 20 \mu\text{m}$) prašine u većini modela. Također, sredozemne ciklone mogu dodatno pospješiti dalekosežni transport “divovskih” čestica mineralne prašine ($> 75 \mu\text{m}$). Stoga, ako pretpostavimo da se grublje čestice mogu podići i prenijeti u udaljena područja, gravitacijsko taloženje bi moglo biti glavni mehanizam kojim se može argumentirati prisutnost saharske prašine u filtru. Osim toga, anticiklonalni uvjeti nad Europom pogodovali su taloženju prašine saharskog podrijetla. Provjera navedenih tvrdnji zahtijeva daljnja istraživanja u kojima bi se usporedile vrijednosti omjera koncentracija frakcija lebdećih čestica PM_{2.5} i PM₁₀ dobivene modelom s mjerenima. Posebice se to predlaže za slučaj u kojem bi se postojeće polje erodibilnosti u modelu WRF-Chem zamijenilo s onim u kojem se uvažava postojanje pustinje nastale isušivanjem Aralskog mora.

U ovom doktorskom radu model WRF-Chem je primijenjen i za simulaciju epizode donosa saharske prašine na sjeverni Jadran u rujnu 2015. Sinoptička situacija pokazuje utjecaj visinske doline koja se premještala iz Atlantskog oceana te se protezala južno od Pirinejskog poluotoka nakon 11.9.2015. Narednih dana po visini duž istočnog dijela Pirinejskog poluotoka puhao je jugozapadni vjetar koji je jačao pri premještanju doline i mlazne struje (na 200 hPa). Ovi sinoptički uvjeti bili su pogodni za transport prašine na velike udaljenosti. Polja emisije prašine WRF-Chem-a ukazala su na dva glavna izvora prašine: S1 u sjeverozapadnom Alžiru i S2 u Tunisu koji se nalazi na području nekoliko tranzijentnih (engl. *ephemeral*) jezera (engl. *Chotts*) poznatim po

emisijama prašine. Emisija prašine iz modela WRF-Chem ukazuje na dnevni hod, gdje je jutarnji maksimum na području izvora povezan s jutarnjom promjenom u vertikalnoj strukturi noćne niske mlazne struje. Na području izvora S2 popodne se javljao i dodatni maksimum. Putanje unaprijed modela HYSPLIT korištene su za povezivanje maksimuma emisija u izvorima S1 i S2 s porastom koncentracija PM_{10} izmjerenim na 10 postaja u Italiji i Hrvatskoj. Najviše koncentracije PM_{10} zabilježene su 17. i 18.9.2015. na svim postajama. Ilustrativno, analiza napravljena za porast koncentracija 18.9.2015. pokazala je da iako su najjače emisije na području izvora S1, izvori na području S2 imali su veći utjecaj na PM_{10} . Razlog tome je prijenos prašine iz izvora S1 na visini većoj od 2000 m iznad tla, dok je oblak prašine iz izvora S2 putovao do visine od 400 m. Stoga je u drugom slučaju prašina advektirana (čak i tijekom noći) unutar atmosferskog graničnog sloja. Ovaj rezultat treba uzeti s oprezom budući da simuliranu visinu atmosferskog graničnog sloja nije bilo moguće u potpunosti evaluirati. Također, vremena nastupa maksimalnih emisija prašine mogu biti izvor neodređenosti u pogledu složenih mezoskalnih procesa koji rezultiraju velikim prizemnim brzinama vjetera, a koje su ključne za podizanje prašine. Dobro je poznato da modeli grube razlučivosti umjesto simuliranja konvekcije koriste parametrizaciju iste, što može dati pogrešna vremena nastupa i iznose emisije prašine.

Jedan od ciljeva bio je i simulirati epizodu donosa prašine korištenjem raznih modula za simulaciju kemijskih procesa. Stoga su provedena četiri eksperimenta korištenjem dva kemijska modula; MOZART-GOCART i MOZART-MOSAIC pri čemu su u jednom slučaju korišteni rubni uvjeti za koncentraciju prašine iz globalnog modela MOZART-4, a u drugom ne. Model je evaluiran pomoću mjerenja optičkih svojstava atmosfere, AOD-a i prizemnih koncentracija PM_{10} . Najprije je uspješnost modela testirana pomoću AOD-a na 500 nm pomoću mjerenja na osam AERONET postaja. Lokacije postaja su od sjeverne Afrike do sjeverne Italije uvažavajući uvjet da su bile smještene na području transporta i širenja perjanica prašine. Ujedno je ispitana uspješnost modela u simulaciji površinskih koncentracija PM_{10} za odabrane epizode za što su upotrijebljena mjerenja sa šest talijanskih i četiri hrvatske postaje za kvalitetu zraka. Pokazalo se da između simulacija i mjerenja postoji visoka korelacija, kako za AOD tako i za PM_{10} . S obzirom na testove osjetljivosti, najbolje slaganje je dobiveno u slučaju kad se koristi modul MOZART-GOCART bez primjene rubnih uvjeta iz globalnog kemijskog transportnog modela MOZART-4. Ovaj rezultat je potencijalno vrijedan za buduća istraživanja složenih atmosferskih procesa tijekom epizoda donosa prašine.

6. LITERATURA

Alebić-Juretić, A. (2015). Airborne Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Suspended Particulates from the Urban Atmosphere of Rijeka, Croatia, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35:1, 91-101, DOI: [10.1080/10406638.2014.922106](https://doi.org/10.1080/10406638.2014.922106)

Alebić-Juretić, A., & Mifka, B. (2017). Secondary sulfur and nitrogen species in PM10 from the Rijeka Bay area (Croatia). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 98, 133–140. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1981-6>

Alpert, P., & Ziv, B. (1989). The Sharav cyclone: Observations and some theoretical considerations. *Journal of Geophysical Research*, 94. <https://doi.org/10.1029/jd094id15p18495>

Alpert, P., Kishcha, P., Shivelman, A., Krichak, S. O., & Joseph, J. H. (2004). Vertical distribution of Saharan dust based on 2.5-year model predictions. *Atmospheric Research*, 70, 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2003.11.001>

Avila, A., Alarcón, M., Castillo, S., Escudero, M., Orellana, J. G., Masqué, P., & Querol, X. (2007). Variation of soluble and insoluble calcium in red rains related to dust sources and transport patterns from North Africa to northeastern Spain. *Journal of Geophysical Research*, 112(D5), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2006JD007153>

Baeyens, W., Gao, Y., Davison, W., Galceran, J., Leermakers, M., Puy, J., et al. (2018). In situ measurements of micronutrient dynamics in open seawater show that complex dissociation rates may limit diatom growth. *Scientific Reports*, 8, 16125. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34465-w>

Bakker, N. L., Drake, N. A., & Bristow, C. S. (2019). Evaluating the relative importance of

northern African mineral dust sources using remote sensing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(16), 10525–10535. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10525-2019>

Barkan, J., Kutiel, H., & Alpert, P. (2004). Climatology of dust sources in North Africa and the Arabian Peninsula, based on TOMS data. *Indoor and Built Environment*, 13(6), 407–419. <https://doi.org/10.1177/1420326x04046935>

Barkan, J., Alpert, P., Kutiel, H., & Kishcha, P. (2005). Synoptics of dust transportation days from Africa toward Italy and central Europe. *Journal of Geophysical Research*, 110(D7). <https://doi.org/10.1029/2004JD005222>

Barkley, A.P., Olson N.E., Prospero J.M., Gatineau, A., Panechou, K., Maynard, N.G., Blackwelder, P., China, S., Ault, A.P., Gaston, C.J. (2021). Atmospheric transport of North African dust-bearing supermicron freshwater diatoms to South America: implications for iron transport to the equatorial North Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2020GL090476>

Barnaba, F., & Gobbi, G. P. (2004). Aerosol seasonal variability over the Mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the basin from MODIS data in the year 2001. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(9/10), 2367–2391. <https://doi.org/10.5194/acp-4-2367-2004>

Belušić, A., Telišman Prtenjak, M., Güttler, I., Ban, N., Leutwyler, D., & Schär, C. (2018). Near-surface wind variability over the broader Adriatic region: Insights from an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 50, 4455–4480. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3885-5>

Belušić Vozila, A., Telišman Prtenjak, M., & Güttler, I. (2021). A weather-type classification and its application to near-surface wind change projections over the Adriatic region. *Atmosphere*, 12, 94816. <https://doi.org/10.3390/atmos12080948>

Benedetti, A. *et al.* (2014). Operational Dust Prediction. In: Knippertz, P., Stuut, JB. (eds) Mineral Dust. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_10

Bergström, A.-K. (2009). Seasonal dynamics of bacteria and mixotrophic flagellates as related to input of allochthonous dissolved organic carbon. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 30(6), 923–928. <https://doi.org/10.1080/03680770.2009.11902273>

Buchard, V., Randles, C. A., da Silva, A., Darmenov, A. S., Colarco, P. R., Govindaraju, R. C., et al. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980-onward, Part II: Evaluation and case studies. *Journal of Climate*, 30, 6851–6872. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0613.1>

Bura-Nakić, E., Viollier, E., & Ciglencčki, I. (2013). Electrochemical and colorimetric measurements show the dominant role of FeS in a permanently Anoxic lake. *Environmental Science & Technology*, 47, 741–749. <https://doi.org/10.1021/es303603j>

Burić, Z., Caput Mihalić, K., Cetinić, I., Ciglencčki, I., Carić, M., Viličić, D., & Čosović, B. (2009). Occurrence of the rare microflagellates *Prorocentrum arcuatum* issel and *Hermesinum adriaticum* Zacharias in the marine lake Rogoznica (eastern Adriatic coast). *Acta Adriatica*, 50, 31–44.

Chen, F. and Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129, 569-585. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)

Chin, M., R. B. Rood, S.-J. Lin, J.-F. Müller, Thompson A. (2000). Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOC.4RT: Model description and global properties, *J. Geophys. Res.*, 105, 24,671-24,687, 2000.

Choobari O. A., P. Zawar-Reza, Sturman A. (2012). Feedback between wind- blown dust and planetary boundary-layer characteristics: Sensitivity to boundary and surface layer parameterizations. *Atmos. Environ.* 61, 294-304, doi:10.1016/j.at-mosenv.2012.07.038.

Ciglenečki, I., Carić, M., Kršinić, F., Viličić, D., & Čosović, B. (2005). The extinction by sulfide turnover and recovery of a naturally eutrophic, meromictic seawater lake. *Journal of Marine Systems*, 56, 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.08.006>

Ciglenečki, I., Janekovic, H., Marguš, M., Bura-Nakić, E., Carić, M., Ljubešić, Z., et al. (2015). Impacts of extreme weather events on highly eutrophic marine ecosystem (Rogoznica Lake, Adriatic coast). *Continental Shelf Research*, 108, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.05.007>

Ciglenečki, I., Ljubešić, Z., Janeković, I., & Batistić, M. (2017). Rogoznica Lake, a Euxinic Marine lake on the Adriatic coast (Croatia) that fluctuates between anoxic holomictic and meromictic conditions. In R. Gulati, E. Zadereev, & A. Degermendzhi (Eds.), *Ecology of meromictic lakes. Ecological studies (analysis and synthesis)*(Vol. 228, p. 125–154). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_6

Colarco, P., da Silva, A., Chin, M., & Diehl, T. (2010). Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *Journal of Geophysical Research*, 115, D14207. <https://doi.org/10.1029/2009jd012820>

Collaud, C. M., Weingarten, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Schwikowski, M., & Baltenspreger, U. (2003). Saharan dust events at the Jungfraujoch: Detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and analysis of the events during the years 2001 and 2002. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 3, 5547–5594.

<https://doi.org/10.5194/acpd-3-5547-2003>

Cremades, P. G., Fernández, R. P., Allende, D. G., Mulena, G. C., & Puliafito, S. E. (2017). High resolution satellite derived erodibility factors for WRF/Chem windblown dust simulations in Argentina. *Atmósfera*, 30(1), 11–25. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.01.02>

Cushman-Roisin, B., Gačić, M., & Poulain, P.-M. (2001). Physical oceanography of the Adriatic Sea. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9819-4>

Cvitešić Kušan, A., Kroflič, A., Grgić, I., Ciglencečki, I., & Frka, S. (2020). Chemical characterization of fine aerosols in respect to water-soluble ions at the eastern Middle Adriatic coast. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27, 10249–10264. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07617-7>

Čanković, M., Žučko, J., Dupčić Radić, I., Janeković, I., Sviličić Petrić, I., Ciglencečki, I., & Collins, G. (2019). Microbial diversity and long-term geochemical trends in the euxinic zone of a marine, Meromictic lake. *Systematic and Applied Microbiology*, 42(6), 126016. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.126016>

Ćosović, B., Ciglencečki, I., Viličić, D., & Ahel, M. (2000). Distribution and seasonal variability of organic matter in a small eutrophicated Salt lake. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(6), 705–715. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0721>

De Baar, H. J., Boyd, P. W., Coale, K. H., Landry, M. R., Tsuda, A., Assmy, P., et al. (2005). Synthesis of iron fertilization experiments: From the iron age in the age of enlightenment. *Journal of Geophysical Research*, 110, C09S16. <https://doi.org/10.1029/2004jc002601>

Deng, A., Stauffer, D. R., Dudhia, J., Otte, T. L., and Hunter, G. K. (2006). Update on analysis

nudging FDDA in WRF-ARW, 8th WRF users workshop, Boulder, Colorado, USA, available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/4-8_Deng.pdf.

D'Ortenzio, F., Iudicone, D., de Boyer Montegut, C., Testor, P., Antoine, D., Marullo, S., et al. (2005). Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles. *Geophysical Research Letters*, 32(12). <https://doi.org/10.1029/2005GL022463>

Duce, R. A., & Tindale, N. W. (1991). Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 36(8), 1715–1726. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.8.1715>

Dubovik, O., and M. D. King (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 105(D16), 20673–20696, doi: 10.1029/2000JD900282.

Emmons, L. K., Walters, S., Hess, P. G., Lamarque, J.-F., Pfister, G. G., Fillmore, D., Granier, C., Guenther, A., Kinnison, D., Laepple, T., Orlando, J., Tie, X., Tyndall, G., Wiedinmyer, C., Baughcum, S. L., and Kloster, S. (2010). Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4), *Geosci. Model Dev.*, 3, 43-67, <https://doi.org/10.5194/gmd-3-43-2010>, 2010.

Engelstaedter, S., Tegen, I., & Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79, 73–100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.004>

Federici, E., Petroselli, C., Montalbani, E., Casagrande, C., Ceci, E., Moroni, B., et al. (2018). Airborne bacteria and persistent organic pollutants associated with an intense Saharan dust event in the Central Mediterranean. *Science of the Total Environment*, 645(15), 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.128>

Fiedler S, Schepanski K, Heinold B, Knippertz P, Tegen I. (2013). Climatology of nocturnal low-level jets over North Africa and implications for modeling mineral dust emission. *J Geophys Res Atmos.* 2013 Jun 27;118(12):6100-6121. doi: 10.1002/jgrd.50394. Epub 2013 Jun 21. PMID: 25893154; PMCID: PMC4394707.

Fiedler, S., Schepanski, K., Knippertz, P., Heinold, B., and Tegen, I. (2014). How important are atmospheric depressions and mobile cyclones for emitting mineral dust aerosol in North Africa, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 8983–9000, <https://doi.org/10.5194/acp-14-8983-2014>.

