

SAHARSKÝ PRACH NAD SLOVENSKOM V ROKOCH 2015 – 2020

PETER HRABČÁK

Slovenský hydrometeorologický ústav, Aerologické a radiačné centrum Gánovce, Hlavná 178, 058 01 Poprad-Gánovce, peter.hrabcak@shmu.sk

This study through model outputs from the Barcelona dust forecast center and measurements of the Cimel sun photometer at the Poprad-Gánovce station proves that dust from the Sahara desert is an episodic but not negligible part of the air over the territory of the Slovak republic. The paper uses data for the period 2015–2020. The days with the occurrence of Saharan dust were revealed primarily on the basis of information that came from a predictive model. Through photometer measurements such values of optical and microphysical properties of aerosols were subsequently separated, which belonged to situations with a dominant occurrence of Saharan dust in the aerosol mix. These properties were also determined for the average conditions in the investigated locality. Namely, these were the following characteristics: aerosol optical depth, Ångström exponent, coarse mode fraction at a total aerosol optical depth, and single scattering albedo. Furthermore, the following characteristics were determined for all aerosol sizes and separately for the coarse mode of the aerosols: volume concentration, effective radius, volume median radius, and its standard deviation. The volume distribution of aerosols was also presented at the work.

Táto štúdia prostredníctvom modelových výstupov z Barcelonského centra predpovede prachu a meraní slnečného fotometra Cimel na stanici Poprad-Gánovce dokazuje, že prach zo saharskej púšte je epizodickou, avšak nezanedbateľnou súčasťou ovzdušia nad územím Slovenskej republiky. V príspevku sú použité údaje pre obdobie 2015–2020. Dni s výskytom saharského prachu boli odhalené primárne na základe informácií, ktoré pochádzali z predpovedného modelu. Prostredníctvom meraní fotometra boli následne vyseparované také hodnoty optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov, ktoré prináležali situáciám s dominantným výskytom saharského prachu v aerosólovom mixe. Tieto vlastnosti boli stanovené aj pre priemerné podmienky v skúmanej lokalite. Menovite išlo o nasledujúce charakteristiky: optická hrúbka aerosólov, Ångströmov exponent, podiel hrubých častíc na celkovej optickej hrúbke aerosólov a albedo jednoduchého rozptylu. Ďalej boli pre všetky veľkosti aerosólov, a separátne pre hrubý mód aerosólov, stanovené tieto charakteristiky: objemová koncentrácia, efektívny polomer, medián polomerov v objeme a jeho štandardná odchýlka. V práci bola tiež prezentovaná aj objemová distribúcia aerosólov.

Key words: Saharan dust, optical and microphysical properties of aerosols, Sun photometer

1 ÚVOD

Aerosóly sú dôležitou súčasťou klimatického systému Zeme. Ich významnou zložkou je okrem iných druhov aj minerálny prach. V ročnom priemere je v globálnom meradle zo zemského povrchu vyzdvihnutých 1000–4000 Tg minerálneho prachu, pričom približne 57% z neho pochádza zo severnej Afriky (Huneeus et al., 2011; IPCC, 2013). Odhaduje sa, že minerálny prach predstavuje cca 70% z celkovej globálnej hmotnosti všetkých atmosférických aerosólov a 25% z globálnej optickej hrúbky aerosólov (Kinne et al., 2006). Aerosóly z púštnych oblastí vplývajú na energetickú bilanciu Zeme na jednej strane priamo, a to prostredníctvom interakcií s krátkovlnným a dlhovlnným žiarením a na druhej strane nepriamo prostredníctvom ich interakcií s oblakmi a ekosystémami (Kok et al., 2017).

Lokálny priamy vplyv môže v závislosti od albeda povrchu viesť ku kladnému, ale aj zápornému radiačnému pôsobeniu na hornej hranici atmosféry. Albedo vyššie ako 30% (napr. nad púšťou alebo snehom) zvyčajne vedie ku kladnému radiačnému pôsobeniu a naopak albedo nižšie ako 15% (napr. nad oceánmi alebo ihličnatými lesmi) zvyčajne vedie k zápornému radiačnému pôsobeniu. V oblasti približne medzi dvoma spomínanými hranicami môže byť výsledný vplyv tak kladný ako aj záporný (Balkanski et al.,

2007) a jeho konečnú hodnotu určujú fyzikálne vlastnosti aerosólových častíc (napr. ich tvar, veľkostná distribúcia alebo index refrakcie).

Stále zostáva nejasné to, či celkový vplyv atmosférického prachu na globálnu klímu je kladný alebo záporný. Nedávna štúdia Kok et al. (2017) odhalila podhodnocovanie veľkostí prachových častíc, ktoré vstupujú do globálnych klimatických modelov. Podľa ich zistení je prach nachádzajúci sa v atmosfére podstatne hrubší. Keďže hrubý prach má otepľujúci účinok na klímu, tak je pravdepodobné, že priamy radiačný efekt prachu bude menej ochladzujúci ako doposiaľ modelmi odhadovaná úroveň cca $-0,4 \text{ W/m}^2$. Práca prináša odhad v intervale od $-0,48$ do $+0,20 \text{ W/m}^2$, čo zahŕňa možnosť, že prach nakoniec spôsobuje čisté otepľovanie planéty. Pozoruhodný je vplyv prachu na snehovú pokrývku. Bolo zistené, že depozícia minerálneho prachu môže viesť vo vysokých polohách Álp a Karpát k zrýchlenému topeniu snehu v dôsledku zníženého albeda, a tiež aj v dôsledku tvorby snehových rias (Di Mauro et al., 2019; Greilinger et al., 2018).

Saharský prach je pre vedeckú obec zaujímavý už vyše 100 rokov. Článok o ňom napísal dokonca aj Charles Darwin. Plavidlá v Atlantickom oceáne často pokrýval jemný prášok a Darwin sa zamýšľal nad tým, či jeho zdrojom môže byť Afrika (Darwin, 1846). Ľudia v Európe sa so sa-

harským prachom určite stretávajú aj v dávnejšej minulosti. Z výsledkov paleoklimatologickej štúdie Clifford et al. (2019) sa dozvedáme, že počas uplynulých 2000 rokov sa v Alpách vyskytla v určitých obdobiach zvýšená depozícia saharského prachu. Najdlhší interval významnejších prípadov výskytu saharského prachu (VSP) bol odhalený v období rokov 870–1000, ktoré je zhodné s nástupom teplejšieho obdobia, nazývaného stredoveké klimatické optimum: cca 900–1300 (Berner et al., 2011).

Ďalšie významné periódy VSP, avšak už kratšie, sa vyskytli v rokoch 140–170, 370–450, 1320–1370 a 1910–2000. Počas modernej doby (1780–2006) boli 3 najvýraznejšie VSP pozorované v rokoch 1977, 1943 a 1994 (zoraďené zostupne). Štúdia dospela k záveru, že v minulosti súviseli významné epizódy VSP s kombináciou sucha v severnej Afrike a zvýšenou rýchlosťou vetra, spôsobenou zmenami v gradiente teploty a tlaku. Na základe zistených súvislostí autori predpokladajú, že otepľovanie bude mať v budúcnosti za následok menej časté, ale intenzívnejšie prípady VSP.

Osobitnou kapitolou sú prípady transportu saharského prachu cez Atlantický oceán smerom na západ, často až nad americký svetadiel (Velasco-Merino et al., 2018). Podľa NASA (Streiff, 2021) by mala aktivita takýchto prípadov v nasledujúcich 20–50 rokov vplyvom klimatickej zmeny poklesnúť až o 30 % a tento pokles by mal ďalej pokračovať. V budúcom storočí by sa aktivita mohla dostať na najnižšiu úroveň za posledných 20 000 rokov. Príčina tkvie v zoslabení pasátového prúdenia vplyvom poklesu tlakového gradientu, a to ako následok relatívneho oteplenia severnejších vôd Atlantického oceánu v porovnaní s jeho južnejšie sa nachádzajúcimi oblasťami.

Problematika saharského prachu si zaslúžila svoju pozornosť aj na vedeckom poli v rámci štátov susediacich so Slovenskou republikou (Chilinski et al., 2016; Varga et al., 2013; Varga et al., 2016; Varga, 2020; Marion, et al., 2018; Gerhard, et al., 2016). Daná problematika získala v posledných rokoch určitý ohlas aj na Slovensku. Dôkazom toho je práca Hrabčák (2016), v ktorej nachádzame podrobnú analýzu 9-dňovej série (31.3.–8.4.2016) detekcie saharského prachu prostredníctvom meraní mikropulzného lídaru na stanici Poprad-Gánovce. Výskyt prachu bol zaznamenaný v hraničnej vrstve atmosféry aj vo voľnej atmosfére. Maximálna nadmorská výška, v ktorej bol detegovaný, je 8 kilometrov. Vrstvy prachu sa nad miestom merania vyznačovali výraznou dynamikou a rôznorodou štruktúrou. Počas dňa 3. apríla sa prach nachádzal vo vrstve s vertikálnou hrúbkou až 5 kilometrov. Štúdia je obohatená aj o synoptickú analýzu danej situácie a tiež aj o analýzu spätných trajektórií prúdenia vzduchu.

Novšia práca maďarského autora Varga (2020) nadväzuje na staršiu štúdiu Varga et al. (2013). Obe práce sa zameriavajú na VSP v oblasti Panónskej panvy. Novšia z nich uvádza, že v spomínanej oblasti (jej severná časť zasahuje aj nad územie SR) bolo počas 40-ročného obdobia 1979–2018 prostredníctvom systematickej analýzy satelitných meraní odhalených celkovo 218 prípadov VSP. Suverénne najviac takýchto prípadov (90) sa vyskytlo v poslednom analyzovanom desaťročí (2009–2018). V prípade ročného chodu práca uvádza, že najviac prípadov

VSP bolo pozorovaných v jarnom (40 %) a letnom (32 %) období. Na druhej strane najmenej počas jesene (14 %) a zimy (14 %). K podobným výsledkom dospela aj práca Chilinski et al. (2016), v ktorej sa na základe 10-ročných klimatologických údajov spomína, že diaľkový prenos saharského prachu do strednej Európy nastáva najmä počas jari a leta.

Medzi najdôležitejšie prínosy práce Varga (2020) patrí zistenie, že v poslednom desaťročí bola počas zimy pozorovaná zvýšená frekvencia a intenzita depozície saharského prachu. Posledné skúmané desaťročie bolo v priebehu zimného obdobia charakterizované vyšším počtom prípadov VSP (16), ako počas troch predchádzajúcich desaťročí dohromady (13). Na margo zvyšujúceho sa počtu zimných prípadov VSP autor ponúka vysvetlenie prostredníctvom rastúcej amplitúdy planetárnych (Rossbyho) vln, ktorá následne ovplyvňuje tvorbu saharských tlakových níží a transport prachu do vyšších zemepisných šírok. Možnou príčinou viac meandrujúceho dýzového prúdenia a zvlneného polárneho vortexu je fenomén zvaný Arktické zosilnenie (Arctic amplification, Dai et al., 2019), ktoré je spôsobené rýchlejšim otepľovaním polárnych oblastí severnej pologule v porovnaní s nižšími zemepisnými šírkami.