Flaounas, E., Davolio, S., Raveh-Rubin, S., Pantillon, F., Miglietta, M. M., Gaertner, M. A., Hatzaki, M., Homar, V., Khodayar, S., Korres, G., Kotroni, V., Kushta, J., Reale, M., and Ricard, D. (2022). Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts, *Weather Clim. Dynam.*, 3, 173–208, <https://doi.org/10.5194/wcd-3-173-2022>

Galletti, Y., Becagli, S., di Sarra, A., Gonnelli, M., Pulido-Villena, E., Sferlazzo, D. M., et al. (2020). Atmospheric deposition of organic matter at a remote site in the central Mediterranean Sea: Implications for the marine ecosystem. *Biogeosciences*, 17, 3669–3684. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3669-2020>

Gašparac, G., Jeričević, A., Kumar, P., and Grisogono, B.: Regional-scale modelling for the assessment of atmospheric particulate matter concentrations at rural background locations in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 6395–6415, <https://doi.org/10.5194/acp-20-6395-2020>, 2020.

Ge, Y., Abuduwaili, J., Ma, L. *et al.* Temporal Variability and Potential Diffusion Characteristics of Dust Aerosol Originating from the Aral Sea Basin, Central Asia. *Water Air Soil Pollut* **227**, 63 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2758-6>

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., et al. (2017). The Modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of*

Climate, 30, 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

Gillette, D. A., and Passi, R. (1988), Modeling dust emission caused by wind erosion, *J. Geophys. Res.*, 93(D11), 14233– 14242, doi:[10.1029/JD093iD11p14233](https://doi.org/10.1029/JD093iD11p14233).

Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, and S.J. Lin (2001), Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, *J. Geophys. Res.*, 106(D17), 20255–20273, doi: 10.1029/2000JD000053.

Gledhill, M., & Buck, K. N. (2012). The organic complexation of iron in the marine environment: A review. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00069>

Global Modeling & Assimilation Office (GMAO). (2008). inst6_3d_ana_Np: MERRA 3D analyzed state, meteorology instantaneous 6-hourly V5.2.0. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Accessed: [27.5-1.6.2020.]. <https://doi.org/10.5067/ADAWH64DCRU0>

Global Modeling & Assimilation Office (GMAO). (2015a). Aerosol mixing ratio V5.12.4. MERRA-2 inst3_3d_aer_Nv: 3d,3-Hourly, Instantaneous, Model-Level, Assimilation. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Accessed: [14.12.2020]. <https://doi.org/10.5067/LTVB4GPCOTK2>

Global Modeling & Assimilation Office (GMAO). (2015b). MERRA-2 tavg1_2d_adg_Nx: 2d,1-Hourly, time-averaged, single-level, assimilation, aerosol diagnostics (extended) V5.12.4. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Accessed: [19-26.2.2020]. <https://doi.org/10.5067/HM00OHQBHKTP>

Global Modeling & Assimilation Office (GMAO). (2015c). MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly,time-averaged, single-level, assimilation, aerosol diagnostics V5.12.4. Goddard Earth

Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Accessed:[16.-17.2.2020]
<https://doi.org/10.5067/KLICLTZ8EM9D>

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015d), MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [13.05.2022], [10.5067/KLICLTZ8EM9D](https://doi.org/10.5067/KLICLTZ8EM9D)

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015e), MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Single-Level Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [13.05.2022], [10.5067/VJAFPLI1CSIV](https://doi.org/10.5067/VJAFPLI1CSIV)

Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2001). Saharan dust storms: Nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56(1), 179–204. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8)

Goudie, A.S. & Middleton, N.J. (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer, New York.

Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., and Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model, *Atmos. Environ.*, 39, 6957–6975, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>

Groll, M., Opp, C., Issanova, G., Vereshagina, N., & Semenov, O. (2019). Physical and chemical characterization of dust deposited in the Turan lowland (Central Asia). *Proc. E3S Web Conf.*, 99, 03005.

Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., and Geron, C. (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181-3210, <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>, 2006.

Guieu, C., Bonnet, S., Wagener, T., & Loÿe-Pilot, M.-D. (2005). Biomass burning as a source of dissolved iron to the open ocean? *Geophysical Research Letters*, 32(19). <https://doi.org/10.1029/2005gl022962>

Hamonou, E., Chazette, P., Balis, D., Dulac, F., Schneider, X., Galani, E., et al. (1999). Characterization of the vertical structure of Saharan dust export to the Mediterranean basin. *Journal of Geophysical Research*, 104(D18), 22257–22270. <https://doi.org/10.1029/1999jd900257>

Heinold, B., Knippertz, P., Marsham, J. H., Fiedler, S., Dixon, N. S., Schepanski, K., et al. (2013). The role of deep convection and nocturnal low-level jets for dust emission in summertime West Africa: Estimates from convection-permitting simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50402>

Helz, G. R., Bura-Nakić, E., Mikac, N., & Ciglencečki, I. (2011). New model for molybdenum behavior in euxinic basins. *Chemical Geology*, 284(3), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.03.012>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803.

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J. P., Stezer, A., Vermote, E., Reagan, Y., Kaufman, U. J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., & Smirnov, A. (1998). AERONET-A

federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66, 1–16.

Horvath, K., Lin, Y., & Ivančan-Picek, B. (2008). Classification of cyclone tracks over Apennines and the Adriatic Sea. *Monthly Weather Review*, 136(6), 2210–2227. <https://doi.org/10.1175/2007mwr2231.1>

Huneeus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., Kinne, S., et al. (2011). Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(15), 7781–7816. <https://doi.org/10.5194/acp-11-7781-2011>

Iacono, M.J.; Delamere, J.S.; Mlawer, E.J.; Shephard, M.W.; Clough, S.A.; Collins, W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases (2008). Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2008, 113.

Indoitu, R., Orlovsky, L., & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in central Asia: spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environment*, 85, 62–70.

Israelevich, P., Ganor, E., Alpert, P., Kishcha, P., & Stupp, A. (2012). Predominant transport paths of Saharan dust over the Mediterranean Sea to Europe. *Journal of Geophysical Research*, 117, D02205. <https://doi.org/10.1029/2011JD016482>

Ito, A., & Shi, Z. (2016). Delivery of anthropogenic bioavailable iron from mineral dust and combustion aerosols to the ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 85–99. <https://doi.org/10.5194/acp-16-85-2016>

Ito, A., Ye, Y., Baldo, C., & Shi, Z. (2021). Ocean fertilization by pyrogenic aerosol iron. *npj Clim Atmospheric Science*, 4, 30. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00185-8>

Jakovljević, I., Šimić, I., Mendaš, G., Sever Štrukil, Z., Žužul, S., Gluščić, V., Godec, R., Pehnc, G., Bešlić, I., Milinković, A. et al. Pollution levels and deposition processes of airborne organic pollutants over the central Adriatic area: Temporal variabilities and source identification // *Marine pollution bulletin*, (2021), 172; 112873, 18 doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112873.

Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Dentener, F., Muntean, M., Pouliot, G., Keating, T., Zhang, Q., Kurokawa, J., Wankmüller, R., Denier van der Gon, H., Kuenen, J. J. P., Klimont, Z., Frost, G., Darras, S., Koffi, B., and Li, M.: HTAP_v2.2 (2015). a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11411-11432, <https://doi.org/10.5194/acp-15-11411-2015>.

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

Jeričević, A., Džaja Grgičin, V., Telišman Prtenjak, M., Vidič, S., & Bloemen, H. (2016). Analyses of urban and rural particulate matter mass concentrations in Croatia in the period 2006-2014. *Geofizika*, 33, 157–181. <https://doi.org/10.15233/gfz.2016.33.8>

Jeričević, A., Gašparac, G., Maslač, M., Kumar, P., & Telišman Prtenjak, M. (2019). Identification of diverse air pollution sources in a complex urban area of Croatia. *Journal of Environmental Management*, 243, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.024>

Jickells, T., & Moore, C. M. (2015). The importance of atmospheric deposition for ocean productivity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46(1), 481–501. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054118>

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C.

Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)

Kanakidou, M., Myriokefalitakis, S., & Tsagkaraki, M. (2020). Atmospheric inputs of nutrients to the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research Part II*, 171, 104606. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.06.014>

Karami S., Hamzeh N. H., Kaskaoutis D. G., Rashki A., Alam K., Ranjbar A. (2021). Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: The case of Aral Sea and Sistan Basin, *Aeolian Research*, Volume 50, 100679, ISSN 1875-9637. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100679>.

Kehler-Poljak, G., Telišman Prtenjak, M., Kvakić, M., Šariri, K., & Večenaj, Ž. (2017). Interaction of sea breeze and deep convection over the Northeastern Adriatic Coast: An analysis of sensitivity experiments using a high-resolution mesoscale model. *Pure and Applied Geophysics*, 174, 4197–4224. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1607-x>

Klaić, Z. (1998). Lagrangeovski model daljinskog prijenosa sumpora u atmosferi, doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Kleist, D. T., Parrish, D. F., Derber, J. C., Treadon, R., Wu, W.-S., & Lord, S. (2009). Introduction of the GSI into the NCEP global data assimilation system. *Weather and Forecasting*, 24, 1691–1705. <https://doi.org/10.1175/2009waf2222201.1>

Knippertz, P. (2008). Dust emissions in the West African heat trough the role of the diurnal cycle and of extratropical disturbances. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(5), 553–563. doi:10.1127/0941-2948/2008/0315

Kok, J. F., Adebisi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., et al. (2021a). Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 8127–8167. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8127-2021>

Kok, J. F., Adebisi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P. R., Hamilton, D. S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Li, L., Mahowald, N. M., Miller, R. L., Obiso, V., Pérez García-Pando, C., Rocha-Lima, A., and Wan, J. S. (2021b). Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8169–8193, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>.

Krom, M. D., Kress, N., Brenner, S., & Gordon, L. I. (1991). Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography*, 36. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.3.0424> Laurent, B., Losno, R., Chevaillier, S., Vincent, J., Rouillet, P., Bon Nguyen, E., et al. (2015). An automatic collector to monitor insoluble atmospheric deposition: Application for mineral dust deposition. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 2801–2811. <https://doi.org/10.5194/amt-8-2801-2015>

Krom, M. D., Herut, B., & Mantoura, R. F. C. (2004). Nutrient budget for the eastern Mediterranean: Implications for phosphorus limitation. *Limnology and Oceanography*, 5, 1582–1592. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.5.1582>

Kumar, R., Barth, M. C., Pfister, G. G., Naja, M., and Brasseur, G. P. (2014). WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 2431–2446, <https://doi.org/10.5194/acp-14-2431-2014>.

Laurent, B., Losno, R., Chevaillier, S., Vincent, J., Rouillet, P., Bon Nguyen, E., ... Bergametti, G. (2015). An automatic collector to monitor insoluble atmospheric deposition: an application for mineral dust deposition. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 8(3), 2299–2329.

doi:10.5194/amtd-8-2299-2015

LeGrand, S. L., Polashenski, C., Letcher, T. W., Creighton, G. A., Peckham, S. E., & Cetola, J. D. (2019). The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3. 8.1, *Geosci. Model Dev.*, 12, 131-166."

Li, L., & Sokolik, I. N. (2018). The dust direct radiative impact and its sensitivity to the land surface state and key minerals in the WRF-Chem-DuMo model: A case study of dust storms in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 4564–4582. <https://doi.org/10.1029/2017JD027667>

Litchman, E., Klausmeier, C. A., Miller, J. R., Schofield, O. M., & Falkowski, P. G. (2006). Multi-nutrient, multi-group model of present and future oceanic phytoplankton communities. *Biogeosciences*, 3, 585–606. <https://doi.org/10.5194/bg-3-585-2006>

Litchman, E., Klausmeier, C. A., Schofield, O. M., & Falkowski, P. G. (2007). The role of functional traits and trade-offs in structuring phytoplankton communities: Scaling from cellular to ecosystem level. *Ecology Letters*, 10, 1170–1181. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01117.x>

Lo, J. C.-F., Yang, Z.-L., & Pielke Sr., R. A. (2008). Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, *J. Geophys. Res.*, 113, D09112, doi:10.1029/2007JD009216

Ludwig, W., Dumont, E., Meybeck, M., & Heussner, S. (2009). River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Progress in Oceanography*, 80(3), 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>

Mackey, K. R. M., Buck, K. N., Casey, J. R., Cid, A., Lomas, M. W., Sohrin, Y., & Paytan, A. (2012). Phytoplankton responses to atmospheric metal deposition in the coastal and open-ocean Sargasso Sea. *Frontiers in Microbiology*, 3, 359. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00359>

Madronich, Sasha. (1993). The Atmosphere and UV-B Radiation at Ground Level. 10.1007/978-1-4899-2406-3 1.

Mahowald, N. M., Engelstaedter, S., Luo, C., Sealy, A., Artaxo, P., Benitez-Nelson, C., et al. (2009). Atmospheric iron deposition: Global distribution, variability, and human perturbations. *Annual Review of Marine Science*, 1, 245–278. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163727>

Mahowald, N., Albani, S., Jasper, F. K., Engelstaeder, S., Scanza, R., Ward, D. S., & Flanner, M. G. (2014). The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Research*, 15, 1875–9637. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.09.002>

Merico, E., Conte, M., Grasso, F. M., Cesari, D., Gambaro, A., Morabito, E., et al. (2020). Comparison of the impact of ships to size-segregated particle concentrations in two harbour cities of northern Adriatic Sea. *Environmental Pollution*, 266, 115–175. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115175>

Micklin P. (2007). The Aral Sea Disaster. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2007. 35:47–72. [10.1146/annurev.earth.35.031306.140120](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140120)

Mifka, B., Žurga, P., Kontošić, D., Odorčić, D., Mezlar, M., Merico, E., et al. (2021). Characterization of airborne particulate fractions from the port city of Rijeka, Croatia. *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112–236. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112236>

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kuzmić, J., Čanković, M., Mateša, S., & Ciglenečki, I. (2022). Climatology of dust deposition in the Adriatic Sea; a possible impact on marine production. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035783. <https://doi.org/10.1029/2021JD035783>

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kavre Piltaver, I., Mekterović, D., Kuzmić, J., Marcijuš, M., Ciglenečki, I. (2022b). The aspects of numerical simulations on desert dust outbreaks over the Adriatic Sea; influence of Asian and African deserts // HARMO 21, 21st International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, PROCEEDINGS / Trini-Castelli, Silvia ; Miranda, Ana Isabel ; Augusto, Bruno ; Ferreira, Joana (ur.). Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, 2022b. str. 129-130

Mikuš, P., Telišman Prtenjak, M., & Strelec Mahović, N. (2012). Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research*, 104–105, 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.016>

Milinković, A., Penezić, A., Cvitešić Kušan, A., Gluščić, V., Žužul, S., Skejčić, S., Šantić, D., Godec, R., Pehnc, G., Omanović, D., et al. Variabilities of biochemical properties of the sea surface microlayer: Insights to the atmospheric deposition impacts // *Science of the total environment*, 838 (2022), 156440, 14 doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156440

Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., & Bacmeister, J. (2015). Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2, *Geosci. Model Dev*, 8, 1339–1356. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1339-2015>

Morrison, H.; Curry, J.A.; Khvorostyanov, V.I. (2005). A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models, Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, 62, 1665–1677.