Na VSP v strednej Európe má ale pravdepodobne vplyv aj tzv. Intenzita severoafrického dipólu (North African Dipole Intensity - NAFDI). Index NAFDI charakterizuje intenzitu tlakového gradientu, ktorý závisí na jednej strane od výraznosti vysokého tlaku vzduchu v oblasti subtropickej saharskej Afriky (Maroko) a na druhej strane od južnejšie položenej monzúnovej oblasti nižšieho tlaku (Nigéria). Pozitívnu fázu NAFDI charakterizuje zvýšený transport saharského prachu do severného Atlantiku. Negatívna fáza NAFDI sa vyznačuje zvýšeným exportom prachu do oblasti západného Stredomoria (Rodríguez et al., 2020). Táto fáza má teda za následok aj vyššiu pravdepodobnosť transportu prachu do strednej Európy. Štúdia Varga (2020) sa venuje aj charakteristickému meteorologickému pozadiu jednotlivých epizód a prostredníctvom poľa geopotenciálnej výšky v hladine 700 hPa rozlišuje 3 hlavné synoptické typy spojené s VSP v oblasti Panónskej panvy.

Práca Varga (2020) tiež uvádza aj priemernú ročnú hodnotu celkovej depozície saharského prachu, ktorá činí 2,2 g/m². Dominantnou je mokrá zložka depozície a predstavuje 77–93 %. Depozícia prachu zo saharskej púšte zohrala nezanedbateľnú úlohu aj pri formovaní pôdy v medziľadových dobách. Podľa výpočtov Varga et al. (2016) môže severoafrický prachový materiál predstavovať 20–30 % z ílu a jemných pôdnych zložiek interglaciálnych paleo-pôd (paleosols) v oblasti Panónskej panvy. Podľa rozdelenia Stuet et al. (2009) sa územie Slovenska nachádza na okraji D1b zóny, v rámci ktorej sa súčasný saharský prachový materiál môže začleniť do pôdneho systému a môže tak zvýšiť obsah jeho jemných častíc.

Priemerná ročná hodnota optickej hrúbky minerálneho prachu pre vlnovú dĺžku 550 nm (AERONET a modelové dáta) bola v období 1998–2012 v prípade Poľska 0,038 ± 0,016 s maximom v apríli na úrovni 0,057 ± 0,03 a minimom v mesiacoch december a január s hodnotou 0,027 ± 0,01 (Chilinski et al., 2016). Mesiac

máj charakterizuje až 28 percentný podiel dní s optickou hrúbkou minerálneho prachu vyššou ako 0,05, naopak v zime je takýchto dní pod 5%. Práca tiež uvádza, že na celkovej optickej hrúbke aerosólov (aerosol optical depth - AOD) má v danom regióne minerálny prach podiel cca 25% a je jedným z dvoch (spoločne s produktmi horenia) najdôležitejších typov aerosólov, ktoré sa nachádzajú nad hraničnou vrstvou atmosféry.

Vedecká štúdia Marinou et al. (2017) zhodnotila výsledky 9-ročného (2007–2015) trojrozmerného monitoringu prenosu saharského prachu do Európy. Opierala sa o dva hlavné zdroje údajov, ktorými boli CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) a EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network). V jednej zo širších oblastí (SV Európa: 10–30 V, 45–60 S) ich záujmu sa nachádzalo aj Slovensko. Táto oblasť okrem iného zahŕňala aj kompletne celé Maďarsko a Poľsko. Údaje o priemernej optickej hrúbke prachu pre vlnovú dĺžku 532 nm sú k dispozícii pre 4 3-mesačné obdobia. Najvyššie hodnoty dosahuje optická hrúbka prachu v období apríl-máj-jún a to $0,033 \pm 0,062$, naopak najnižšie hodnoty dosahuje v období október-november-december a to $0,023 \pm 0,043$.

Je možné konštatovať, že v ovzduší nad územím Slovenska a tiež aj susedných štátov sa prach zo Sahary vyskytuje epizodicky. Smerom na juh význam saharského prachu narastá. Satelitné merania ukázali, že je dôležitou zložkou stredomorskej atmosféry. V západnej časti Stredomoria je VSP detegovaný v takmer štvrtine dní (24%), v strednej časti je to 30% a vo východnej časti je podiel dní najvyšší a dosahuje 34% (Varga et al., 2014). V prípade jednotlivých juhoeurópskych krajín sú frekvencia výskytu a prízemné koncentrácie najvyššie predovšetkým v Španielsku a Taliansku.

Práca Wang et al. (2020) analyzovala vplyv saharského prachu na kvalitu ovzdušia a verejné zdravie v trinástich európskych krajinách. Podľa jej zistení podiel saharského prachu na celkovom počte úmrtí spojených s expozíciou PM₁₀ dosahuje v Španielsku 44% a v Taliansku 27%. Daný podiel práca zmiňuje aj pre dve krajiny susediace so Slovenskom. V prípade Rakúska je to 13% a v prípade Českej republiky je to 8%. Citovaná štúdia odhaduje, že v dôsledku expozície saharským prachom dochádza ročne v Španielsku k cca 13 000 a v Taliansku k cca 16 000 úmrtiam. Pre Rakúsko je tento počet približne 600 a pre Českú republiku približne 700.

2 METODIKA

2.1 Výstupy BDFC

Barcelonské centrum predpovede prachu (Barcelona Dust Forecast Center - BDFC) bolo založené vo februári 2014 dvomi inštitúciami. Jednou z nich bola Španielska štátna meteorologická agentúra a druhou Barcelonské superpočítačové centrum. Dané centrum bolo založené s cieľom splniť záväzok Svetovej meteorologickej organizácie, ktorým bolo vytvoriť prvé špecializované regionálne meteorologické centrum, činnosťou ktorého má byť predpoveď výskytu piesku a prachu v atmosfére. Centrum

operačne generuje a distribuuje predpovede prachu pre severnú Afriku (severne od rovníka), Stredný východ a Európu (25° Z–65° V, 0°–65° S). Na predpovednej doméne sa okrem Sahary nachádzajú aj ďalšie významné oblasti potenciálnych zdrojov prachu, ktorými sú najmä Arabský polostrov a okolie Kaspického mora. BDFC vydáva svoje regionálne predpovedné produkty na dennej báze a využíva pritom predpovedný model MONARCH (Badia et al., 2017). Tento model zahŕňa prírodné aj antropogénne zdroje (t. j. poľnohospodársky narušené pôdy).

Predpovede zahŕňajú nasledovné produkty: zaťaženie prachom, ktoré udáva celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m²), ďalej koncentrácia prachu pri povrchu (μg/m³), optická hrúbka pre vlnovú dĺžku 550 nm, útlm prachu (M/m) pri povrchu pre vlnovú dĺžku 550 nm. K dispozícii je tiež mokrá a suchá depozícia na povrchu (mg/m² za 3 hodiny). Všetky produkty sú prezentované s časovým krokom 3 hodiny od 12:00 UTC pre obdobie nasledujúcich 72 hodín. K dispozícii sú taktiež aj mesačné priemery prízemnej koncentrácie prachu a jeho celkového množstva vo vertikálnom stĺpci.

Predpovedný model MONARCH je spúšťaný každý deň. Jeho horizontálne rozlíšenie je 0,1° a jeho vertikálne rozlíšenie charakterizuje 40 σ hladín. Model využíva počiatočné podmienky (12 UTC) prevzaté od U. S. National Centers for Environmental Prediction (NCEP) s rozlíšením 0,5°. Okrajové meteorologické podmienky s časovým krokom 6 hodín a s rovnakým rozlíšením 0,5° preberá od NCEP Global Forecast System. BDFC vykonáva pravidelné hodnotenie predpovedanej optickej hrúbky prachu. Hodnotenie prebieha takmer v reálnom čase. Porovnávané sú hodnoty optickej hrúbky prachu pre vlnovú dĺžku 550 nm, získané z modelu v čase od 0 do 24 hodín s hodnotami celkovej optickej hrúbky aerosólov, ktoré sú poskytované sieťou AERONET (Aerosol RObotic NETwork) (Holben et al., 1998; Dubovik and King, 2000). Porovnanie sa vykonáva pre vybraných 40 staníc, pre ktoré je charakteristická vyššia pravdepodobnosť výskytu prachu (Werner et al., 2021).

V tejto práci sú predkladané výsledky analýzy, ktorá sa opiera o výstupy predpovedného produktu s názvom Zaťaženie prachom. Daná analýza spočívala v manuálnom skríningu týchto predpovedí, pričom sa používali iba predpovedné výstupy od 0 do 21 hodín. Prach pochádzajúci zo Sahary sa od iných zdrojov odlišil prostredníctvom precízneho sledovania jeho postupu od zdroja až nad skúmanú lokalitu. Analyzované šesťročné obdobie začína 1. januárom 2015 a končí 31. decembrom 2020. V tomto období boli identifikované dni s VSP nad územím Slovenskej republiky. Samostatne boli počítané dni s VSP pre oblasť Poprad-Gánovce.

V prípade územia SR bol k jednotlivým dňom s VSP priradený aj maximálny index zaťaženia saharským prachom v daný deň (ďalej skrátene: MIZSP). Hodnoty indexov zaťaženia saharským prachom a k nim prislúchajúce veľkostné intervaly sa nachádzajú v Tab. 1. Tieto indexy zodpovedajú farebnej škále, ktorú používa BDFC pri svojich mapových predpovediach v prípade produktu zaťaženie prachom. Za deň s VSP je definovaný taký deň, v ktorom aspoň počas krátkeho časového intervalu dosiahol

Tabuľka 1. Hodnoty indexov zaťaženia saharským prachom a k nim prislúchajúce veľkostné intervaly.

Table 1. Values of Saharan dust load indices and associated size intervals.

Hodnota indexu	1	2	3	4	5	6	7
Zaťaženie [g/m ²]	0,1–0,2	0,2–0,4	0,4–0,8	0,8–1,2	1,2–1,6	1,6–3,2	3,2–6,4

index zaťaženia hodnotu minimálne 1 aspoň niekde nad územím SR resp. v oblasti Poprad-Gánovce. Index rovnajúci sa 1, ktorému prislúcha zaťaženie od 0,1 do 0,2 g/m² predstavuje prvú farbu na farebnej škále BDFC, pričom hodnoty pod 0,1 g/m² sa na predpovednom výstupe už nezobrazujú.

2.2 Výstupy zo slnečného fotometra Cimel

Automatický slnečný fotometer Cimel typu CE 318 NE dP (od roku 2018 aktualizovaný na T verziu) je prístroj umožňujúci merania priameho a rozptýleného slnečného žiarenia. Slnečné žiarenie deteguje v deviatich spektrálnych oblastiach. Dve vlnové dĺžky, a to 340 a 380 nm sú v UV oblasti. Tri sú vo viditeľnej oblasti: 440, 500 a 675 nm. Posledná skupina, a to štvorica vlnových dĺžok sa nachádza v infračervenej oblasti: 870, 938 (zameraná na detekciu vodnej pary), 1020 a 1640 nm. Okrem štandardných meraní toto vedecké zariadenie vykonáva aj merania v troch polarizačných stupňoch (120°, 240° a 360°). Prístroj je plne automatizovaný a za priaznivých poveternostných situácií sú informácie o priamom slnečnom žiarení získavané približne každých 15 minút. Merania rozptýleného slnečného žiarenia sa získavajú dvoma hlavnými meracími metódami v automaticky stanovených časoch, ktoré prislúchajú vybraným zenitovým uhlom Slnka na oblohe. Týmito meracími metódami sú Almuquantar (zenitový uhol je konštantný a mení sa azimutálny uhol) a Principal Plan (mení sa zenitový uhol v kladnom a zápornom smere od Slnka) (Cimel Electronique, 2015).

Slnečný fotometer je prístroj, ktorého konštrukcia a meracie postupy sú špeciálne navrhnuté za účelom určovania rôznych optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov. Okrem toho dokáže určiť aj obsah vodnej pary v atmosférickom stĺpci. Prvé merania sa začali na pracovisku Poprad-Gánovce vykonávať 12. 12. 2014. Ak to podmienky dovoľujú, tak je v automatickej prevádzke každý deň okrem kalibračného obdobia. Z tohto dôvodu nie sú k dispozícii kontinuálne merania. Doba kalibrácie je približne 2 mesiace a počas nej je prístroj mimo pracoviska. Vykonáva sa raz ročne a najvhodnejším obdobím pre jej uskutočnenie je obdobie okolo zimného slnovratu. Je zabezpečená v rámci globálnej siete AERONET (AERosol RObotic NETwork) a vykonáva ju Service National d'Observation PHOTONS/AERONET, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, CNRS-Université de Lille.

Proces výpočtu optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov je pomerne zložitý a je realizovaný vďaka nášmu členstvu v medzinárodnej sieti AERONET, ktorá zabezpečuje jednotnú metodiku pre celý svet (AERONET, 2019). V rámci AERONETu je zavedený prepracovaný systém, ktorý prešiel dlhoročným vývojom. K dispozícii sú

tri úrovne kvality údajov. Level 1.0 (bez skríningu oblakov a kontroly kvality), level 1.5 (po skríningu oblakov a kontrole kvality) a level 2.0 (zaručená kvalita). Detaily ohľadne procesu skríningu oblakov, ktorý zabezpečuje, aby údaje neboli ovplyvnené oblačnosťou ponúka štúdia Smirnov et al.

(2000). Údaje, ktorých level je 2.0 sú dostupné až po kalibrácii prístroja. V predloženej práci boli vždy použité iba údaje levelu 2.0.

Všetky optické a mikrofyzikálne vlastnosti aerosólov, ktoré budú v nasledujúcom texte postupne predstavené sa vzťahujú na celý vertikálny stĺpec atmosféry, t. j. od zemského povrchu až po hornú hranicu atmosféry. Základnou optickou vlastnosťou stanovenou pomocou meraní slnečného fotometra je optická hrúbka aerosólov. Pre potreby tejto práce bola určená pre všetkých 8 možných vlnových dĺžok: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 a 1640 nm. Optická hrúbka aerosólov τ_λ pre danú vlnovú dĺžku λ je daná vzťahom (Hrabčák, 2019):

$$\tau_\lambda = \int_0^H b(\lambda, h) dh = \frac{\ln(S_{\lambda, H}) - \ln(S_\lambda) - \sum_{i=1}^n \tau_{\lambda, i} \mu_i}{\mu}, \quad (1)$$

kde H označuje vzdialenosť hornej hranice atmosféry od zemského povrchu, b je koeficient útlmu pre aerosóly, h je vzdialenosť od zemského povrchu, $S_{\lambda, H}$ je hustota toku monochromatického slnečného žiarenia na hornej hranici atmosféry, S_λ je hustota toku monochromatického slnečného žiarenia na zemskom povrchu, $\tau_{\lambda, i}$ je optická hrúbka ďalších faktorov spôsobujúcich útlm priameho slnečného žiarenia, μ_i je ich relatívna optická hmotnosť a μ označuje relatívnu optickú hmotnosť aerosólov. Ďalšou optickou vlastnosťou aerosólov použitou v tejto práci je Ångströmov exponent α

$$\alpha = -\frac{\log(\tau_{\lambda_1}/\tau_{\lambda_2})}{\log(\lambda_1/\lambda_2)}, \quad (2)$$

ktorý bol pre potreby tejto štúdie stanovený pre pár vlnových dĺžok 440 a 870 nm. Optická charakteristika albedo jednoduchého rozptylu bola stanovená pre vlnovú dĺžku 440 nm a je definovaná ako

$$\omega_\lambda = \frac{\tau_{\lambda, r}}{\tau_\lambda}, \quad (3)$$

kde τ_λ je optická hrúbka aerosólov (celková) a $\tau_{\lambda, r}$ označuje rozptylovú optickú hrúbku aerosólov, ktorá kvantifikuje parciálny vplyv aerosólového rozptylu na slnečné žiarenie dopadajúce na zemský povrch (Dubovik, 2000). Čím väčšia je hodnota albeda jednoduchého rozptylu, tak tým vyšší podiel má rozptyl na celkovom útlme slnečného žiarenia spôsobeného aerosólmi nachádzajúcimi sa v ovzduší.

Okrem už spomenutých optických vlastností boli v práci použité aj výstupy objemovej distribúcie aerosólov $dV(r)/d \ln r$ [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$], ktorá sa stanovuje pre 22 vopred preddefinovaných logaritmicke ekvidistantných diskretných bodov r_i , v intervale polomerov častíc od 0,05 do 15 μm (AERONET, 2019). Medzi objemovou distribúciou a distribúciou počtu častíc $dN(r)/d \ln r$ platí vzťah:

$$\frac{dV(r)}{d \ln r} = V(r) \frac{dN(r)}{d \ln r} = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dN(r)}{d \ln r}. \quad (4)$$

Ďalšou získanou charakteristikou aerosólov z meraní slnečného fotometra je podiel hrubých častíc na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm. Tu je dôležité upozorniť, že v prípade siete AERONET je hranica medzi jemnými a hrubými časticami definovaná prostredníctvom bodu minima na objemovej distribučnej krivke v oblasti polomeru častíc od 0,439 do 0,992 μm . V práci boli použité aj nasledujúce štandardné parametre mikrofyzikálnych vlastností aerosólov, ktoré boli stanovené súhrnne pre všetky veľkosti aerosólových častíc a tiež aj separátne, čisto pre hrubý mód aerosólov: objemová koncentrácia C_v [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$], efektívny polomer r_{eff} , medián polomerov v objeme $\ln r_v$ a štandardná odchýlka pre medián polomerov v objeme σ_v (AERONET, 2019).

$$C_v = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r, \quad (5)$$

$$r_{eff} = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^3 \frac{dN(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \frac{dN(r)}{d \ln r} d \ln r}, \quad (6)$$

$$\ln r_v = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \ln r \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}, \quad (7)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} (\ln r - \ln r_v)^2 \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}}. \quad (8)$$

2.3 Charakteristika skúmanej oblasti

Geografickou oblasťou výskumu tejto práce je celé územie Slovenskej republiky, ktorého južné hranice sú od okraja saharskej púšte vzdialené približne 1500 km. Táto práca sa ale zameriava prevažne na lokalitu, kde je umiestnený prístroj slnečný fotometer. Ten sa nachádza na streche budovy Aerologického a radiačného centra Slovenského hydrometeorologického ústavu v Gánovciach, pri meste Poprad. Súradnice lokality sú 49,03° s. z. š., 20,32° v. z. d. a nadmorská výška je 706 m n. m.

Obsah aerosólov v ovzduší, či už celkové množstvo alebo aj druhové zloženie determinujú na jednej strane lokálne zdroje a na strane druhej atmosférické prúdenie, ktoré dokáže určitú vzduchovú hmotu spolu s aerosólmi premiestniť aj o niekoľko tisíc kilometrov. Viackrát za rok tu môže ísť o transport saharského prachu z Afriky. V ojedinelých prípadoch tu môže ísť napríklad aj o dym z rozsiahlych požiarov. V roku 2016 a 2017 bol pomocou lidarů nad Slovenskom zaznamenaný dym až z kanadských požiarov, pričom v roku 2017 bol detegovaný aj v spodnej stratosfére, teda nad tropopauzou (Hrabčák, 2016 a 2017). Pozoruhodný prípad diaľkového prenosu nastal aj v roku 2019 a tentoraz boli detegované aerosólové častice (kvapôčky kyseliny sírovej) pochádzajúce z erupcie sopky

Raikoke, ktorá sa nachádza v oblasti Kurilských ostrovov (Hrabčák, 2019).

Medzi významnejšie lokálne zdroje patria produkty spaľovania tuhého paliva v okolitých obciach a poľnohospodárstvo. Často dochádza k odvíjaniu holej suchej pôdy alebo aj rastlinných produktov vetrom, keďže lokalita je pomerne veterná. Blízkosť mesta Poprad (cca 1,5 km) s cca 50 000 obyvateľmi a rôznymi priemyselnými aktivitami tiež zohráva určitú úlohu. Na druhej strane ide o podhorskú lokalitu, pretože najvyšší vrchol Karpát, ktorým je Gerlachovský štít (2654 m n. m.), sa nachádza iba 20 km od stanice. Aj napriek blízkosti spomenutého mesta je možné oblasť vzhľadom na antropogénny vplyv vo všeobecnosti považovať za vidiecku.

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1 Výstupy BDFC

K hodnoteniu VSP nad územím Slovenska bolo prístupné dvoma spôsobmi. Prvý spôsob spočíval v analýze celkového počtu dní s VSP. Išlo o dni počas ktorých bolo zaznamenané zaťaženie prachom s hodnotou aspoň 0,1 g/m². Tento spôsob analýzy odhalil viaceré zaujímavé skutočnosti. Ako dokumentuje Obr. 1, saharský prach sa nad územím Slovenskej republiky vyskytoval v sledovanom šesťročnom období 2015–2020 rádovo počas desiatok dní v roku. Najmenej takýchto dní bolo zaznamenaných v roku 2017. Ich počet bol 47. Naopak, najviac dní s VSP bolo zaznamenaných v nasledujúcom roku 2018, a to až 81. V ročnom priemere dosiahol počet dní s VSP nad územím SR hodnotu 64, čo predstavuje 18 % z celého roka. Inými slovami je možné konštatovať, že saharský prach sa nad územím SR vyskytuje v priemere raz za 6 dní. V prípade oblasti Poprad-Gánovce je priemerný ročný počet 42 dní, čo predstavuje 66 % z celoslovenského priemeru.