Moulin, C., Lambert, C. E., Dayan, U., Masson, V., Ramonet, M., Bousquet, P., et al. (1998). Satellite climatology of African dust transport in the Mediterranean atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 103(111), 13137–13144. <https://doi.org/10.1029/98JD00171>

Nakanishi, M., & Niino, H. (2009). Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87, 895–912. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895>

Nickovic, S., Vukovic, A., Vujadinovic, M., Djurdjevic, V., & Pejanovic, G. (2012). Technical Note: High-resolution mineralogical database of dust-productive soils for atmospheric dust modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(2), 845–855. <https://doi.org/10.5194/acp-12-845-2012>

Nickovic, S., Vukovic, A., & Vujadinovic, M. (2013). Atmospheric processing of iron carried by mineral dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(18), 9169–9181. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9169-2013>

Nodwell, L. M., & Price, N. M. (2001). Direct use of inorganic colloidal iron by marine mixotrophic phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 46(4), 765–777. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.4.0765>

Nygaard, K., & Tobiesen, A. (1993). Bacterivory in algae: A survival strategy during nutrient limitation. *Limnology and Oceanography*, 38, 273–279. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.2.0273>

O'Hara, S.L., Wiggs, G.F., Mamedov, B., Davidson, G., Hubbard, R.B., 2000. Exposure to airborne dust contaminated with pesticide in the Aral Sea region. *Lancet* 355 (9204), 627–628.

Orlović-Leko, P., Vidović, K., Ciglencečki, I., Omanović, D., Dutour Sikirić, M., & Šimunić, I. (2020). Physico-chemical characterization of an urban rainwater (Zagreb, Croatia). *Atmosphere*, 11, 144–163. <https://doi.org/10.3390/atmos11020144>

Özsoy, T., & Saydam, A. C. (2001). Iron speciation in precipitation in the North-Eastern Mediterranean and its relationship with Sahara dust. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 40, 41–76. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010602026579>

Palacios-Peña, L., Lorente-Plazas, R., Montávez, J.P., & Jiménez-Guerrero, P. (2019). Saharan Dust Modeling Over the Mediterranean Basin and Central Europe: Does the Resolution Matter? *Front. Earth Sci.* 7:290. doi: 10.3389/feart.2019.00290

Pantillon, F., P. Knippertz, J.H. Marsham, & C.E. Birch, 2015: A Parameterization of Convective Dust

Storms for Models with Mass-Flux Convection Schemes. *J. Atmos. Sci.*, 72, 2545–2561, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0341.1>

Penezić, A., Milinković, A., Bakija Alempijević, S., Žužul, S., & Frka, S. (2021). Atmospheric deposition of biologically relevant trace metals in the eastern Adriatic coastal area. *Chemosphere*, 283, 131178. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131178>

Penzar, B., Penzar, I., & Orlić, M. (2001). *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana*. Nakladnička kuća "Dr. Feletar".

Pfister, G. G., Parrish, D. D., Worden, H., Emmons, L. K., Edwards, D. P., Wiedinmyer, C., Diskin, G. S., Huey, G., Oltmans, S. J., Thouret, V., Weinheimer, A., & Wisthaler, A. (2011). Characterizing summertime chemical boundary conditions for airmasses entering the US West Coast, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1769-1790, <https://doi.org/10.5194/acp-11-1769-2011>.

Pielke, R. A., & Mahrer, Y. (1978). Verification analysis of the University of Virginia three-dimensional mesoscale model prediction over South Florida for July 1, 1973. *Monthly Weather Review*, 106, 1568–1589. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106<1568:vaotuo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106<1568:vaotuo>2.0.co;2)

Prospero, J. M. (1996). Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An overview. In S. Guerzoni, & R. Chester (Eds.), *The Impact of desert dust across the Mediterranean*. Environmental science and technology library (Vol. 11, pp. 133–151). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3354-0_13

Prospero, J. M. (1999). Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality. *Journal of Geophysical Research*, 104(D13), 15917–15927. <https://doi.org/10.1029/1999jd900072>

Pulido-Villena, E., Rérolle, V., and Guieu, C. (2010). Transient fertilizing effect of dust in P-deficient LNLC surface ocean. *Geophysical Research Letters*, 37, L01603. <https://doi.org/10.1029/2009GL041415>

Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Draper, C. S., Mahanama, S. P. P., & Partyka, G. S. (2017). Land surface precipitation in MERRA-2. *Journal of Climate*, 30, 1643–1664. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0570.1>

Richon, C., Dutay, J.-C., Dulac, F., Wang, R., Balkanski, Y., Nabat, P., et al. (2017). Modeling the impacts of atmospheric deposition of nitrogen and desert dust-derived phosphorus on nutrients and biological budgets of the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 163, 21–39. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.04.009>

Richon, C., Dutay, J.-C., Dulac, F., Wang, R., & Balkanski, Y. (2018). Modeling the

biogeochemical impact of atmospheric phosphate deposition from desert dust and combustion sources to the Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 15(8), 2499–2524. <https://doi.org/10.5194/bg-15-2499-2018>

Ridame, C., Dekaezemacker, J., Guieu, C., Bonnet, S., L' Helguen, S., & Malien, F. (2014). Phytoplanktonic response to contrasted Saharan dust deposition events during mesocosm experiments in LNLC environment. *Biogeosciences*, 11, 753–796. <https://doi.org/10.5194/bg-11-753-2014>

Rizza, U., Anabor, V., Mangia, C., Miglietta, M. M., Degrazia, G. A., & Passerini, G. (2016). WRF-chem Simulation of a Saharan dust Outbreak over the Mediterranean Regions. *Ciência E Natura*, 38, 330–336. <https://doi.org/10.5902/2179460X20249>

Rizza, U., Barnaba, F., Miglietta, M. M., Mangia, C., Di Liberto, L., Dionisi, D., Costabile, F., Grasso, F., and Gobbi, G. P. (2017). WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multi-sensor desert dust observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 93–115, <https://doi.org/10.5194/acp-17-93-2017>.

Rizza, U., Miglietta, M. M., Mangia, C., Ielpo, P., Morichetti, M., Iachini, C., et al. (2018). Sensitivity of WRF-Chem model to land surface schemes: Assessment in a severe dust outbreak episode in the Central Mediterranean (Apulia Region). *Atmospheric Research*, 201, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.022>

Roberts, A. J., P. Knippertz (2014). The formation of a large summertime Saharan dust plume: Convective and synopticscale analysis, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1766–1785, doi: 10.1002/2013JD020667.

Romagnoli, P., Balducci, C., Perilli, M., Perreca, E., & Cecinato, A. (2016). Particulate PAHs and n-alkanes in the air over southern and eastern Mediterranean Sea. *Chemosphere*, 159, 516–552. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.024>

Roy S. B., Smith M., Morris L., Orlovsky N., Khalilov A. (2014). Impact of the desiccation of the Aral Sea on summertime surface air temperatures. *Journal of Arid Environments*, Volume 110, Pages 79-85, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.06.008>.

Rudnick, R., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 3, 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>

Sardoo, S. F., Mesbahzadeh T., Salajeghe A., Zehtabian G., Ranjbar A., Miglietta M. M., Krakauer. N. (2022). Antecedent Soil Moisture Conditions Influenced Vertical Dust Flux: A Case Study in Iran Using WRF-Chem Model. *Land* 2022, 11, 819.

Schepanski, K., Tegen, I., & Macke, A. (2012). Comparison of satellite based observations of Saharan dust source areas. *Remote Sensing of Environment*, 123, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.019>

Schepanski, K., Mallet, M., Heinold, B., & Ulrich, M. (2016). North African dust transport toward the western Mediterranean Basin: Atmospheric controls on dust source activation and transport pathways during June-July 2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22). <https://doi.org/10.5194/acp-16-14147-2016>

Shao, Y., Wyrwoll, K.-H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., et al. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4), 181–204. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>

Sharma, A., Huang, H.P., Zaviyalov, P., Khan V. (2018). Impact of Desiccation of Aral Sea on the Regional Climate of Central Asia Using WRF Model. *Pure Appl. Geophys.* **175**, 465–478 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1675-y>

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVH

Skamarock, C., Klemp, B., Dudhia, J., Gill, O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, G., Duda, G., Barker, D., & Huang, X. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *Undefined* . <https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97>

Stein, A.F., Draxler, R.R, Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059- 2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

Strelec Mahović, N., Prieto, J., Jeričević, A., Gasparac, G., and Smiljanić, I. (2020). EUMETSAT Webpage, <https://www.eumetsat.int/aralkum-desert-dust-pollutes-air-south-east-europe> (last access: 26 April 2021).

Svensen, C., Wexels Riser, C., Cetinić, I., & Carić, M. (2008). Vertical flux regulation and plankton composition in a simple ecological system: Snapshots from the small marine lake Rogoznica (Croatia). *Acta Adriatica*, 49, 37–51.

Šegota, T., & Filipčić, A. (2003). Köppen's classification of climates and the problem of corresponding Croatian terminology. *Geoadria*, 8(1),17–37. <https://doi.org/10.15291/geoadria.93>

Šestanović, S., Šolić, M., Krstulović, N., Šegvič, D., & Ciglencečki, I. (2005). Vertical structure of microbial community in an eutrophic meromictic saline lake. *Fresenius Environmental Bulletin*,

14(8), 668–675.

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7183– 7192, doi:[10.1029/2000JD900719](https://doi.org/10.1029/2000JD900719).

Teixeira, J. C., Carvalho, A. C., Carvalho, M. J., Luna, T., & Rocha, A. (2014). Sensitivity of the WRF model to the lower boundary in an extreme precipitation event—Madeira island case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2009–2025. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2009-2014>

Teixeira, J.C., Carvalho A.C., Tuccella, P., Curci, G., Rocha, A. (2016). WRF-chem sensitivity to vertical resolution during a saharan dust event, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 94, 188-195, ISSN 1474-7065. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.04.002>.

Telišman Prtenjak, M., Jeričević, A., Kraljević, L., Herceg Bulić, I., Nitis, T., & Bencetić Klaić, Z. (2009). Exploring atmospheric boundary layer characteristics in a severe SO₂ episode in the north-eastern Adriatic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(13), 4467–4483. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4467-2009>

Telišman Prtenjak, M., Jeričević, A., Klaić, Z., Alebić-Juretić, A., & Herceg Bulić, I. (2013). Atmospheric dynamics and elevated ozone concentrations in the northern Adriatic. *Meteorological Application*, 20(4), 482–496. <https://doi.org/10.1002/met.1312>

Toro, A.R., Kvakić, M., Klaić, Z.B., Koračin, D., Morales, S.R.G.E., Leiva, M.A.G., (2019). Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environ. Pollut.* 244, 705–714. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.067>.

Tositti, L., Brattich, E., Cassardo, C., Morozzi, P., Bracci, A., Marinoni, A., Di Sabatino, S., Porcù, F., & Zappi, A. (2022). Development and evolution of an anomalous Asian dust event across Europe in March 2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4047–4073, <https://doi.org/10.5194/acp-22-4047-2022>.

Totti, C., Romagnoli, T., Accoroni, S., Coluccelli, A., Pellegrini, M., Campanelli, A., et al. (2019). Phytoplankton communities in the northwestern Adriatic Sea: Interdecadal variability over a 30-years period (1988–2016) and relationships with meteorological drivers. *Journal of Marine Systems*, 193, 137–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.01.007>

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). (2011). TRMM (TMPA) rainfall estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). <https://doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/3H/7>

Tsarpalis K., Katsafados P., Papadopoulos A., & Mihalopoulos N. (2020) Assessing Desert Dust Indirect Effects on Cloud Microphysics through a Cloud Nucleation Scheme: A Case Study over the Western Mediterranean. *Remote Sensing*, 12(21),3473. <https://doi.org/10.3390/rs12213473>

Varga, G., János Kovács, J., & Újvári, G. (2013). Analysis of Saharan dust intrusions into the Carpathian basin (central Europe) over the period of 1979–2011. *Global and Planetary Change*, 100, 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.007>

Varga, G., János Kovács, J., & Újvári, G. (2014). Spatiotemporal patterns of Saharan dust outbreaks in the Mediterranean Basin. *Aeolian Research*, 15, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.06.005>

Varga, G. (2020). Changing nature of Saharan dust deposition in the Carpathian Basin (central Europe): 40 years of identified North African dust events (1979–2018). *Environment International*, 139, 105712. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105712>

Vincent, J., Laurent, B., Losno, R., Bon Nguyen, E., Rouillet, P., Sauvage, S., et al. (2016). Variability of mineral dust deposition in the western Mediterranean Basin and South-East of France. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 8749–8766. <https://doi.org/10.5194/acp-16-8749-2016>

von Storch, H., & Zwiers, F. (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612336>

Wæhler Turid Austin, Erik Sveberg Dietrichs (2017). The vanishing Aral Sea: health consequences of an environmental disaster. *Tidsskr Nor Legeforen*. doi: 10.4045/tidsskr.17.0597.

Wagener, T., Guieu, C., & Leblond, N. (2010). Effects of dust deposition on iron cycle in the surface Mediterranean Sea: Results from a mesocosm seeding experiment. *Biogeosciences*, 7(11), 3769–3781. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3769-2010>

Wesely, M.L (1989). Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models, *Atmos. Environ.*,41.S52-S63.

Whish-Wilson, P. (2002). The Aral Sea environmental health crisis. *Journal of Rural and Remote Environmental Health* 1, 29–34.

Wu, C., Lin, Z., & Liu, X. (2020). The global dust cycle and uncertainty in CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 10401–10425. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10401-2020>

Yu, H., Chin, M., Yuan, T., Bian, H., Remer, L. A., Prospero, J. M., et al. (2015). The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations. *Geophysical Research Letters*,

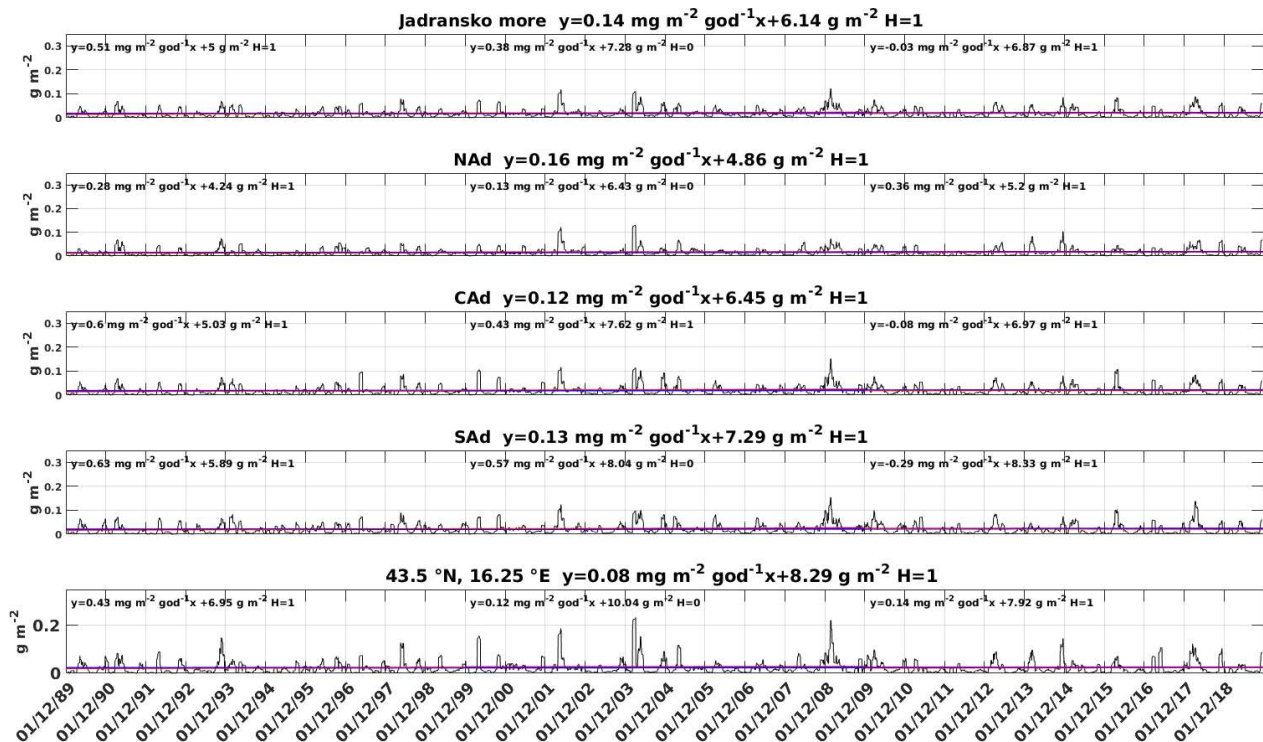
42, 1984–1991. <https://doi.org/10.1002/2015gl063040>

Zaveri, R. A., R. C. Easter, J. D. Fast, and L. K. Peters (2008). Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry (MOSAIC), *J. Geophys. Res.*, 113, D13204, doi: 10.1029/2007JD008782.