Pri pohľade na rok 2017 vidíme, že MIZSP dosiahol hodnotu nanajvyš 3, čo je najnižšia hodnota zo všetkých sledovaných rokov. Rekordným bol v tomto ohľade už vyššie zmienený rok 2018. MIZSP počas jedného dňa (16. apríla 2018) dosiahol hodnotu až 7, čo vzhľadom na Tab. 1 predstavuje celkový obsah prachu v intervale od 3,2 do 6,4 g/m². Tento konkrétny prípad je znázornený na Obr. 2, na ktorom môžeme vidieť výstup BDFC udávajúci zaťaženie prachom v g/m² pre veľkopriestorovú predpovednú doménu. Na Obr. 1 si môžeme ďalej všimnúť, že najčastejšie je zastúpený MIZSP s hodnotou 1 až 3, pričom zo všetkých dní s VSP to predstavuje až 92 %. Zvyšných 8 % pripadá na dni v ktorých dosiahol MIZSP hodnotu 4 až 7. Priemerný počet dní za rok s MIZSP 4 a viac preto dosahuje hodnotu len 5. MIZSP 5 a viac sa vyskytuje ešte zriedkavejšie, v ročnom priemere sú takéto dni iba dva. Počet dní s MIZSP 6 a 7 dosiahol za celé sledované 6-ročné obdobie hodnotu 5, čo predstavuje priemerný výskyt menej ako raz za rok. Konkrétne išlo o tieto dni počas dvoch ucelených období: 16. a 17. júna 2016 a ešte 15., 16. a 17. apríla 2018.

Pozoruhodné zistenia vyplývajú z analýzy VSP v prípade jednotlivých mesiacov roka. Výsledky týchto zistení sumarizuje Obr. 3, na ktorom môžeme vidieť zaujímavý ročný chod počtu dní s VSP. Pravdepodobnosť objavenia

sa vzduchovej hmoty, ktorá by obsahovala saharský prach od decembra smerom k jari postupne narastá. V mesiaci apríl pozorujeme 1. ročné maximum, nasleduje menší pokles pre mesiac máj a následne sa v mesiaci jún vyskytuje 2. ročné maximum, počtom dní úplne totožné s prvým maximumom. Najvyššia pravdepodobnosť VSP nad Slovenskom je v období apríl-máj-jún. Počas týchto troch mesia-

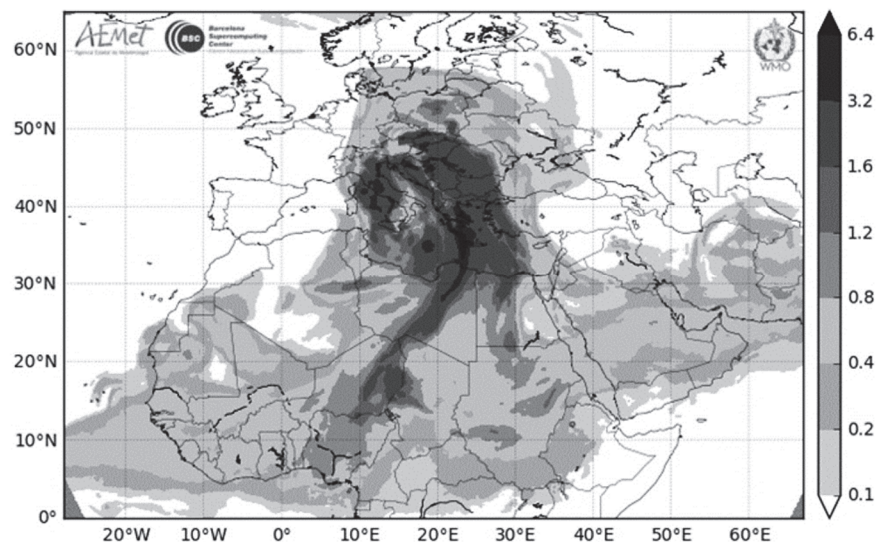
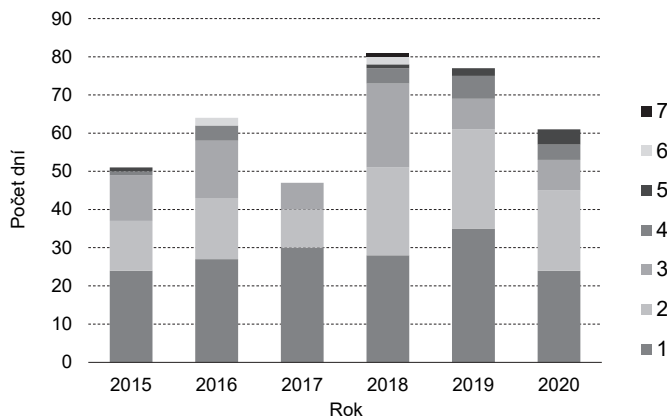
cov sa vyskytuje až 47% dní s VSP z ich celkového počtu v rámci celého roka. V mesiacoch júl a august je pravdepodobnosť prúdenia vzduchu so saharským prachom nad územie SR evidentne nižšia ako v predchádzajúcich troch mesiacoch. Tiež aj MIZSP nedosahuje v mesiacoch júl a august až tak vysoké hodnoty, aké nadobúda v období apríl až jún.

Obrázok 1.

Počet dní s výskytom saharského prachu nad územím Slovenska v jednotlivých rokoch v období 2015–2020. Farebná škála reprezentuje počet dní s konkrétnym maximálnym indexom zaťaženia saharským prachom.

Figure 1.

Number of days with the occurrence of Saharan dust over the territory of Slovakia in individual years in the period 2015–2020. The color scale represents the number of days with a specific maximum Saharan dust load index.



Obrázok 2.

Predpovedný výstup BDFC udávajúci celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m^2) dňa 16. 4. 2018, v čase 06:00 UTC. Predpoveď je z 12:00 UTC dňa 15. 4. 2018.

Figure 2.

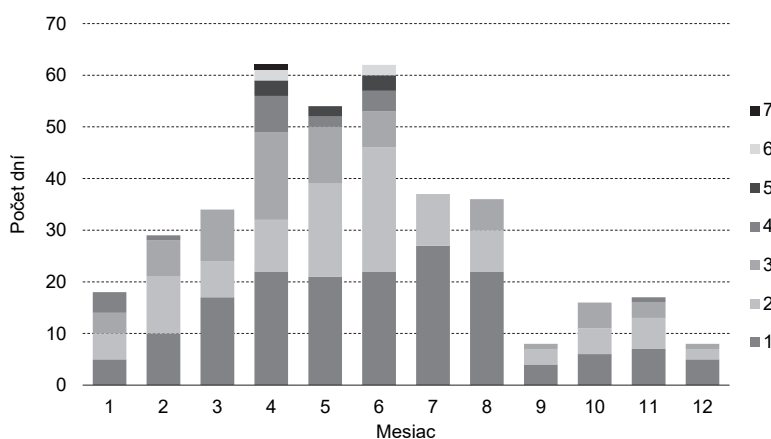
Predictive output of BDFC indicating the total amount of dust in the vertical column above the location (g/m^2) for the 16th of April 2018, at 06:00 UTC. The forecast is from 12:00 UTC, 15th of April 2018.

Obrázok 3.

Počet dní s výskytom saharského prachu nad územím Slovenska v jednotlivých mesiacoch v období 2015–2020. Farebná škála reprezentuje počet dní s konkrétnym maximálnym indexom zaťaženia saharským prachom.

Figure 3.

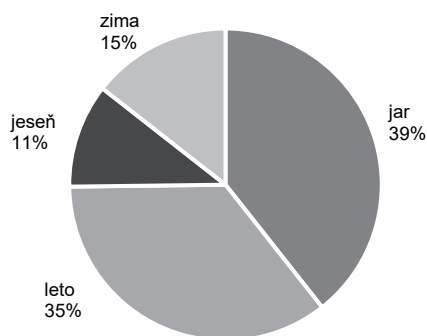
Number of days with the occurrence of Saharan dust over the territory of Slovakia in individual months in the period 2015–2020. The color scale represents the number of days with a specific maximum Saharan dust load index.



Zvyšné mesiace roka, teda obdobie od septembra do decembra je obdobím s najmenšou pravdepodobnosťou VSP nad Slovenskom. September a december sú charakteristické najnižším počtom dní s VSP spomedzi všetkých mesiacov roka. Pri pohľade na Obr. 4 získame dobrý prehľad o situácii s VSP v priebehu jednotlivých ročných období. Vidíme, že jednoznačne sú v popredí jar (39%) a leto (35%). Naopak výrazne nižšie zastúpenie dní s VSP nachádzame počas zimy (15%) a jesene (11%). Tieto výsledky veľmi dobre korešponujú so zisteniami prezentovanými v práci Varga (2020), ktorá v analyzovanom 40-ročnom období 1979–2018 zistila veľmi podobné relatívne zastúpenie prípadov VSP pre oblasť Panónskej panvy: jar (40%), leto (32%), jeseň (14%) a zima (14%).

Obrázok 4. Relatívne zastúpenie dní s výskytom saharského prachu nad územím Slovenska v jednotlivých ročných obdobiach v období 2015–2020.

Figure 4. Relative representation of days with the occurrence of Saharan dust over the territory of Slovakia in individual seasons in the period 2015–2020.



Príčiny prezentovaného ročného chodu je možné hľadať na jednej strane vo veľkopriestorových cirkulačných pomeroch v jednotlivých častiach roka a na strane druhej v dostatočne turbulentných podmienkach v oblasti saharskej púšte. Je evidentné, že tieto podmienky sú najlepšie splnené v trojmesačnom období od apríla do júna. Kľúčovú úlohu v tomto období pravdepodobne zohrávajú vpády studeného polárneho morského vzduchu nad saharskú púšť. Studený vzduch sa nad Saharu dostáva väčšinou v severozápadnom prízemnom prúde po prechode studeného frontu. Niekedy môže byť takýchto vpádov studeného vzduchu aj viacero v krátkom čase po sebe.

Napr. v roku 2016 sa v priebehu niekoľkých dní vyskytlo až 5 studených frontov za sebou, ktoré ovplyvnili severozápadnú časť Afriky (Hrabčák, 2016). Studený front je spravidla viazaný na rozsiahlu výškovú brázdnu, na prednej strane ktorej dochádza k teplej advekcii tropického vzduchu smerom na severovýchod do Európy. Tento vzduch môže v závislosti od predchádzajúcich turbulentných podmienok obsahovať prislúchajúce množstvo saharského prachu. Niekedy dochádza aj k osamostatneniu výškovej tlakovej níže v oblasti severnej Afriky, čo má výrazne pozitívny efekt na vyzdvihnutie veľkého množstva

prachu zo saharskej púšte. Poloha a dynamika výškovej brázdny resp. tlakovej níže má rozhodujúci vplyv na to, ktorá časť Európy je prachom najviac zasiahnutá, ako dlho je ním zasiahnutá a v akom množstve. Opakovanie resp. obnovovanie výškovej brázdny môže spôsobiť aj dlhobejší transport saharského prachu do Európy.

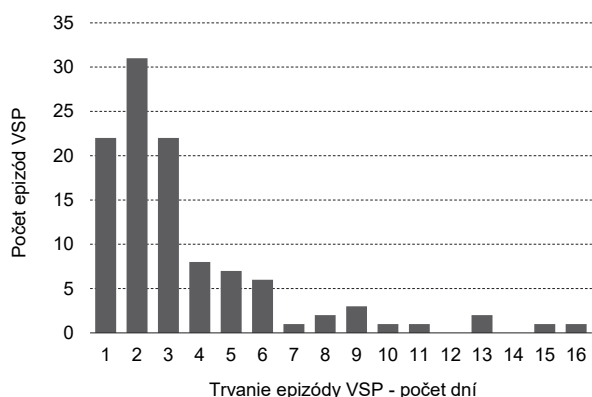
Druhý spôsob hodnotenia VSP ukázal v tomto smere pre prípad Slovenska zaujímavé skutočnosti. Tento spôsob spočíval v analýze tzv. epizód s VSP. Pod epizódou je myslený jeden až viacdňový VSP, pričom pri viacdňovom VSP musel byť prach v ovzduší v každom jednom dni skúmanej série. Série ale nebola podmienená kontinuálnym VSP, to znamená, že mohlo dôjsť k niekoľkohodinovému prerušeniu VSP. Najviac epizód s VSP v období rokov 2015–2020 v prípade celého územia SR sa pozorovalo v roku 2019 a to v počte 23. S počtom 15 ich bolo najmenej v roku 2015. Zaujímavé je, že pri hodnotení z pohľadu celkového počtu dní s VSP pripadá maximum na rok 2018 a minimum na rok 2017, teda ide tu o úplne rozdielnu dvojicu rokov ako pri hodnotení z pohľadu epizód. V ročnom priemere nadobúda počet epizód s VSP hodnotu 18.

Ak porovnáme toto číslo so zisteniami uvedenými v práci Varga (2020), tak vidíme značný rozdiel. Napr. v desaťročnom období 2009–2018 práca uvádza výskyt najväčšieho počtu prípadov VSP zo všetkých analyzovaných desaťročí (1979–2018) a to 90, čo v prepočte predstavuje 9 prípadov ročne. VSP je v tomto prípade zacielený na pomerne rozsiahlu oblasť Panónskej panvy, avšak práca používa rozdielnu metodiku, ktorá spočíva v systematickej analýze satelitných meraní. Táto metodika je podľa všetkého menej citlivá na VSP v porovnaní s údajmi z numerického modelu, ktorý bol použitý v našom prípade. Pri údajoch z modelu bolo kritérium pre VSP stanovené prostredníctvom zaťaženia prachom, ktoré muselo nadobudnúť hodnotou aspoň 0,1 g/m². Ak by ale bola prahová hodnota vyššia, tak to by následne viedlo k nižšiemu počtu identifikovaných dní a epizód s VSP. Pri nižšej prahovej hodnote by to bolo naopak.

Všetkých 381 dní s VSP je možné súhrnne zaeliť do 108 epizód s VSP. Trvanie jednej epizódy je teda v priemere 3,5 dní. Na Obr. 5 si je možné všimnúť početnosť epizód VSP nad územím Slovenska pre jednotlivé dĺžky trvania (počty dní) v období 2015–2020. Vidíme, že trvanie epizódy je najčastejšie dvojdňové, čo je o niečo menej ako vyššie spomínaný priemer. Pozoruhodné sú ale najmä epizódy, ktorých trvanie je 10 a viac dní. Takýchto prípadov sa počas skúmaného 6-ročného obdobia vyskytlo 6, čo približne vychádza na opakovanie danej situácia raz za rok. Ešte pozoruhodnejšie sú však epizódy s kontinuálnym trvaním 15 a viac dní. Zaznamenala sa dvojica takýchto epizód. Prvá z nich sa odohrala od 31.3. do 14.4.2016. Trvala 15 dní a MIZSP dosiahol v priebehu tejto epizódy úroveň 4. Extrémna epizóda z pohľadu dĺžky trvania bola pozorovaná od 3. do 18. apríla 2018. Jej trvanie bolo 16 dní a MIZSP dosiahol dňa 16. apríla svoje maximum s hodnotou 7, čo je taktiež extrémna hodnota, ktorá sa vyskytla iba jedenkrát. Danú situáciu môžeme vidieť na Obr. 2.

Obrázok 5. Početnosť epizód výskytu saharského prachu (VSP) nad územím Slovenska pre jednotlivé dĺžky trvania (počty dní) v období 2015–2020.

Figure 5. The number of episodes of Saharan dust occurrence over the territory of Slovakia for individual durations (number of days) in the period 2015–2020.

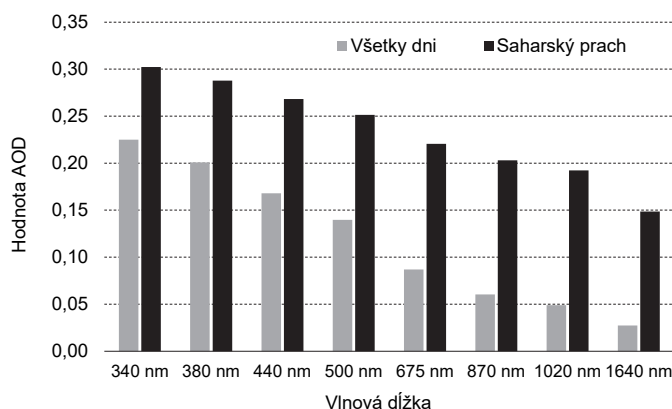


3.2 Výstupy zo slnečného fotometra Cimel

Pomocou meraní slnečného fotometra Cimel bol stanovený dlhodobý priemer hodnôt AOD pre týchto 8 vlnových dĺžok: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 a 1640 nm. Výsledky sú znázornené na Obr. 6, pričom sú rozdelené do dvoch kategórií. V kategórii *Všetky dni* bol dlhodobý priemer vypočítaný zo všetkých denných priemerov danej charakteristiky. Celkový počet dní v skúmanom šesťročnom období 2015–2020, pre ktoré bol k dispozícii denný priemer AOD je 1108. Táto hodnota predstavuje 51 % zo všetkých kalendárnych dní v sledovanom období. Polovičné zastúpenie má dve príčiny. Prvá z nich je meteorologická, presnejšie povedané ide o vplyv oblačnosti, ktorá v niektorých dňoch úplne znemožňuje vykonať meranie priameho slnečného žiarenia. Druhou príčinou je fakt, že prístroj každoročne podstupuje zahraničnú kalibráciu a počas nej je jeho prevádzka na stanici prerušená na 2–3 mesiace, väčšinou v zimnom období.

Obrázok 6. Priemerné hodnoty optickej hrúbky aerosólov (AOD) pre jednotlivé vlnové dĺžky v prípade kategórií *Všetky dni* a *Saharský prach* v období 2015–2020.

Figure 6. Average values of the aerosol optical depth (AOD) for individual wavelengths in the case of All the days and Saharan dust categories in the period 2015–2020.



Vďaka výstupom BDFC bola k dispozícii informácia o tom, počas ktorých dní bol zaznamenaný VSP v oblasti Poprad-Gánovce. Tieto dni boli spárované s meraniami slnečného fotometra Cimel. Celkový počet spárovaných dní v skúmanom šesťročnom období bol 100, čo predstavuje iba 40 % zo všetkých dní s možným VSP podľa výstupov BDFC. Okrem absencie prístroja je tento nižší počet zapríčinený aj absenciou meraní priameho slnečného žiarenia z dôvodu oblačnosti. Pri skúmaní charakteristík saharského prachu je ale práve uvedená selekcia nepostačujúca, pretože počas dní s VSP nemusí byť saharský prach celý čas prítomný v ovzduší alebo môže tam byť prítomný iba v malých množstvách.

Ak sa teda chceme zamerať na optické a mikrofyzikálne vlastnosti saharského prachu, tak potrebujeme vylúčiť merania, kde je saharský prach nedominantnou zložkou aerosólového mixu, inak by mohli byť jeho charakteristiky výrazne skreslené. Keďže veľkosť Ångströmovho exponentu je zvyčajne nepriamo úmerná veľkosti aerosólových častíc (O'Neill, 1993), tak vďaka tejto jeho vlastnosti nám uvedená podmienka zabezpečí, aby sa do výpočtu nedostali merania, v čase ktorých prevládali v atmosfére skôr častice menších rozmerov, nekorešpondujúce so saharským prachom. V kategórii *Saharský prach* bol preto dlhodobý priemer hodnôt danej charakteristiky vypočítaný zo všetkých individuálnych meraní spĺňajúcich počas dní s VSP podmienku, že Ångströmov exponent pre pár vlnových dĺžok 440–870 nm je <0,65. Zvolená prahová hodnota vychádza zo štúdie Patel et al. (2016), v ktorej sa nachádza klasifikácia jednotlivých druhov aerosólov, pričom jedným z použitých parametrov tejto klasifikácie je aj Ångströmov exponent. Celkový počet dní v skúmanom šesťročnom období, počas ktorých boli splnené obe uvedené podmienky je len 21, čo predstavuje 21 % z dní, ktoré splnili 1. podmienku a iba 8 % zo všetkých dní s možným VSP podľa výstupov BDFC.

Z výsledkov prezentovaných na Obr. 6 je zrejmé, že pre všetkých 8 vlnových dĺžok sú vyššie hodnoty AOD dosahované v prípade kategórie *Saharský prach*. Ďalej si je možné všimnúť, že v oboch kategóriách veľkosť AOD s rastúcou vlnovou dĺžkou klesá. V prípade kategórie *Všetky dni* AOD klesá z hodnoty 0,225 pre vlnovú dĺžku 340 nm na hodnotu 0,027 pre vlnovú dĺžku 1640 nm, pričom tento pokles činí 0,198. V prípade kategórie *Saharský prach* AOD klesá z hodnoty 0,302 pre vlnovú dĺžku 340 nm na hodnotu 0,148 pre vlnovú dĺžku 1640 nm, pričom tento pokles činí 0,154. Vidíme teda, že pokles je markantnejší v prvej kategórii. Príčinou menšieho poklesu AOD v prípade kategórie *Saharský prach* je väčší rozmer aerosólových častíc. Za pozornosť tiež stojí aj fakt, že pomer hodnôt AOD medzi druhou a prvou kategóriou postupne smerom k väčším vlnovým dĺžkam narastá. Pre najmenšiu vlnovú dĺžku 340 nm je spomínaný pomer rovný 1,3 a pre najväčšiu vlnovú dĺžku 1640 nm je to až 5,4.

Tabuľka 2. Priemerné hodnoty vybraných optických a mikrofyzikálnych charakteristík aerosólov v období 2015–2020 (od štvrtého stĺpca 2016–2020), pre kategórie Všetky dni, VSP dni a Saharský prach. Menovite zľava: optická hrúbka aerosólov (AOD), Ångström exponent (AE), podiel hrubých častíc na celkovej AOD (CMF), albedo jednoduchého rozptylu (SSA). Ďalej boli pre všetky veľkosti aerosólov (T) a separátne pre hrubý mód aerosólov (C) stanovené tieto charakteristiky: objemová koncentrácia (VolC), efektívny polomer (REff), medián polomerov v objeme (VMR), štandardná odchýlka pre medián polomerov v objeme (Std).