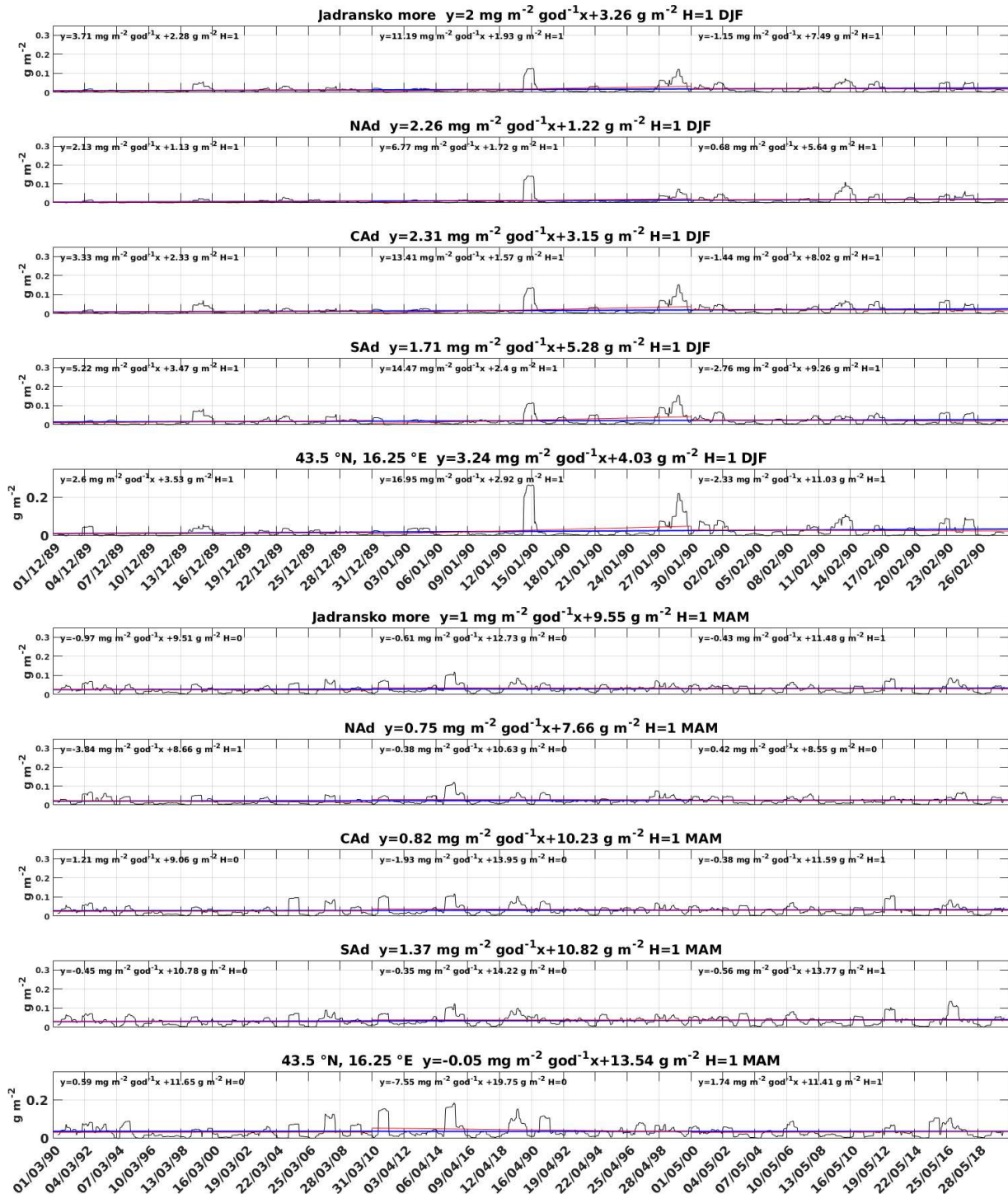
Zhang, J., Spurr, R. J. D., Reid, J. S., Xian, P., Colarco, P. R., Campbell, J. R., Hyer, E. J., and Baker, N. L. (2021). Development of an Ozone Monitoring Instrument (OMI) aerosol index (AI) data assimilation scheme for aerosol modeling over bright surfaces – a step toward direct radiance assimilation in the UV spectrum, *Geosci. Model Dev.*, 14, 27–42, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-27-2021>.

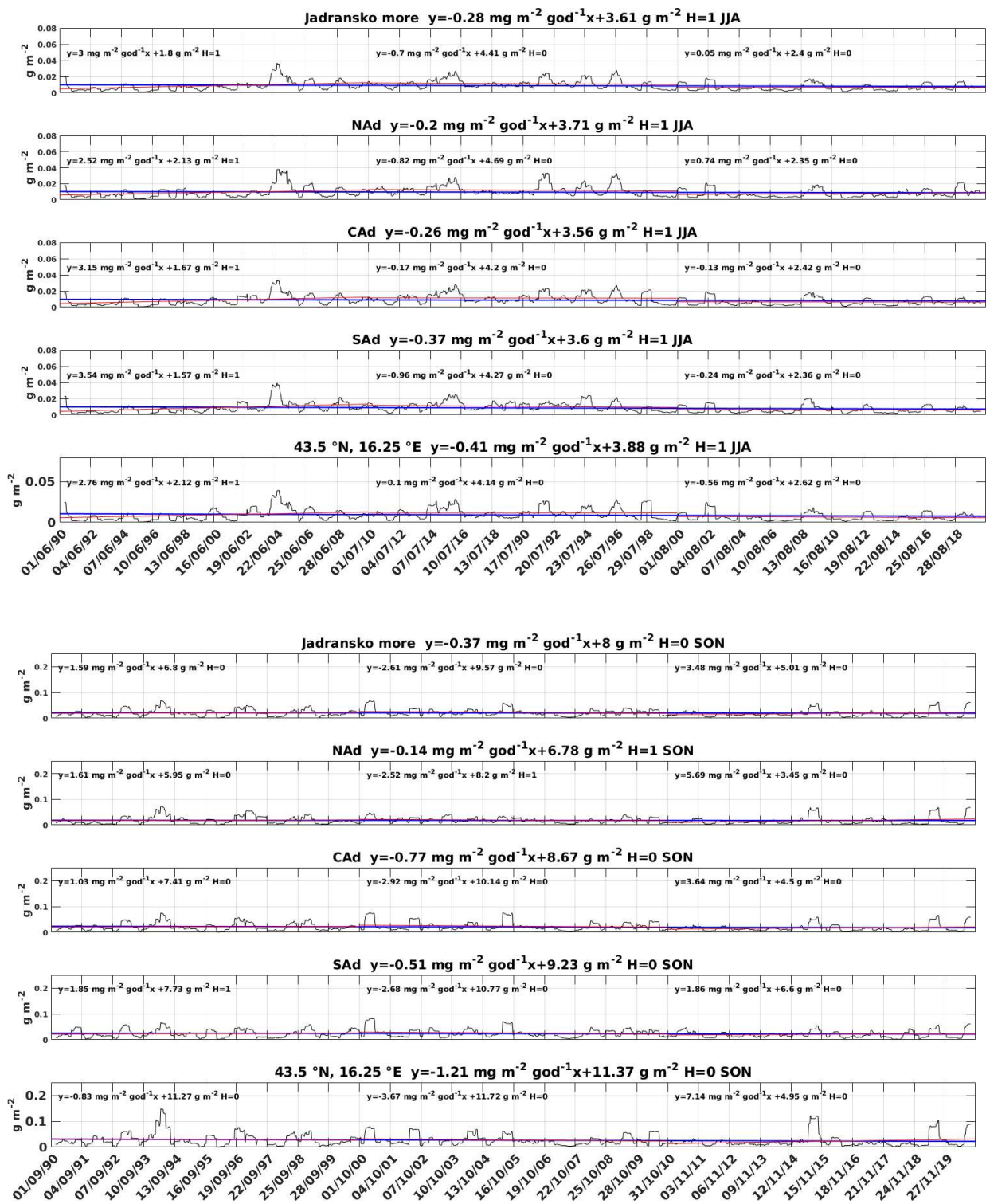
Dodatak A – Trendovi

Za prostorno usrednjeni 30-godišnji vremenski niz ukupnog taloženja prašine (DEP) izračunat je trend za područje Jadrana (Slika A1). Trend je također dobiven za određena desetljeća i četiri godišnja doba (zimu (DJF), proljeće (MAM), ljeto (JJA) i jesen (SON)). Značajnost trendova procijenjena je Mann-Kendallovim testom na nivou značajnosti 95%. Trend za područje Jadrana je pozitivan, te iznosi $0.14 \text{ mg m}^{-2} \text{ god}^{-1}$ (najveći je u sjevernom dijelu Jadrana, NAd-u, a najmanji u središnjem dijelu, CAd-u). Na Rogozničkom jezeru trend ima niže vrijednosti od onih u južnom dijelu Jadrana. Tijekom prvog desetljeća (1989.–1999.) trend ima najveće vrijednosti koje dosežu $0.63 \text{ mg m}^{-2} \text{ god}^{-1}$ u južnom dijelu Jadrana (SAd-u), a najnižu vrijednost u sjevernom (NAd; $0.28 \text{ mg m}^{-2} \text{ god}^{-1}$). Tijekom drugog desetljeća (1999.–2009.) trend nije značajan osim u središnjem (CAd-u), dok je u trećem desetljeću predznak trenda pozitivan u sjevernom (NAd-u) i Rogozničkom jezeru, a u južnom dijelu Jadrana je negativan (SAd), te blizu nule u središnjem (CAd) i cijelom Jadranskom moru. Promatrajući godišnja doba, ukupno najizraženiji pozitivni trend u Jadranskom moru je tijekom zime (DJF), zatim slijedi proljetna sezona (MAM), dok je negativan tijekom ljetne (JJA) te nije statistički značajan tijekom jesenske sezone (SON). Ovi rezultati su izrazito varijabilni za različite dijelove Jadrana i razna desetljeća (Slike A2, A3).

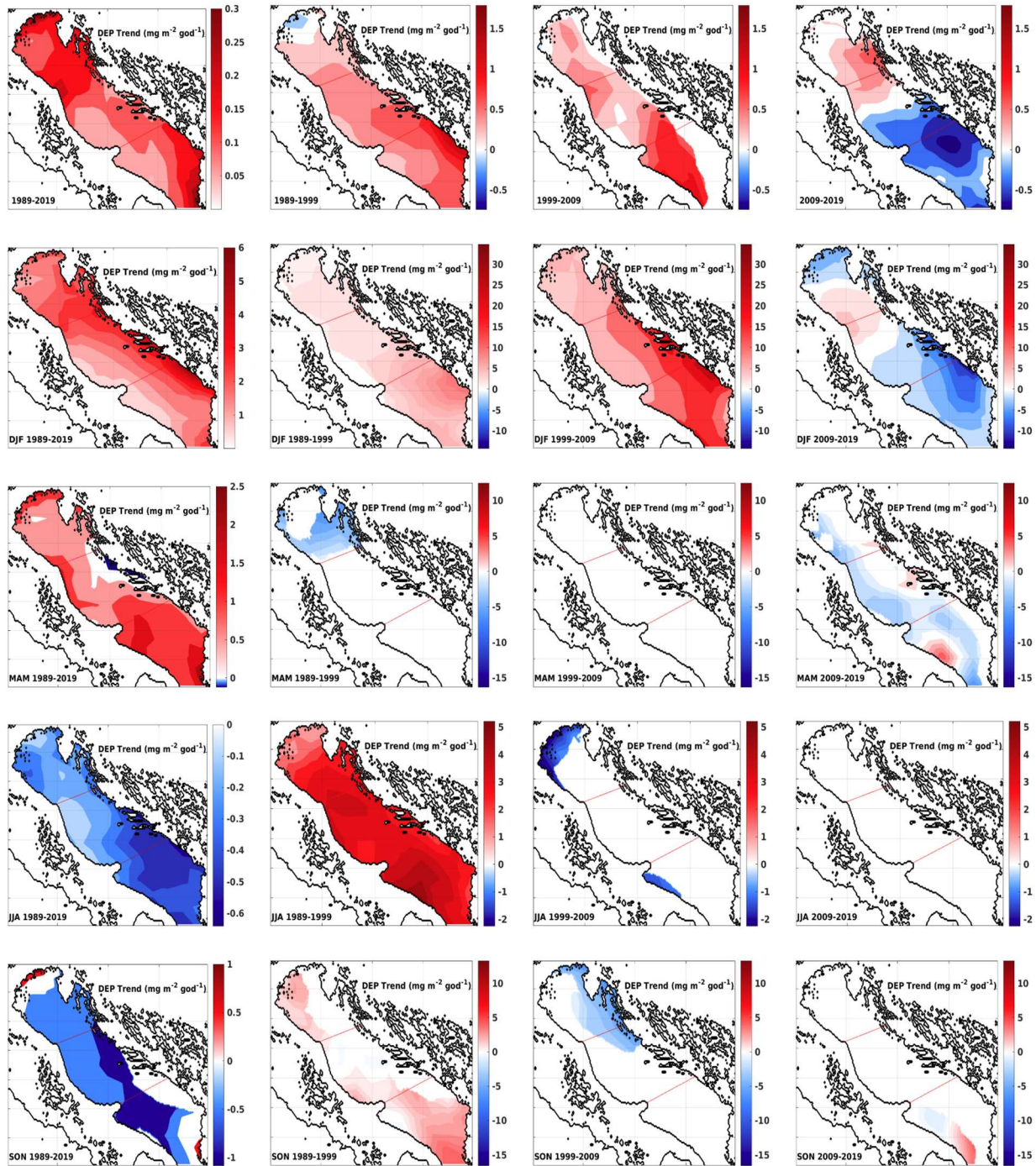


Slika A1. Vremenski nizovi i trendovi taloženja prašine. Crna linija: 30-dnevni pomični srednjak za prostorno usrednjeni vremenski niz, plava linija: 30-godišnji trend, crvene linije: trendovi za desetljeća. Naslov sadrži 30-godišnju vrijednost trenda, a za desetljeća su jednadžbe trenda iznad crvenih linija. Mann-Kendallov test je značajan na 95 % kada je označen s H=1.



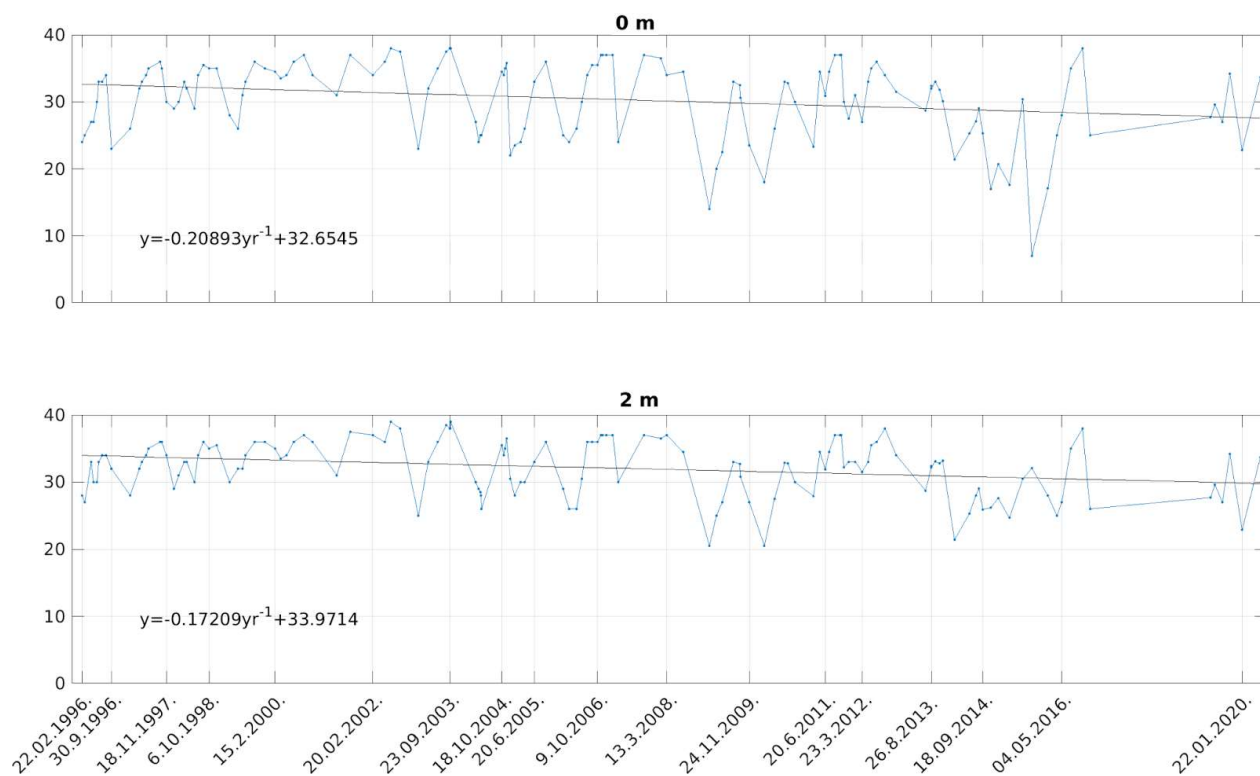


Slika A2. Vremenski nizovi taloženja prašine i trendovi za različita godišnja doba. Dijagrami su označeni kao jedan na slici SA1.



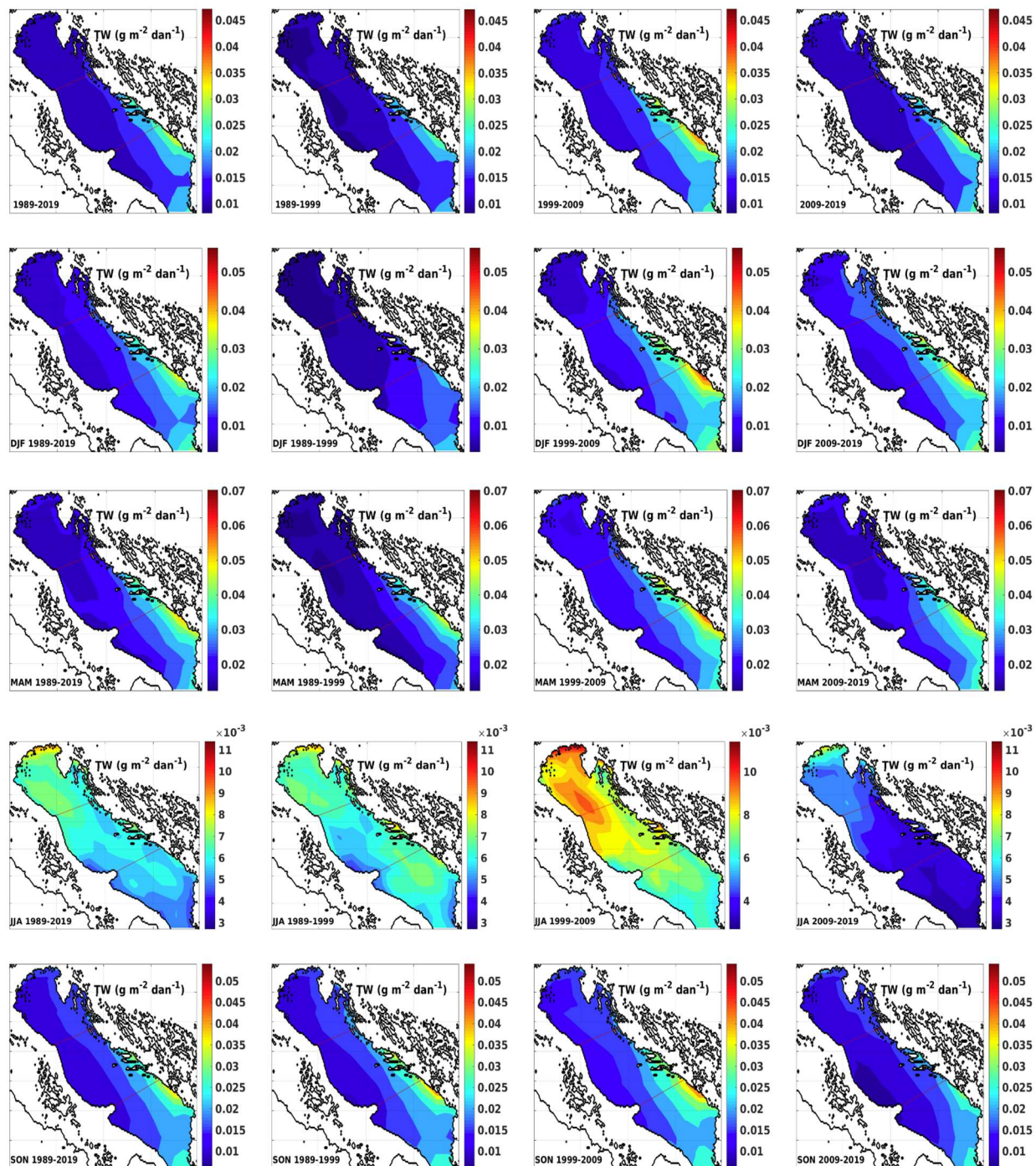
Slika A3. Prostorna raspodjela koeficijenata linearnog trenda taloženja prašine ($\text{mg m}^{-2} \text{god}^{-1}$) u Jadranskom moru. Prvi stupac je za razdoblje 1989.–2019., a drugi za tri desetljeća (1989.–1999.; 1999.–2009.; 2009.–2019.; detalje vidi u tekstu). Prvi red odgovara cijelom istraživanom razdoblju (1989.–2019.), a ostali redovi godišnjim sezonama (zimskoj (DJF), proljetnoj (MAM), ljetnoj

(JJA) i jesenskoj (SON)). Točke s trendovima koji nisu značajni prema Mann-Kendallovom testu pri razini značajnosti 95 % postavljeni su na 0.

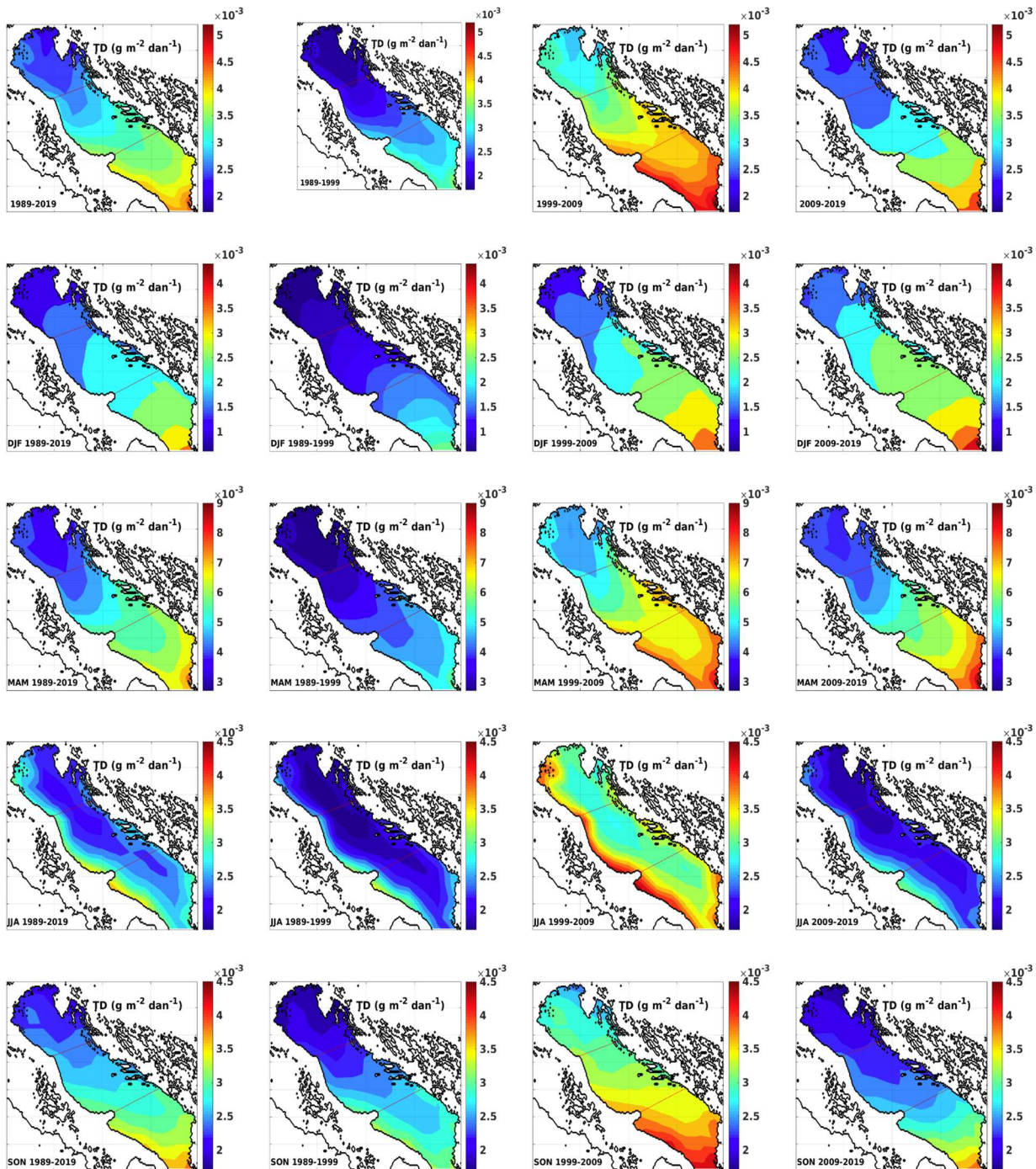


Slika A4. Salinitet i trend za razdoblje 1996. do 2020. uočen u površinskim slojevima Rogozničkog jezera.

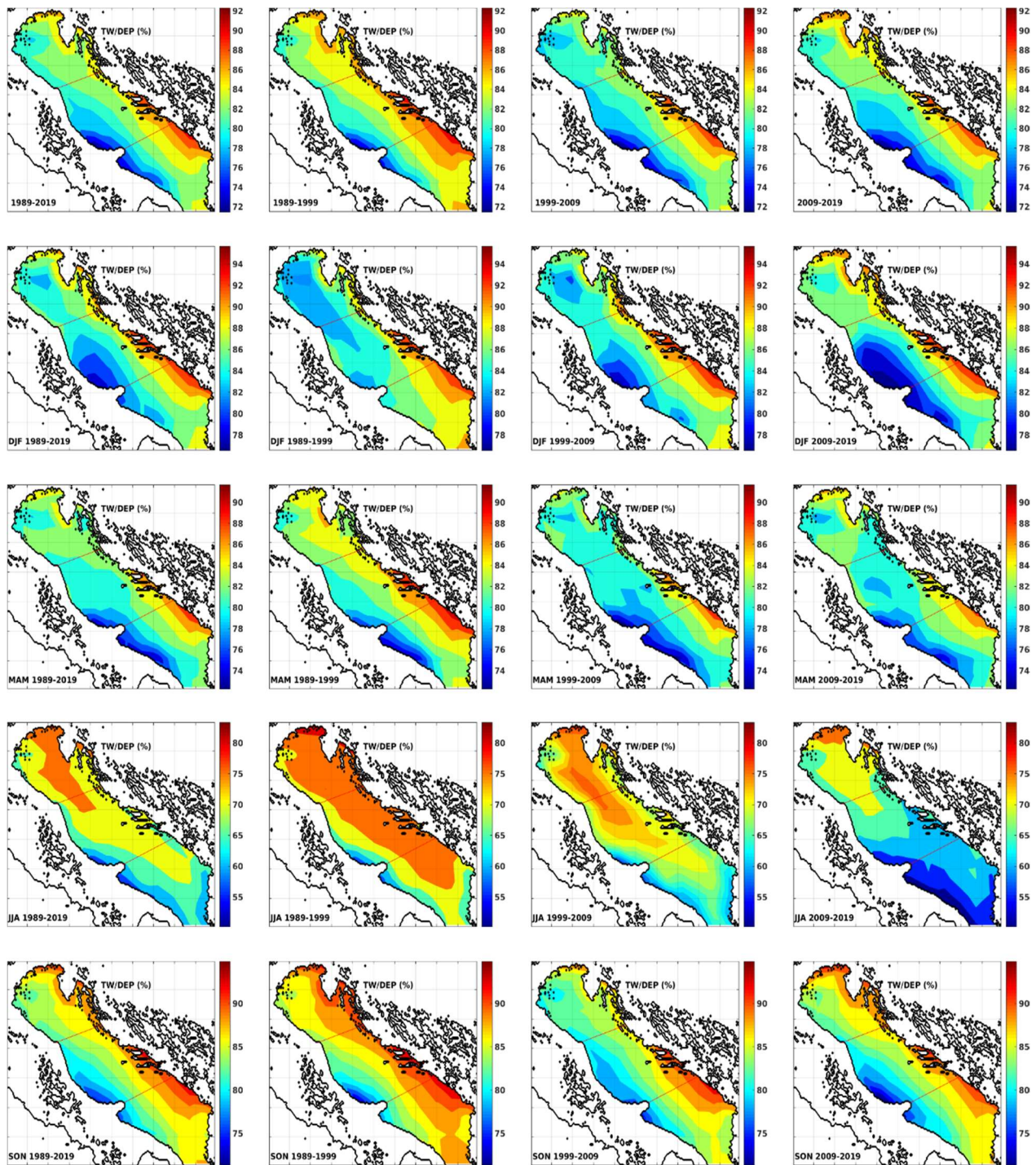
Dodatak B – Prostorna razdioba taloženja prašine



Slika B1. Prosječno ukupno mokro taloženja prašine (TW) u Jadranskom moru. Prvi stupac je za razdoblje 1989–2019, a ostali za tri desetljeća (1989.–1999.; 1999.–2009.; 2009.–2019.; detalje vidi u tekstu). Prvi red odgovara cijelom istraživanom razdoblju (1989.–2019.), a ostali redovi godišnjim sezonama (zimskoj (DJF), proljetnoj (MAM), ljetnoj (JJA) i jesenskoj (SON)).