Table 2. Average values of selected optical and microphysical characteristics of aerosols in the period 2015–2020 (from the fourth column 2016–2020), for categories All the days, VSP days and Saharan dust. Namely from the left: aerosol optical depth (AOD), Ångström exponent (AE), coarse mode fraction at a total AOD (CMF), single scattering albedo (SSA). Furthermore, the following characteristics were determined for the all aerosol sizes (T) and separately for coarse aerosol mode (C): volume concentration (VolC), effective radius (REff), volume median radius (VMR), standard deviation from volume median radius (Std).

	AOD 500 nm	AE 440–870 nm	CMF 500 nm	SSA 440 nm	VolC T $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	VolC C $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	REff T μm	REff C μm	VMR T μm	VMR C μm	Std T μm	Std C μm
Všetky dni	0,138	1,53	0,18	0,961	0,04	0,02	0,288	2,28	0,682	2,863	1,433	0,671
VSP dni	0,196	1,25	0,32	0,951	0,096	0,067	0,38	1,903	0,919	2,392	1,358	0,668
Saharský prach	0,251	0,44	0,67	0,936	0,153	0,125	0,507	1,548	1,2	1,89	1,158	0,621

Sumárny prehľad vybraných optických a mikrofyzikálnych charakteristík aerosólov nám poskytuje Tab. 2. Dané charakteristiky boli v tomto prípade rozdelené do troch kategórií. Okrem už vyššie spomínaných dvoch kategórií pribudla v Tab. 2 ešte jedna s názvom VSP dni, ktorá zahŕňa dlhodobé priemery vypočítané z denných priemerov danej charakteristiky počas dní s VSP. V prípade tejto kategórie ide v podstate o medzistupeň medzi kategóriami *Všetky dni* a *Saharský prach*. Prvé tri charakteristiky uvedené v Tab. 2 boli stanovené pre zaužívané obdobie v tejto práci, teda pre roky 2015–2020, avšak nasledujúce charakteristiky boli dostupné pre kratšie obdobie rokov 2016–2020.

Pri pohľade na hodnoty prvej charakteristiky uvedenej v Tab. 2, teda na hodnoty AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm, vidíme význam zavedenia filtrácie údajov pomocou hodnôt Ångströmovho exponentu. Hodnota 0,196 pre kategóriu *VSP dni* sa nachádza približne v polovici medzi hodnotami 0,138 a 0,251, ktoré prislúchajú kategóriám *Všetky dni* a *Saharský prach*. Okamžitá úroveň AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm v prípade kategórie *Saharský prach* dosiahla svoje absolútne maximum 0,73 dňa 7. 4. 2016 v čase 5:55 UTC. V priebehu 21 dní, počas ktorých boli namerané údaje pre kategóriu *Saharský prach* dosiahol MIZSP v prípade územia Slovenska priemernú hodnotu 2,95. Za zmienku stojí aj fakt, že počas všetkých spomínaných dní bol MIZSP najnižšie na úrovni rovnajúcej sa 2, čo opäť podčiarkuje význam použitia selekcie údajov pomocou Ångströmovho exponentu.

Druhou optickou vlastnosťou, nachádzajúcou sa v Tab. 2, je už viackrát spomínaný Ångström exponent (AE) pre pár vlnových dĺžok 440–870 nm. Keďže táto optická vlastnosť úzko súvisí s tretím parametrom, ktorým je podiel hrubých častíc (coarse mode fraction - CMF) na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm, tak z tohto dôvodu budú tieto charakteristiky hodnotené spoločne. Veľkosť Ångströmovho exponentu v kategórii *Všetky dni* nadobúda hodnotu 1,53 a tá veľmi dobre korešponduje s podielom hrubých častíc na celkovej AOD, ktorý je 18%. Medzi týmito dvoma parametrami v podstate platí nepriama úmera. Z práve uvedených hodnôt je zrejmé, že v lokalite Poprad-Gánovce má na veľkosť AOD počas

bežných dní významne dominantný vplyv mód jemných aerosólových častíc.

Hodnoty AOD v UV oblasti spektra získané z meraní Brewerovho ozónového spektrofotometra prezentované v práci Hrabčák (2019) ukázali, že v dlhodobom mesačnom priemere sú ich najnižšie hodnoty zaznamenávané v zimných mesiacoch január a december. Preto je možné predpokladať, že hore uvedený dlhodobý priemer celkovej AOD v kategórii *Všetky dni* pre vlnovú dĺžku 500 nm by bol pri zarataní absentujúcich meraní (väčšinou v zimnom období) v skutočnosti o niečo nižší. Taktiež aj dlhodobý priemer v kategórii *Všetky dni* pre frakciu hrubých častíc by bol pravdepodobne trochu menší, keďže ako už bolo ukázané na Obr. 4, zima je obdobím s menej častým VSP.

Ďalej si môžeme všimnúť, že aj v kategórii *VSP dni* pozorujeme stále dosť vysokú hodnotu Ångströmovho exponentu rovnajúcu sa 1,25 a opäť dominanciu módu jemných častíc, pretože podiel hrubých častíc dosahuje len 32%. Z práve uvedeného vyplýva, že počas dní s VSP v dlhodobom priemere nemá saharský prach dominantný podiel na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm. Opačná situácia bola zistená v prípade kategórie *Saharský prach*, kedy sa podiel hrubých častíc rovná 67% a je možné konštatovať, že saharský prach je dominantným druhom aerosólových častíc. Tomu zodpovedá aj veľkosť Ångströmovho exponentu, ktorý má hodnotu len 0,44.

Štvrtou charakteristikou v Tab. 2 je albedo jednoduchého rozptylu (single scattering albedo - SSA) pre vlnovú dĺžku 440 nm. Dní, pre ktoré bol k dispozícii jej denný priemer, bolo v období 2016–2020 len 21. Dôvodom takto nízkeho počtu dní je skutočnosť, že hodnoty tejto optickej vlastnosti aerosólov sú v rámci siete AERONET pre level 2.0 dostupné len vtedy, keď je AOD pre vlnovú dĺžku 440 nm väčšia ako 0,4 a zenitový uhol Slnka je počas merania väčší ako 50°, čo je v našej oblasti málokedy splniteľné. Viac ako polovica spomínaných dní, konkrétne 12, ktoré splnili uvedené prísne podmienky, pripadlo práve pre kategóriu *VSP dni* a len 9 individuálnych meraní v rámci piatich dní bolo obsiahnutých v kategórii *Saharský prach*. Pri pohľade na výsledky vidíme veľmi podobné, avšak postupne klesajúce hodnoty smerom od prvej ku tretej kategórii. Tento pokles je v súlade s tým, čo je pre

VSP uvedené v práci Raptis et al. (2020), ktorá sa venovala optickým vlastnostiam aerosólov v oblasti Atén. Je tiež známe, že prachové aerosóly, najmä tie, ktoré obsahujú hematit, absorbujú viac pri menších vlnových dĺžkach (Schuster et al., 2016).

Zostávajúce charakteristiky v Tab. 2 zaraďujeme medzi mikrofyzikálne vlastnosti aerosólov. Boli stanovené v dvoch prípadoch, t. j. pre všetky veľkosti aerosólov a separátne pre hrubý mód aerosólov. Prvou z nich je objemová koncentrácia (volume concentration - VolC). Jej hodnoty sú podľa očakávania v oboch prípadoch najnižšie pre kategóriu *Všetky dni* a naopak najvyššie pre kategóriu *Saharský prach*. Rozdiel medzi týmito kategóriami je v prípade všetkých veľkostí aerosólov približne 3,8-násobný, avšak v prípade hrubého módu aerosólov je až cca 6,3-násobný. Ďalej si môžeme všimnúť, že podiel hrubého módu aerosólov na objemovej koncentrácii rastie z hodnoty 50 % pre kategóriu *Všetky dni* na hodnotu 70 % pre kategóriu *VSP dni* a až na hodnotu 82 % pre kategóriu *Saharský prach*.

Uvedené percentuálne podiely sú v porovnaní s podielom hrubých častíc na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm vo všetkých troch kategóriách vyššie. Vidíme teda, že hrubé častice majú vo všeobecnosti menší vplyv na hodnotu spomínanej AOD, než by sa mohlo očakávať vzhľadom na ich percentuálny podiel na objemovej koncentrácii. Nie je to prekvapujúce, pretože zo základov optiky aerosólov je všeobecne známe, že pri rovnakom objeme a rovnakej bezrozmernej účinnosti útlmu má početnejšia skupina sférických častíc s menším polomerom väčší koeficient útlmu než menej početná skupina sférických častíc s väčším polomerom.

Objemová koncentrácia hrubého módu aerosólov v prípade kategórie *Saharský prach* dosahuje $0,125 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ alebo pre lepšiu predstavu to môžeme vyjadriť ako $0,125 \text{ m}^3/\text{km}^2$, či cm^3/m^2 . Za predpokladu, že všetok aerosól v hrubom móde je saharský prach, tak dostávame reálny obraz o jeho obsahu v ovzduší. Pomocou znalosti hustoty saharského prachu, ktorá je okolo $2,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ (Rocha-Lima et al., 2018) je možné vypočítať aj zaťaženie prachom, ktoré udáva celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m^2), čo je parameter, ktorý je jedným z predpovedných výstupov BDFC. V prípade vyššie uvedených vstupných parametrov dostávame výsledok $0,325 \text{ g}/\text{m}^2$, ktorému v Tab. 1 prislúcha index zaťaženia saharským prachom s hodnotou 2.

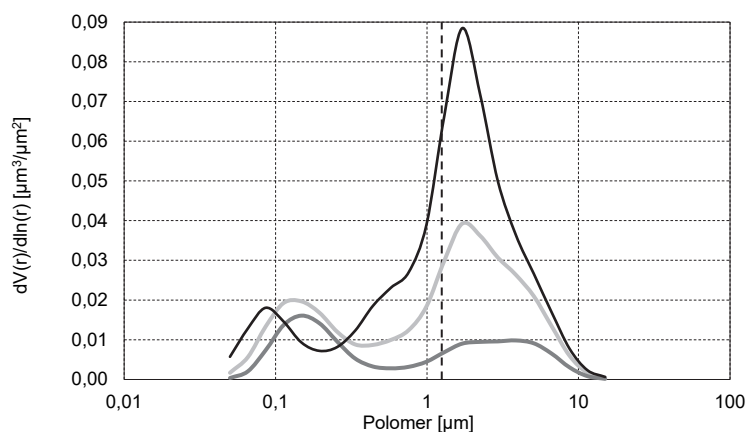
Je pozoruhodné, že absolútne okamžité maximum objemovej koncentrácie pre všetky veľkosti aerosólov, a tiež aj pre hrubý mód aerosólov, bolo v prípade kategórie *Saharský prach*, no rovnako aj v kategórii *Všetky dni*, teda v prípade úplne všetkých dostupných meraní zaznamenané dňa 4.4.2016 v čase 15:11 UTC. Tento

absolútny extrém objemovej koncentrácie v podstate prisudzuje saharskému prachu prvú priečku v rámci všetkých druhov aerosólov, ktoré sa v období dostupných meraní vyskytli nad skúmanou lokalitou. Pre všetky veľkosti aerosólov dosiahla objemová koncentrácia úroveň $0,441 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ a pre ich hrubý mód to bolo $0,402 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, čo predstavuje až 91 % z prvej menovanej hodnoty. Pri prepočte na zaťaženie prachom získame výsledok cca $1 \text{ g}/\text{m}^2$, čomu zodpovedá index zaťaženia s hodnotou 4. Za predpokladu, že všetok aerosól v hrubom móde je saharský prach, tak získavame cennú informáciu o jeho obsahu v ovzduší nad stanicou Poprad-Gánovce. V spomínaný deň dosiahol MIZSP na základe výstupov BDFC v prípade celého územia Slovenska úroveň 4, čo je výborná zhoda s prevedeným výpočtom na základe údajov zo slnečného fotometra.