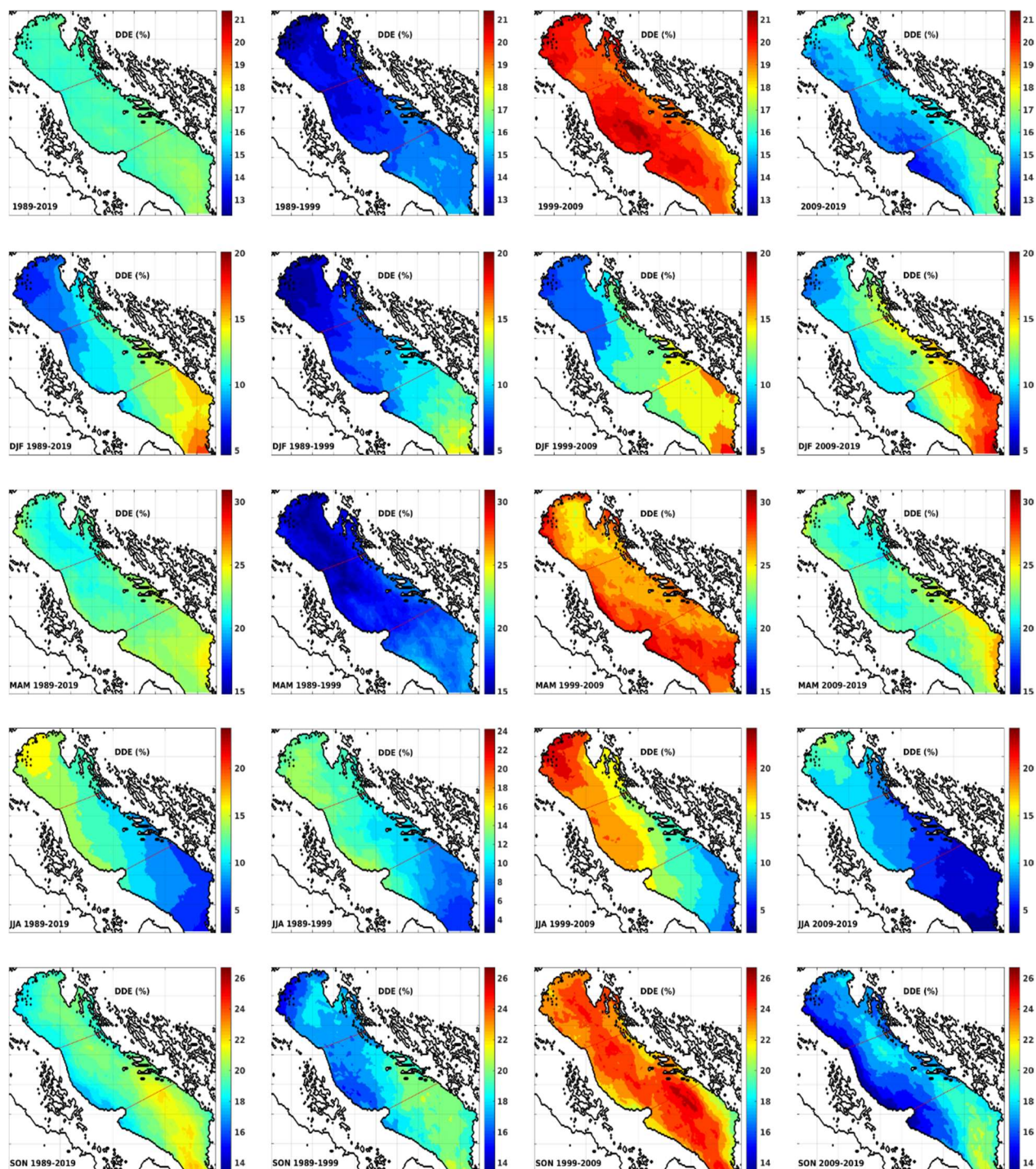


Slika B2. Prosječno ukupno suho taloženje prašine (TD) u Jadranskom moru. Slike su organizirane kao na SB1.



Slika B3. Doprinos ukupnog mokrog taloženja (TW) ukupnom taloženju prašine (DEP) u Jadranskom moru. Slike su organizirane kao na B1.

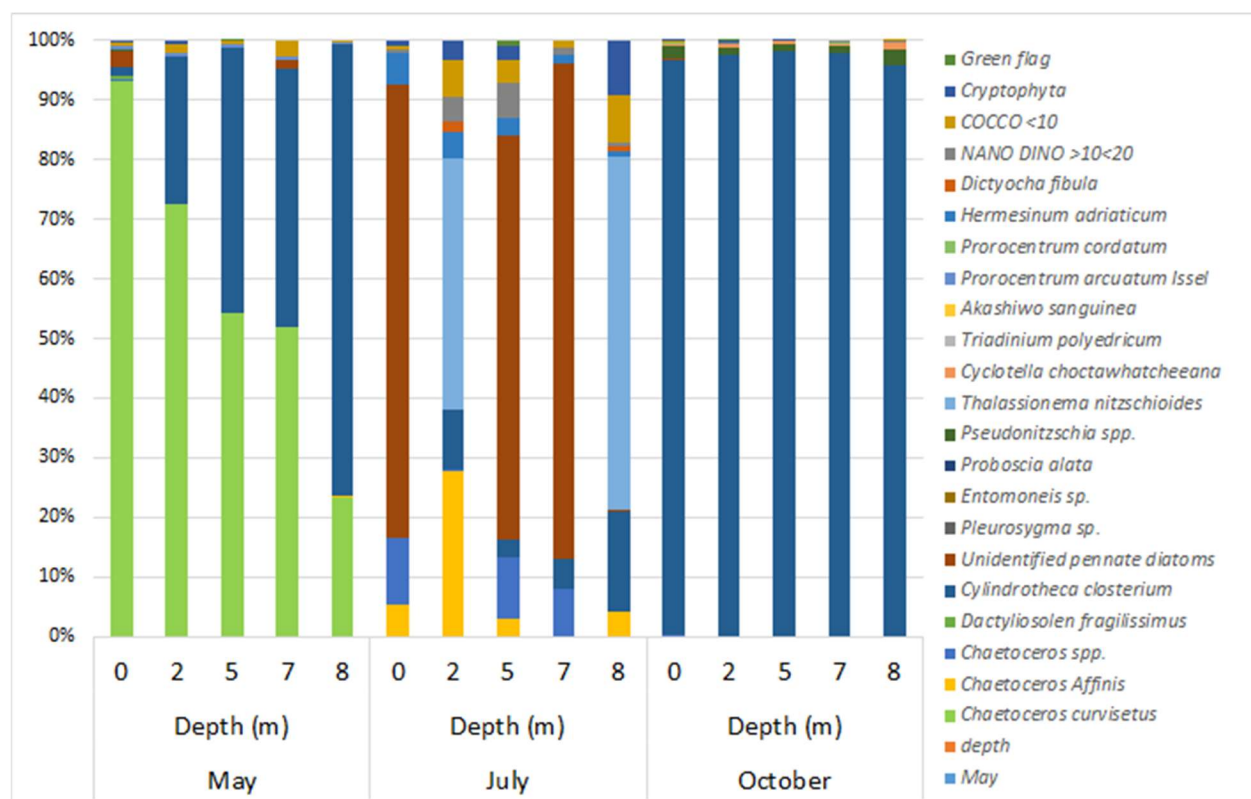
Dodatak C – Prostorna razdioba događaja taloženja prašine



Slika C1. Prostorna razdioba postotnog udjela epizoda taloženja prašine (DDE) u Jadranskom moru. Prvi stupac je za razdoblje 1989–2019, a drugi za desetljeća (1989.–1999.; 1999.–2009.; 2009.–2019.; detalje vidi u tekstu). Prvi red odgovara cijelom istraživanom razdoblju (1989.–

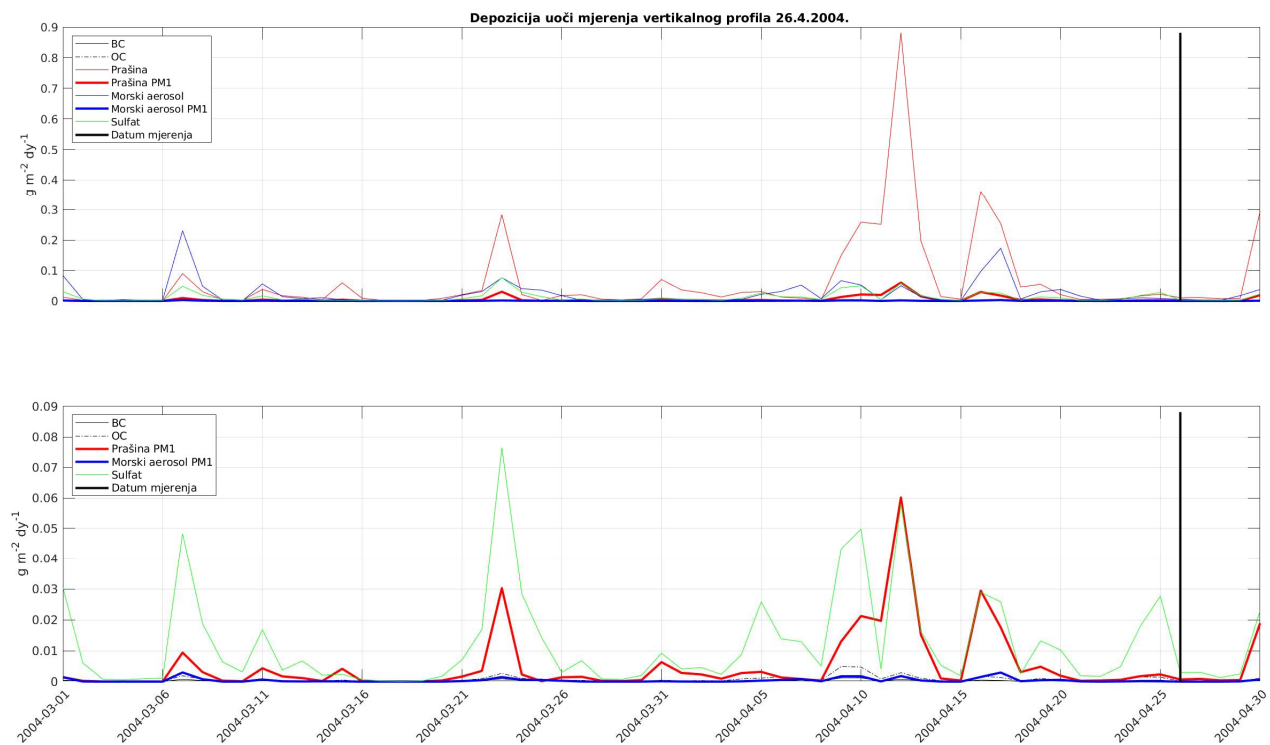
2019.), a ostali redovi godišnjim sezonama (zimskoj (DJF), proljetnoj (MAM), ljetnoj (JJA) i jesenskoj (SON)).

Dodatak D – Sastav mikrofitoplanktona Rogozničkog jezera

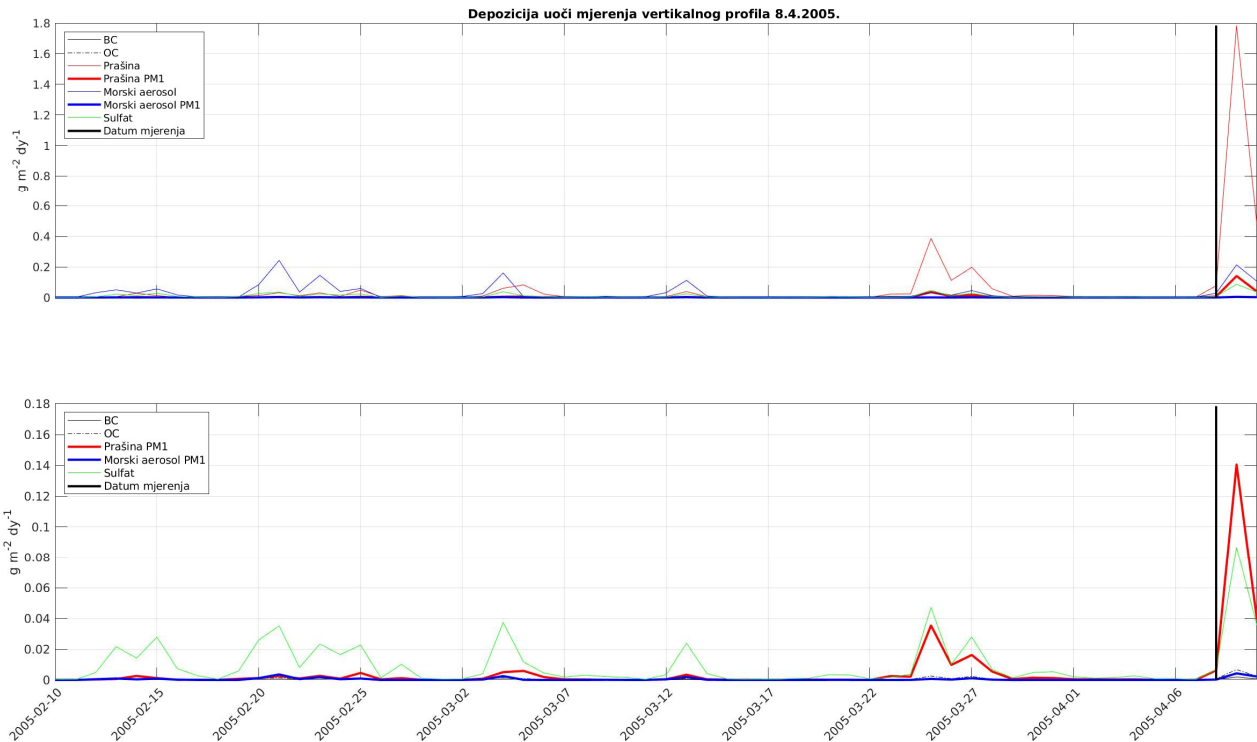


Slika D1. Sastav mikrofitoplanktona u vodenom vodeni stupcu Rogozničkog jezera u kasno proljeće, ljeto i jesen 2019. (analizirala i ustupila dr. Z. Ljubešić, u okviru projekta MARRES, IP-2018-01-1717).

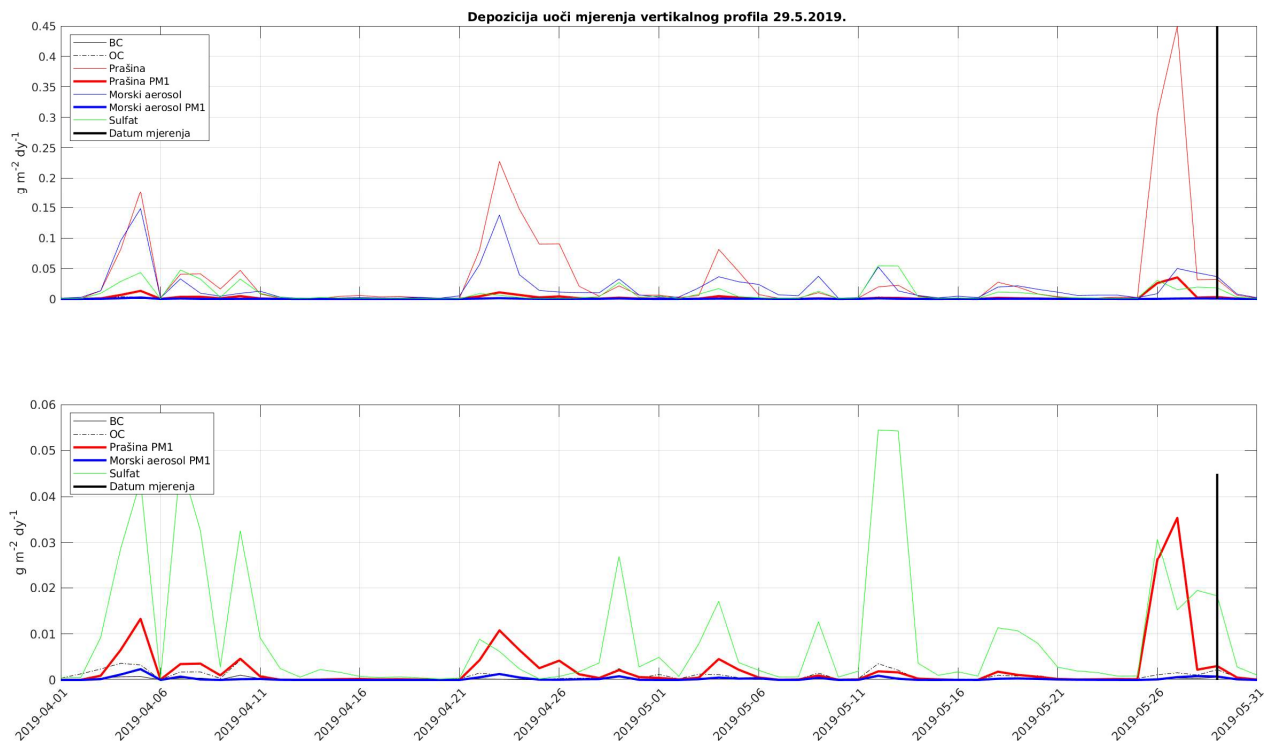
Dodatak E – Vremenski nizovi taloženja lebdećih čestica iz reanalize MERRA-2 u blizini Rogozničkog jezera



Slika E1. Taloženje lebdećih čestica iz reanalize MERRA-2 prije mjerenja vertikalnog profila zasićenja kisikom u Rogozničkom jezeru 26.4.2004. Gornja podslika je za ukupno taloženje, a donja za taloženje PM₁ (BC, OC i sulfat su u jednom veličinskom razredu, dok su prašina i morska sol u 5). Okomita crna crta pokazuje na datum mjerenja vertikalnog profila.



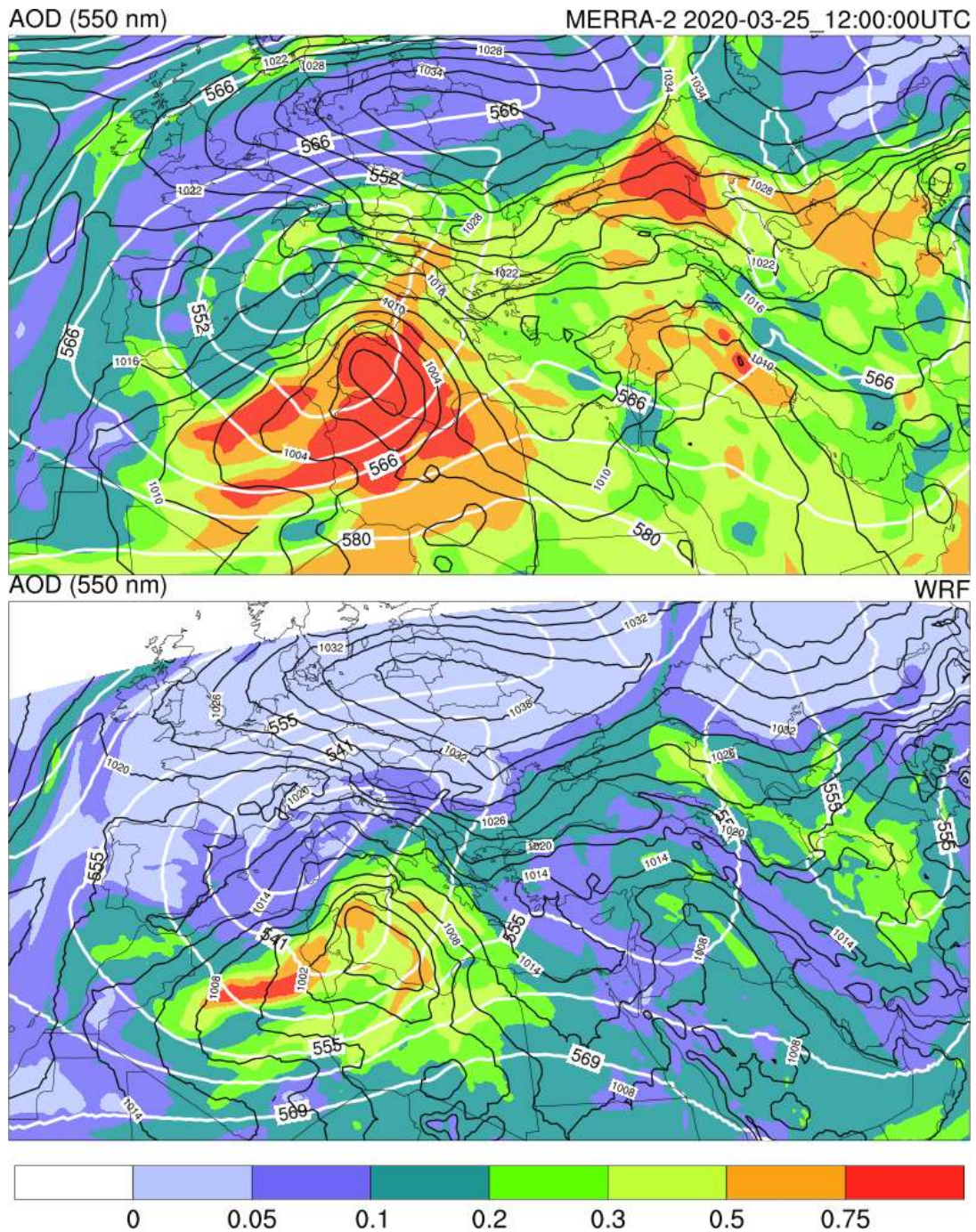
Slika E2. Taloženje lebdećih čestica iz reanalize MERRA-2 prije mjerenja vertikalnog profila zasićenja kisikom u Rogozničkom jezeru 8.4.2005. Objašnjenje dijagrama je isto kao za sliku E1.



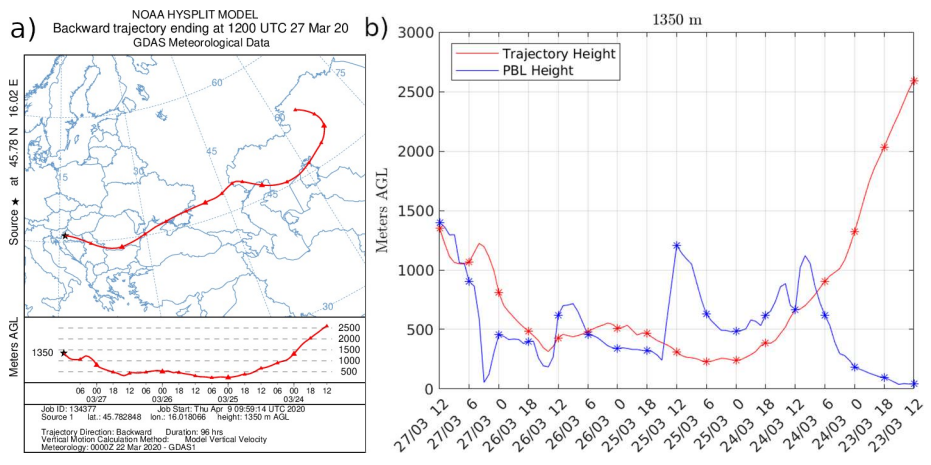
Slika E3. Taloženje lebdećih čestica iz reanalize MERRA-2 prije mjerenja vertikalnog profila zasićenja kisikom u Rogozničkom jezeru 29.5.2019. Objašnjenje dijagrama je isto kao za sliku E1.

Dodatak F – Analiza epizode donosa prašine iz ožujka 2020.

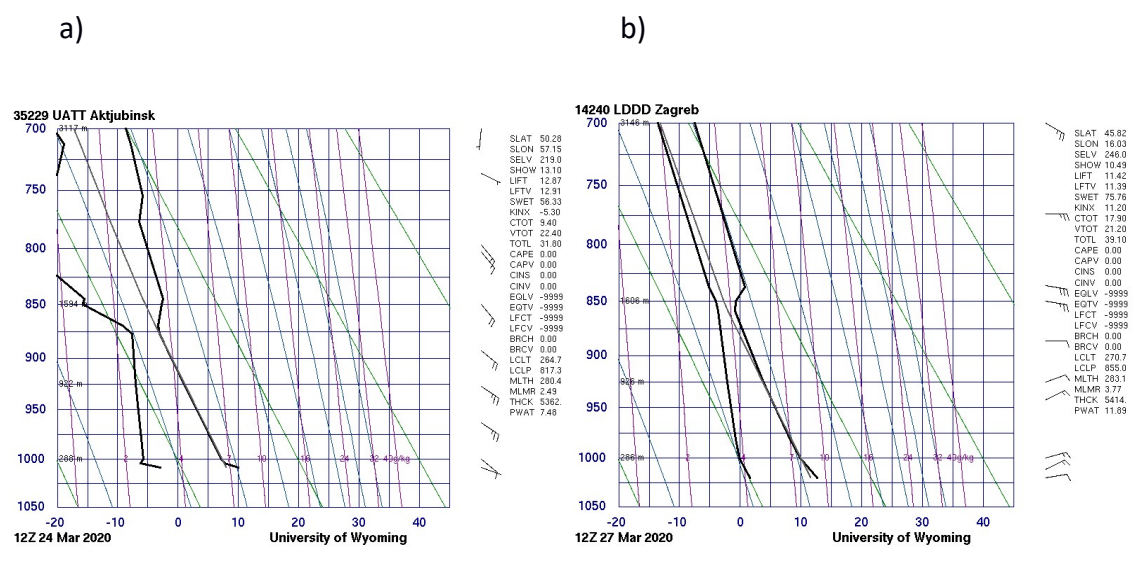
Popratne informacije u ovom dodatku sadrže slike koje prikazuju dodatne informacije u vezi s objašnjenjem pristranosti modela u odnosu na mjerene vrijednosti PM_{10} u Hrvatskoj. Slika G1 prikazuje podcjenjivanje AOD-a u trenutku emisije prašine, a slika G2 pokazuje kako je putanja unazad HYSPLIT iz područja pustinje Aral bila unutar PBL-a. Procjena visine atmosferskog graničnog sloja iz HYSPLIT-a u skladu je radiosondažnim mjerenjima u Zagrebu i Akjutbinsku (Slika SA3).



Slika F1. Geopotencijal na 500 hPa, tlak na razini mora i AOD na 550 nm tijekom približnog vremena emisije prašine u pustinji Aral: (a) reanaliza MERRA-2 i (b) numerički model WRF-Chem.

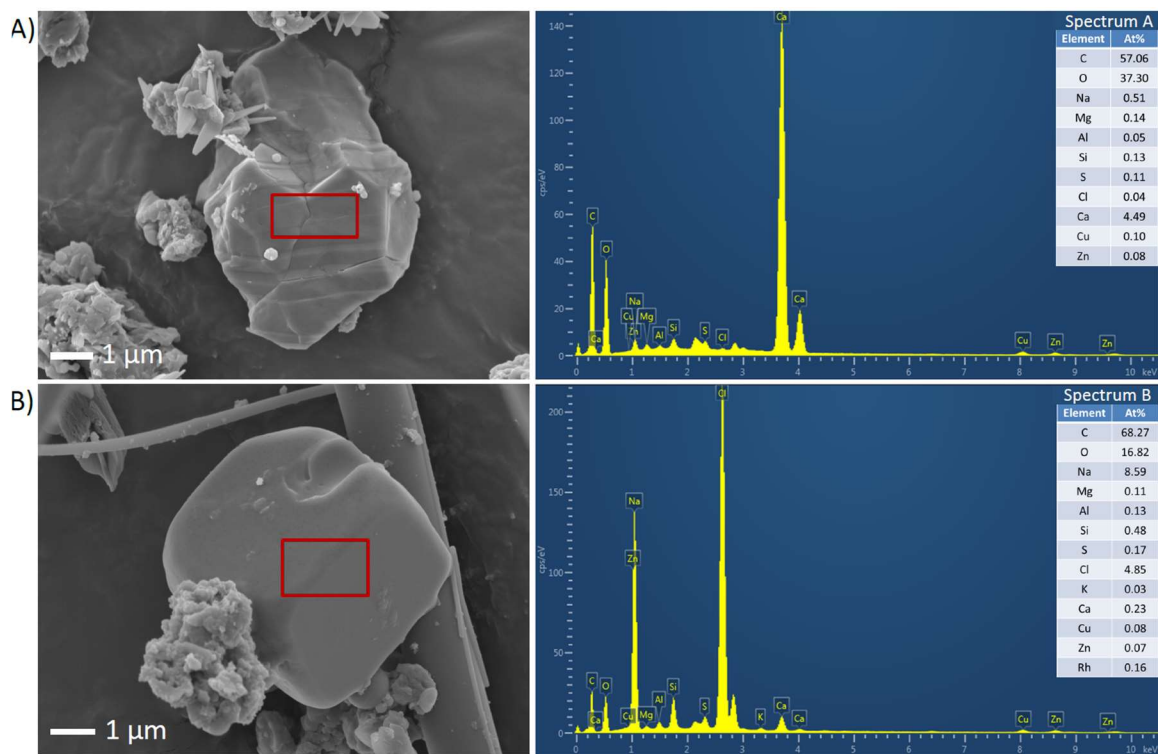


Slika F2. Putanja iz modela HYSPLIT koja završava na 1350 m iznad površine tla u Zagrebu: (a) na karti, (b) visina putanje i visina atmosferskog graničnog sloja duž putanje.



Slika F3. Vertikalni profili iz radiosondažnih mjerenja, (a) u Akjutbinsku 24.3.2020. u 12 UTC predstavlja šire područje Arala tijekom emisije prašine, i (b) u Zagrebu 27.3.2020. tijekom epizode donosa prašine. Slike su preuzete s <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Dodatak G – Rezultati dobiveni skenirajućim elektronskim mikroskopom



Slika G1. SEM (lijevo) i EDX spektri (desno) filtra na kojem je uzorkovano PM₁₀ tijekom epizode intenzivnog donosa prašine u ožujku 2020. ukazuju na prisutnost (E) kalcita i (D) natrijevog klorida.

Životopis

Boris Mifka rođen je 24.9.1983. u Rijeci. Srednjoškolsko obrazovanje završio je u Sušačkoj gimnaziji 2001., a diplomski studij geofizike, smjer meteorologije i oceanografije završava na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 2011. godine. Nakon studija radio je na Zavodu za javno zdravstvo od 2013. do 2018. godine. Potom se zapošljava na Fakultetu za Fiziku Sveučilišta u Rijeci gdje trenutno radi kao asistent. Doktorski studij geofizike na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2015. godine. Član je Hrvatskog meteorološkog društva i Hrvatskog agrometeorološkog društva. Tijekom studija dobiva nekoliko nagrada i priznanja:

- 2022. nagrada za najbolji znanstveni rad mladih znanstvenika na Fakultetu za Fiziku, Sveučilište u Rijeci
- 2020. priznanje za najbolje postersko priopćenje na 4. Simpoziju studenata doktorskih studija PMF-a
- 2017. vodio je izgradnju vagaonice i uz pohvalu sudjelovao u akreditaciji ispitne metode za određivanje masenih koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$ frakcija lebdećih čestica na Nastavnom Zavodu za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije
- 2017. kao NSF stipendist boravio je 3 mjeseca na institutu National Center for Atmospheric Research (NCAR)

Od 2018. sudjeluje u nastavi kao asistent na kolegijima koji se održavaju na sastavnicama Sveučilišta u Rijeci. Na Fakultetu za fiziku bio je asistent na kolegijima: Fizika mora, Fizika atmosfere, Interakcija mora i atmosfere i utjecaj na oceanografska svojstva, na Medicinskom fakultetu sudjeluje na kolegijima: Fizika i biofizika, Medicinska fizika i biofizika, Biofizika, a na Tehničkom fakultetu je vodio vježbe iz kolegija Fizika 2.