Detailné informácie o veľkosti aerosólových častíc v ovzduší nám, okrem zostávajúcich mikrofyzikálnych vlastností aerosólov v Tab. 2, prináša aj Obr. 7, na ktorom sa nachádza porovnanie ich priemernej objemovej distribúcie pre zaužívanú trojicu kategórií, t. j. *Všetky dni*, *VSP dni* a *Saharský prach*. Výsledky ukazujú, že v skúmanej oblasti sa v dlhodobom priemere pre všetky tri kategórie pozoruje bimodálne, teda dvojvrcholové rozdelenie aerosólových častíc. V prípade kategórie *Všetky dni* má distribučná krivka svoje globálne maximum v oblasti jemnej frakcie aerosólových častíc. Dané maximum pripadá pre častice s polomerom približne $0,15 \mu\text{m}$. Pre túto kategóriu nadobúda lokálny vrchol distribučnej krivky v oblasti módu hrubých častíc tvar platô s maximom na úrovni zhruba $3,86 \mu\text{m}$.

Obrázok 7. Priemerná objemová distribúcia aerosólov získaná z meraní slnečného fotometra Cimel, v období 2016–2020. Tmavo šedý graf predstavuje hodnoty pre kategóriu *Všetky dni*, bledo šedý graf reprezentuje hodnoty pre kategóriu *VSP dni* a čierny graf predstavuje hodnoty pre kategóriu *Saharský prach*. Zvislá prerušovaná čiara reprezentuje polomer častíc s hodnotou $1,25 \mu\text{m}$, t. j. $2,5 \mu\text{m}$ pre ich priemer ($\text{PM}_{2,5}$ limit).

Figure 7. The average volume distribution of aerosols obtained from the measurements of the Cimel Sun Photometer, in the period 2016–2020. The dark grey graph represents the values for the All the days category, the light grey graph represents the values for the VSP days category, and the black graph represents the values for the Sahara dust category. The vertical dashed line represents the radius of the particles with a value of $1.25 \mu\text{m}$, i. e. $2.5 \mu\text{m}$ for their diameter ($\text{PM}_{2,5}$ limit).



V prípade kategórie *VSP dni* je situácia značne odlišná, globálne maximum distribučnej krivky sa už pozoruje v rámci módu hrubých častíc a zodpovedá časticiam s polomerom cca 1,71 μm . Lokálne maximum sa v prípade tejto kategórie vyskytuje presne tam, kde sa nachádza aj v kategórii *Všetky dni*. Distribučná krivka pre kategóriu *Saharský prach* na Obr. 7 dosahuje najvyššiu hodnotu spomedzi trojice hodnotených kategórií, a to vďaka svojomu výraznému globálnemu maximu, ktoré sa rovnako ako pri kategórii *VSP dni* vyskytuje v hrubom móde a prináleží časticiam s polomerom cca 1,71 μm . Za povšimnutie stojí aj fakt, že lokálne maximum v jemnom móde je v porovnaní s predchádzajúcimi dvoma kategóriami posunuté viac doľava a pozoruje sa pre menšie častice s polomerom zhruba 0,09 μm .

Viacročné merania na afrických staniách Capo Verde a Dakar pomocou slnečného fotometra Cimel ukazujú, že pre všetky mesiace roka nadobúda distribučná krivka svoj vrchol na hodnote 2,24 μm (Euphrasie-Clotilde et al., 2021). Táto hodnota, ktorá charakterizuje domovskú oblasť saharského prachu je o niečo vyššia ako hodnota 1,71 μm , ktorá charakterizuje oblasť Poprad-Gánovce v prípade kategórie *Saharský prach*. Pri transporte aerosólov z Afriky nad územie Slovenska dochádza postupom času z dôvodu suchej depozície (gravitačnej sedimentácie) k znižovaniu zastúpenia väčších častíc. To nám vysvetľuje, prečo nad Slovenskom pripadá maximum distribučnej krivky pre menšie častice. Pomocou suchej depozície sa dá vysvetliť aj to, prečo je v kategórii *Všetky dni* lokálne maximum až na úrovni častíc s polomerom cca 3,86 μm . V stručnosti povedané je to preto, že tu ide o lokálny aerosól, t. j. napr. prach z ciest a polí a tiež peľ.

S tvarom distribučných kriviek na Obr. 7 úzko súvisia ešte nekomentované mikrofyzikálne vlastnosti aerosólov, ktorými sú efektívny polomer (effective radius - REff), medián polomerov v objeme (volume median radius - VMR) a jeho štandardná odchýlka. Hodnoty efektívneho polomeru v prípade všetkých veľkostí aerosólov sú podľa očakávania najnižšie pre kategóriu *Všetky dni* a naopak, najvyššie pre kategóriu *Saharský prach*. To isté platí aj pre medián polomerov v objeme. Presne opačné poradie u oboch charakteristík ale nachádzame pre hrubý mód aerosólov. Je preto možné konštatovať, že pre saharský prach je typický menší rozmer aerosólových častíc, než aké sa obvykle nachádzajú v skúmanej lokalite pre hrubý mód aerosólov. Zo získaných výsledkov vyplýva, že prach zo Sahary v prípade jeho výskytu nad skúmanou lokalitou charakterizuje efektívny polomer s hodnotou cca 1,5 μm a medián polomerov v objeme s jeho štandardnou odchýlkou na úrovni približne $1,9 \pm 0,6 \mu\text{m}$.

Publikované výsledky z in situ analýzy častíc, ktoré sa na zemský povrch dostali prostredníctvom depozície (prevažne mokrej) ukazujú, že v rámci európskeho priestoru sa polomer častíc saharského prachu vyskytuje prevažne v rozsahu od 1 do 15 μm (Varga, 2020). Prezentované výsledky pre stanicu Poprad-Gánovce z meraní slnečného fotometra sa nachádzajú prevažne v oblasti uvedeného intervalu. Ďalej vidíme, že spodný okraj uvedeného intervalu pre polomer častíc 1 μm , t. j. 2 μm pre ich priemer sa už nachádza v oblasti častíc PM_{2,5} (tzv.

respirabilné častice). Pri porovnaní krivky objemovej distribúcie aerosólov na Obr. 7 v prípade kategórie *Všetky dni* s krivkou pre kategóriu *Saharský prach* je zrejme, že vplyvom prachu zo Sahary dochádza aj k zvyšovaniu obsahu častíc, ktoré už zaraďujeme medzi častice PM_{2,5}. Distribučné krivky sú vytvorené na základe 22 vopred preddefinovaných diskretných bodov. V prvom preddefinovanom bode objemovej distribúcie v oblasti PM_{2,5}, t. j. pre častice s priemerom cca 2 μm dosahuje kategória *Saharský prach* až 8,7 násobne vyššiu úroveň ako kategória *Všetky dni*. Pre častice s priemerom cca 0,9 μm je uvedený pomer ešte stále vysoký a nadobúda hodnotu 5,6.

4 ZÁVER

Táto práca bola zameraná na saharský prach epizodicky sa vyskytujúci v ovzduší Slovenskej republiky. Údaje použité pri výskumných analýzách pochádzali z dvoch hlavných zdrojov. Prvým z nich boli modelové výstupy z Barcelonského centra predpovede prachu. Z palety viacerých produktov bolo v tejto práci použité zaťaženie prachom, ktoré udáva celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m^2). Pomocou tohto produktu boli identifikované dni s výskytom saharského prachu nad územím Slovenskej republiky. Samostatne boli takéto dni kvantifikované pre oblasť Poprad-Gánovce. V prípade územia SR bol ku všetkým dňom s VSP priradený aj maximálny index zaťaženia saharským prachom. Druhým zdrojom údajov pre výskum boli merania slnečného fotometra Cimel na stanici Poprad-Gánovce, ktorého výstupy ponúkajú širokú paletu optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov. Z oboch menovaných zdrojov boli použité informácie pre 6-ročné obdobie, ktoré začína 1. januárom 2015 a končí 31. decembrom 2020.

Prvá časť práce je venovaná analýze výstupov z BDFC. Bolo zistené, že v ročnom priemere dosiahol počet dní s VSP nad územím SR hodnotu 64, čo predstavuje 18 % z celého roka. V prípade oblasti Poprad-Gánovce bol priemerný ročný počet nižší a dosiahol 42 dní. Najvyššia pravdepodobnosť VSP nad Slovenskom bola v období apríl-máj-jún. Počas týchto troch mesiacov sa vyskytlo až 47 % dní s VSP z ich celkového počtu v rámci celého roka. V rovnakom období dosiahol aj MIZSP tak vysokých hodnôt, aké sa v iných mesiacoch roka vôbec nevyskytli. Dvojica jar (39 %) a leto (35 %) mala v prípade ročných období jednoznačne najvyššie zastúpenie dní s VSP, naopak výrazne nižšie zastúpenie dní s VSP bolo nájdené počas zimy (15 %) a jesene (11 %).

Hodnotenie VSP prostredníctvom tzv. epizód ukázalo, že ich priemerný ročný počet je v prípade SR 18 a jedna epizóda trvá v priemere 3,5 dňa. Najčastejšie mali epizódy dvojdnovú dĺžku. Extrémna epizóda z pohľadu dĺžky trvania bola pozorovaná od 3. do 18. apríla 2018. Jej trvanie bolo 16 dní a MIZSP dosiahol dňa 16. apríla svoje absolútne šesťročné maximum, ktorému prislúcha celkový obsah prachu v intervale od 3,2 do 6,4 g/m^2 .

Vo svojej druhej, ťažiskovej časti sa táto práca postupne venovala viacerým optickým a mikrofyzikálnym vlastnostiam aerosólov. Hlavným cieľom tejto časti bolo zameranie sa na charakteristiky saharského prachu, a to

prostredníctvom špeciálne vyselektovaných údajov. Táto kategória údajov dostala názov *Saharský prach*. Dôležitú úlohu zohralo aj porovnanie s priemerným stavom aerosólov v ovzduší nad skúmanou lokalitou v kategórii *Všetky dni*, resp. porovnanie s medzistupňom medzi nimi, ktorý prináležal kategórii s názvom *VSP dni*. Menšou nevýhodou bolo to, že prístroj slnečný fotometer, pomocou ktorého boli charakteristiky aerosólov stanovené, nie je na danej stanici v kontinuálnej prevádzke kvôli svojej dlhšie trvajúcej zahraničnej kalibrácii. Tento problém by sa mohol v budúcnosti vyriešiť jedine záložným zariadením. Ďalej je dôležité podotknúť, že dištančný spôsob získavania informácií o aerosóloch pomocou slnečného fotometra je cenný z dvoch dôvodov. Po prvé preto, že všetky charakteristiky určuje iba na základe meraní priameho a difúzneho slnečného žiarenia a po druhé preto, že získané informácie sú integrálneho charakteru, teda zahŕňujú celú atmosféru nad miestom merania.