Organizirao je Radionicu numeričkog modeliranja na Fakultetu za fiziku Sveučilišta u Rijeci u suradnji s dr. sc. Vladimirom Đurđevićem (Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu) u periodu 3.-7.10.2022.

Tijekom studiranja i rada bio je suradnik na nekoliko projekata:

- Ecological Management of traffic in coastal areas by using an intelligent system – ECOMOBILITY, INTERREG ITA-CRO project, siječanj 2018. – srpanj 2019.
- HRZZ projekt "Rogozničko morsko jezero kao model odziva ekosustava na promjene u okolišu" (IP-2018-01-1717, MARRES) (voditeljica dr. sc. Irena Ciglencečki-Jušić), 2019–2022.
- Pollution Monitoring of Ship Emissions : An Integrate Approach for Harbours of the Adriatic Basin – POSEIDON, MED project, lipanj 2014. – svibanj 2015.
- Short-Term Scientific Mission of COST Action ES 1106: Validation and improvement of local meteorological simulations to define critical areas for agricultural production at mid-Adriatic islands, siječanj 2014.
- Short-Term Scientific Mission of COST Action ES 1106: Local meteorological simulation to defined critical area for agricultural production

Sudjelovao je na radionicama:

- Radionica numeričkog modeliranja, Fakultet za fiziku, Sveučilište u Rijeci, Rijeka (3.–7.10. 2022.)
- VIII Summer School 2022 Atmospheric Composition & Meteorology, CNR ISAC, Lecce (20.–24.6.2022.)
- Radionica numeričkog modeliranja, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb (17.–20.9. 2019.)
- Radionica numeričkog modeliranja, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb (08.–10.5. 2019.)
- Air Quality Modelling: WRF-Chem Workshop, Istanbul Technical University Meteorological Engineering Department, Istanbul (3.–4.5.2018.)
- Course on Air Quality modelling, Joint Research Center, Ispra, Lago Maggiore (3.–5.10.2017.)
- WRF Basic and WRF-Chem Tutorials, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado (30.1.–3.2.2017.)

- Course on the Atmospheric Boundary Layer Integrating Air Chemistry and Land Interactions, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb (26.–28.9.2016.)
- Summer School of PANDA Project: Remote Sensing of the Atmosphere, Emissions and Modeling, Bremen (23.–29.8.2015.)
- ETH Urban Physics Winter School, Ascona, (25.–30.1.2015.)
- Dailymeteo.org workshop/conference: Spatial and spatio-temporal modelling of meteorological and climatic variables using Open Source software (R+OSGeo), Beograd (23.–27.6.2014.)

Popis do sada objavljenih znanstvenih radova

Mifka B., Telišman Prtenjak M., Kavre Piltaver I., Mekterović D., Kuzmić J., Marcijuš M., Ciglenečki I. (2023). Intense desert dust event in the northern Adriatic (March 2020); insights from the numerical model application and chemical characterization results. *Earth and Space Science*. DOI.10.1029/2023EA002879

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kuzmić, J., Čanković, M., Mateša, S. & Ciglenečki, I. (2022) Climatology of dust deposition in the Adriatic Sea; a possible impact on marine production. *Journal of geophysical research. Atmospheres*, 127 (7), e2021JD035783, 26 <https://doi:10.1029/2021JD035783>

Alebić-Juretić, A. & **Mifka, B.** (2022) Sources of airborne particulates (PM10) in the port city of Rijeka, Croatia. *Environmental science and pollution research*, 29, 6578-6590. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15629-0>

Mifka, B., Žurga, P., Kontošić, D., Odorčić, D., Mezlar, M., Merico, E., Grasso, M., Conte, M., Contini, D. & Alebić-Juretić, A. (2021) Characterization of airborne particulate fractions from the port city of Rijeka, Croatia. *Marine pollution bulletin*, 166, 112236, 13 [doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112236](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112236)

Cesari D., Merico E., Dinoi, A., Gambaro A., Morabito E., Gregorois E., Barbaro, E., Feltracco M., Alebić-Juretić Ana., Odorčić D., Kontošić D., **Mifka, B.**, Contini, D. (2020). An inter-comparison of size segregated carbonaceous aerosol collected by low-volume impactor in the port-cities of Venice (Italy) and Rijeka (Croatia). *Atmospheric Pollution Research*, 11 (10), 1705-1714 doi:10.1016/j.apr.2020.06.027

Merico, E., Conte, M., Grasso, F., Cesari, D., Gambaro, A., Morabito, E., Gregoris, Elena, Orlando, Salvatore, Alebić-Juretić, A., Zubak, V., **Mifka, B.** & Contini, D. (2020) Comparison of the impact of ships to size- segregated particle concentrations in two harbour cities of northern Adriatic Sea. *Environmental pollution*, 266, 115175, 10 doi:10.1016/j.envpol.2020.115175

Merico E., Gambaro A., Argiriou A., Alebić-Juretić Ana., Barbaro E., Cesari D., Chasapidis L., Dimopoulos S., Dinoi A., Donateo A., Giannaros C., Gregoris E., Karagiannidis Athanasios F., Konstandopoulos A.G., Ivošević T., Liora N., Melas D., **Mifka B.**, Orlić I., Poupkou A., Šarović K., Tsakis A., Giua R., Pastore T., Nocioni A., Contini D. (2017). Atmospheric impact of ship traffic in four Adriatic-Ionian port-cities: comparison and harmonization of different approaches. *Transportation research part d-transport and environment*, 50 (2017), 431-445 doi:10.1016/j.trd.2016.11.016

Alebić-Juretić, A. & **Mifka, B.** (2017). Secondary Sulphur and Nitrogen Species in PM10 from the Rijeka Bay Area (Croatia). *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 98 (1), 133-140 doi:10.1007/s00128-016-1981-6

Mifka, B., Vučetić, V. (2011). Vremenska analiza za vrijeme velikog šumskog požara na otoku Braču od 14. do 17.7.2011. *Vatrogastvo i upravljanje požarima*, 1 (2012), 3; 13-25

Znanstveni radovi u postupku recenzije

Supić N., Budiša A., Ciglencečki I., Čanković M., Dautović J., Djakovac T., Dunić N., Dutour-Sikirić M., Ivančić I., Kalac M., Kraus R., Kužat N., Lučić D., Marić Pfannkuchen D., **Mifka B.**,

Mihanović H., Njire J., Paliaga P., Pasarić M., Pasarić Z., Simonović N., Telišman Prtenjak M., Vilibić I. (2022). Are winter conditions impacting annual organic production in the northern Adriatic? Verifications and future projections. *Progress in Oceanography*, u recenziji (Q1, IF=4.416).

Alebic-Juretic, Ana and **Mifka, Boris** and Kuzmić, Josipa, Airborne Desert Dust in the Northern Adriatic Area (Croatia): Different Sources. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4469488> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4469488>

Vidović K., Hočevar S., Grgić I., Metarpi D., Dominović I., **Mifka B.**, Gregorič, A., Alfoldy B., Ciglenečki I. (2023). "Bromine and Surface-Active Substances Uncover a New Mechanism of Coastal New Particle Formation" (reference number: NGS-2023-06-01063), which was recently submitted to Nature Geoscience.

Sažeci sa skupova

B. Mifka, M. Telišman Prtenjak, I. Kavre Piltaver, D. Mekterović, J. Kuzmić, M. Marciuš, I. Ciglenečki (2023). WRF-Chem simulations and analysis of the exceptional desert dust event in the northern Adriatic (March 2020)

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kavre Piltaver, I., Mekterović, D., Kuzmić, J., Marciuš, M., Ciglenečki, I (2022). The aspects of numerical simulations on desert dust outbreaks over the Adriatic Sea; influence of Asian and African deserts. HARMO 21, 21st International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, PROCEEDINGS / Trini-Castelli, S.; Miranda, Ana I., Augusto, B., Ferreira, J. (ur.). Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, 2022. str. 129-130 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kuzmić, J., Čanković, M., Mateša, S. & Ciglenečki, I. (2022) Dust deposition climatology of the Adriatic Sea and its possible effect on the marine production. U: ECSA-59: Using the best scientific knowledge for the sustainable management of estuaries and coastal seas.

Mifka B., Telišman Prtenjak M., Kuzmić J., Čanković M., Mateša S., Ciglenečki I. (2022). Dust deposition in the Adriatic Sea; climatology and possible impact on marine production. Meteorološki izazovi 8. Kratki sažetci Hrvatska, str. 50-50 (poster, recenziran, sažetak, znanstveni)

Mifka B., Telišman Prtenjak M., Kavre Piltaver I., Mekterović D., Kuzmić J., Marciuš M., Ciglenečki I (2022). Numerical simulations of desert dust episodes in the northern Adriatic; impact of Asian and African sources. Meteorološki izazovi 8: kratki sažetci, Zagreb, Hrvatska, str. 12-12 (predavanje, recenziran, sažetak, znanstveni)

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kuzmić, J., Čanković, M., Mateša, S., Ciglenečki, I. (2022). Dust deposition climatology of the Adriatic Sea and its possible effect on the marine production. ECSA-59: Using the best scientific knowledge for the sustainable management of estuaries and coastal seas San Sebastian, Španjolska (poster, neobjavljeni rad, znanstveni)

Mifka, B., Ciglenečki, I., Telišman Prtenjak, M. (2021). Climatology of dust deposition in the Adriatic Sea and biological response of Rogoznica Lake (central Adriatic). EGU General Assembly 2021 : EGU 21 Beč, Austrija (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Mifka, B.; Ciglenečki, I., Telišman Prtenjak, M. (2020). Climatology of desert dust deposition in the Adriatic area (Rogoznica Lake). Conference: 9. Simpozij KOPAČKI RIT JUČER, DANAS, SUTRA 2020. s međunarodnim sudjelovanjem Kopački rit, Hrvatska. doi:10.13140/RG.2.2.28095.12964 (poster, neobjavljeni rad, znanstveni)

Ciglenečki, I., Simonović, N., Dutour Sikirić, M., Cvitešić Kušan, A., **Mifka, B.**, Telišman Prtenjak, M., Marguš, M., Čanković, M. (2020). Utjecaj klimatskih faktora na koncentracije organskog ugljika u Rogozničkom jezeru (dugoročno istraživanje: 1994.–2020.). International Conference 18th Ružička days "Today science – Tomorrow industry" / Jukić, A., Očelić Bulatović,

V., Kučić Grgić, D. (ur.). Zagreb i Osijek: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa (HDKI) i Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, str. 140-140 (predavanje, sažetak, znanstveni)

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M. (2020). Saharan dust emission processes during dust outbreak on North Adriatic. Meteorološki izazovi 7, Zagreb, Hrvatska, str. 1-1 (predavanje, domaća recenzija, sažetak, znanstveni)

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M. (2019). Convective dust storms during Saharan dust outbreak on Northern Adriatic. European Conference on Severe Storms, Krakow, Poljska, 2019. (poster, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, ostalo)

Vučetić, V., Čavlina Tomašević, I., **Mifka, B.** (2019). Low level jet and wildfire warning in Croatia. Conference Proceedings: 6th International Fire Behavior and Fuels Conference. Zimmerman, T., Slijepcevic, A., Ganteaume, A. (ur.). Albuquerque, Marseille, Sydney: International Association of Wildland Fire, str. 73-76. (<https://www.bib.irb.hr/1125554>) (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

Mifka, B., Alebić-Juretić, A., Barth, M., Džepina, K., Hodžić, A., Kumar, R., Madronich, S., Saide, P., Telišman Prtenjak, M., Wiedinmyer, C. (2018). Wrf-Chem simulations of Saharan dust outbreak episode at North Adriatic. Air Quality Modelling : WRF-Chem Workshop : abstracts, Istanbul, Turska, 1630, 1 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Mifka, Boris; Alebić-Juretić, A. (2016). Source apportionment using PMF receptor model of airborne PM₁₀ in the Port-City of Rijeka (Croatia). 10th International Conference on Air Quality-Science and Application : proceedings of Abstracts, Redici, P. ; Finard, i S. ; Farrow, A. ; Chemel, Ch. ; De Medeiros, J. ; Singh, V. ; Sochi, R.J. (ur.). Milano: Univ of Hertfordshire and Arpanet Milano, str. 283-283 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Contini, D.; Gambaro, A., Argiriou, A., Alebić-Juretić, A., Barbaro, E., Cesari, D., Dimopoulos, S., Dinoi, A., Donato, A., Gregoris, E., Karagiannidis, A., Ivošević, T., Liora, N., Melas, D.,

Merico, E., **Mifka, B.**, Orlić, I., Poupkou, A., Anastasia ; Šarović, K. (2015). Impact of maritime transport on particulate matter concentrations and chemical compositions in four port-cities of the Adriatic/Ionian area: an overview of the results of POSEIDON project. European Geosciences Union General Assembly 2015: abstracts: Geophysical Research Abstracts Beč: European Geosciences Union General Assembly, 2015. str. EGU2015-10519 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Barbaro, E.; Gregoris, E.; Piazza, R.; **Mifka, B.**; Ivošević, T.; Orlić, I.; Alebić-Juretić, Ana; Gambaro, A.; Contini, D. (2015). The impact of ship traffic and harbor activities on the atmospheric pollution in two Northern Adriatic ports: Venice and Rijeka. XVII ICAST Conference "International Science Index" : abstracts Lisabon: WASET - World Academy of Science, Engineering and Technology, 2015. str. 767-767 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Vučetić, V., **Mifka, B.** (2014). Vremenske situacije za vrijeme velikih šumskih požara. Agrometeorologija u službi korisnika: „Zaštita okoliša i šumski požari“, Vučetić, V. (ur.). Zagreb: Hrvatsko agrometeorološko društvo. str. 11-13 (pozvano predavanje, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

Mifka, B., Žuvela-Aloise, M., Vučetić, V. (2013). Local meteorological simulation to define critical areas for agricultural production. 10th EMS Annual Meeting and 11th European Conference on Applied Meteorology Reading: European Meteorological Society, str. 1-1. (<https://www.bib.irb.hr/809220>) (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Mifka, B., Vučetić, V., Telišman Prtenjak, M. (2011). Vremenska analiza katastrofalnog šumskog požara na otoku Braču od 14. do 17. srpnja 2011. Meteorološki izazovi 2: Meteorologija u fokusu javnosti/Challenges in Meteorology 2: Meteorology in the Focus of Public Zagreb: Hrvatsko meteorološko društvo, str. 1-1 (predavanje, domaća recenzija, sažetak, znanstveni)

Mifka, B.; Žurga, P.; Alebić-Juretić, A. Physical and chemical characterisation of airborne particulates in the port city of Rijeka, Croatia. 18th World Clean Air Congress WCAC-19,

Proceedings of Abstracts, Incecik, S., Toros, H., Topçu, S., Öztürk, B., Düzgün, C., Kurşun, İ. (ur.). Istanbul: TUNCAP i IUAPPA, 2019. str. 76-76. (<https://www.bib.irb.hr/1105093>) (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Pozvano predavanje:

Mifka B. (2017). Croatian Adriatic Coast: Forest Fires, Air pollution and possible implications of WRF and WRF-Chem. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado (6.3.2017.)