V práci boli postupne vyhodnotené jednotlivé charakteristiky aerosólov. Najskôr optická hrúbka aerosólov pre 8 vlnových dĺžok, od ultrafialovej po infračervenú časť slnečného spektra, t. j. pre 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 a 1640 nm. V prípade kategórie *Saharský prach* AOD pre jednotlivé vlnové dĺžky postupne klesá z hodnoty 0,302 pre vlnovú dĺžku 340 nm na hodnotu 0,148 pre vlnovú dĺžku 1640 nm. Pre vlnovú dĺžku 500 nm dosiahla AOD v kategórii *Všetky dni* hodnotu 0,138 a v kategórii *Saharský prach* to bolo až 0,251. Ďalšou stanovenou optickou vlastnosťou bol Ångströmov exponent pre 440–870 nm. V kategórii *Všetky dni* dosiahol úroveň 1,53, v kategórii *VSP dni* bol stále relatívne vysoký s hodnotou na úrovni 1,25 a v kategórii *Saharský prach* bol rovný už len 0,44. Podiel hrubých častíc na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm korešponduje s veľkosťou Ångströmovho exponentu a v kategóriách *Všetky dni* a *Saharský prach* boli jeho hodnoty 0,18 a 0,67. Nasledovalo albedo jednoduchého rozptylu pre vlnovú dĺžku 440 nm, ktorého hodnoty vo vyššie spomínaných dvoch kategóriách boli 0,961 a 0,936.

Ďalej boli pre všetky veľkosti aerosólov a separátne pre hrubý mód aerosólov stanovené určité mikrofyzikálne charakteristiky. Prvou bola objemová koncentrácia, ktorej hodnota v kategórii *Všetky dni* dosiahla $0,04 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ a v kategórii *Saharský prach* to bolo až $0,153 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, pričom separátne pre hrubý mód aerosólov a kategóriu *Saharský prach* to bolo $0,125 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$. Z ďalších charakteristík vyplýva, že pre kategóriu *Saharský prach* je typický efektívny polomer s hodnotou cca $1,5 \mu\text{m}$ a medián polomerov v objeme s jeho štandardnou odchýlkou na úrovni približne $1,9 \pm 0,6 \mu\text{m}$. V práci bola prezentovaná aj objemová distribúcia aerosólov, ktorá mala vo všetkých troch kategóriách bimodálne rozdelenie, pričom kategórii *Saharský prach* jednoznačne dominoval hrubý mód aerosólov.

Táto štúdia ukázala, že saharská púšť vďaka svojej veľkej rozlohe aj napriek relatívne väčšej vzdialenosti od Slovenskej republiky nezanedbateľne ovplyvňuje stav atmosféry nad jej územím. Vo výnimočných situáciách vplýva saharský prach aj na socioekonomické aspekty života jej obyvateľov. V takýchto prípadoch azda najviac pozornosti prináleží zašpineným povrchom áut a iných

predmetov v exteriéri, pričom niektorí obyvatelia si to omylom môžu spojiť napr. s priemyselnou činnosťou v ich okolí. Ovplyvnená prítomnosťou prachu zo Sahary môže byť taktiež aj kvalita ovzdušia, ktoré dýchame. Saharský prach je fenomén, ktorému je potrebné venovať dostatočnú pozornosť. Upozorňovanie na jeho výskyt v ovzduší národnou meteorologickou službou v sebe nesie potenciál pozitívne ovplyvniť život obyvateľstva.

Podakovanie

Autor ďakuje AERONET-Europe za poskytovanie kalibračných služieb. AERONET-Europe je súčasťou projektu ACTRIS-2, ktorý získala finančné prostriedky z Európskej únie (H2020-INFRAIA-2014-2015) na základe dohody o grante č. 654109.

LITERATÚRA

- AERONET, 2019, *Publications*. Goddard Space Flight Center, NASA, [online], Dostupné na: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/publications.html
- AERONET, 2019, *AERONET Inversion Products (Version 3)*. Goddard Space Flight Center, NASA, [online], Dostupné na: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/Inversion_products_for_V3.pdf
- Badia, A.–Jorba, O.–Voulgarakis, A.–Dabdub, D.–Pérez García-Pando, C.–Hilboll, A.–Goncalves, M.–Janjiz, Z., 2017, *Description and evaluation of the Multiscale Online Nonhydrostatic Atmosphere Chemistry model (NMMB-MONARCH) version 1.0: gasphase chemistry at global scale*. *Geoscientific Model Development*, 10, 609–638.
- Balkanski, Y.–Schulz, M.–Claquin, T.–Guibert, S., 2007, *Reevaluation of mineral aerosol radiative forcings suggests a better agreement with satellite and AERONET data*. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 81–95, <https://doi.org/10.5194/acp-7-81-2007>.
- Berner, K.S.–Koç, N.–Godtliebsen, F.–Divine, D., 2011, *Holocene climate variability of the Norwegian Atlantic Current during high and low solar insolation forcing*. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 26, PA2220, <https://doi.org/10.1029/2010PA002002>.
- Chilinski, M.T.–Markowicz, K.M.–Zawadzka, O. et al., 2016, *Modelling and Observation of Mineral Dust Optical Properties over Central Europe*. *Acta Geophys.* 64, 2550–2590, <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0069>.
- Cimel Electronique, 2015, *CE318 Photometer User's Operation Manual*. Cimel Electronique, Paris, France.
- Clifford, H.M.–Spaulding, N.E.–Kurbatov, A.V.–More, A.–Korotkikh, E.V.–Sneed, S.B. et al., 2019, *A 2000 year Saharan dust event proxy record from an ice core in the European Alps*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, <https://doi.org/10.1029/2019JD030725>.
- Dai, A.–Luo, D.–Song, M. et al., 2019, *Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO2*. *Nat Commun* 10, 121, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>.
- Darwin, C., 1846, *An account of the fine dust which often falls on vessels in the Atlantic Ocean*. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 2(1–2), 26–30.
- Di Mauro, B. et al., 2019, *Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization*. *Cryosph.*, 13, 1147–1165, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1147-2019>.

- Dubovik, King, M.D., 2000, A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 20673–20696.
- Dubovik, O.–Smirnov, A.–Holben, B.N.–King, M.D.–Kaufman, Y.J.–Eck, T.F.–Slutsker, I., 2000, Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieval from AERONET sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 9791–9806.
- Greilinger, M. et al., 2018, Contribution of Saharan Dust to Ion Deposition Loads of High Alpine Snow Packs in Austria (1987–2017). *Front. Earth Sci.*, 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00126>.
- Euphrasie-Clotilde, L.–Plocoste, T.–Brute, F. N., 2021, Particle Size Analysis of African Dust Haze over the Last 20 Years: A Focus on the Extreme Event of June 2020. *Atmosphere*, 12, 502, <https://doi.org/10.3390/atmos12040502>.
- Holben, B.N. et al., 1998, AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.*, 66, 1–16.
- Hrabčák, P., 2016, Dym z Kanady nad Slovenskom. SHMÚ, [online], Dostupné na: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=714>.
- Hrabčák, P., 2016, Saharský prach nad Slovenskom. *Meteorologický časopis, ročník 19, č. 2*, 83–91, ISSN 1335-339X, http://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/2016-2_MC.pdf.
- Hrabčák, P., 2017, Dym z kanadských požiarov aj nad Slovenskom. SHMÚ, [online], Dostupné na: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=856>.
- Hrabčák, P., 2019, Optické vlastnosti aerosólu vo vybraných oblastiach snečného spektra. Dizertačná práca, *Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave, Bratislava*.
- Hrabčák, P., 2019, Dva pozoruhodné prípady výskytu stratosférických aerosólov nad Slovenskom, nerecenzovaný príspevok, *Meteorologický časopis, ročník 22, číslo 2*, 118–121, ISSN 1335-339X, http://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/MC_2019-2.pdf.
- Huneeus, N. et al., 2011, Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7781–7816, <https://doi.org/10.5194/acp-11-7781-2011>.
- IPCC, 2013, Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 29 pp.
- Kinne, S. et al., 2006, An AeroCom initial assessment – optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1815–1834, <https://doi.org/10.5194/acp-6-1815-2006>.
- Kok, J.–Ridley, D.–Zhou, Q. et al., 2017, Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance. *Nature Geosci* 10, 274–278, <https://doi.org/10.1038/ngeo2912>.
- Marinou, E. et al., 2017, Three-dimensional evolution of Saharan dust transport towards Europe based on a 9-year EARLINET-optimized CALIPSO dataset. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5893–5919, <https://doi.org/10.5194/acp-17-5893-2017>.
- O'Neill, N.T.–Royer, A., 1993, Extraction of bimodal aerosol-size distribution radii from spectral and angular slope (Ångström) coefficients. *Appl. Opt.*, 32, 1642–1645.
- Patel, P.N.–Bhatt, H.–Mathur, A.K.–Prajapati, R.P.–Tyagi, G., 2016, Reflectance-based vicarious calibration of INSAT-3D using high-reflectance ground target. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 3, 20–35, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.12.001>.
- Raptis I.P.–Kazadzis S.–Amiridis V.–Gkikas A.–Gerasopoulos E.–Mihalopoulos N., 2020, A Decade of Aerosol Optical Properties Measurements over Athens, Greece. *Atmosphere*, 11(2):154, <https://doi.org/10.3390/atmos11020154>.
- Rocha-Lima, A. et al., 2018, A detailed characterization of the Saharan dust collected during the Fennec campaign in 2011: in situ ground-based and laboratory measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1023–1043, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1023-2018>.
- Rodríguez, S. et al., 2020, Rapid changes of dust geochemistry in the Saharan Air Layer linked to sources and meteorology. *Atmospheric Environment, Volume 223*, 117186, ISSN 1352–2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117186>.
- Schauer, G. et al., 2016, Increased PM concentrations during a combined wildfire and Saharan dust event observed at high-altitude Sonnblick Observatory, Austria. *Aerosol and Air Quality Research*, 16.3, 542–554.
- Schuster, G.L.–Dubovik, O.–Arola, A., 2016, Remote sensing of soot carbon–Part 1: Distinguishing different absorbing aerosol species. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 1565–1585.
- Smirnov, A.–Holben, B. N.–Eck, T. F.–Dubovik, O.–Slutsker, I., 2000, Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sens. Rev.*, 73, 337–349.
- Streiff, L., 2021, Earth Day Connections: NASA Study Predicts Less Saharan Dust in Future Winds. NASA, [online], Dostupné na: <https://www.nasa.gov/feature/esnt/2021/nasa-study-predicts-less-saharan-dust-in-future-winds>.
- Stuut, J.B.–Smalley, I.–O'Hara-Dhand, K., 2009, Aeolian dust in Europe: African sources and European deposits. *Quat. Int.*, 198 (1–2), 234–245, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.10.007>.
- Varga, G.–Kovács, J.–Újvári, G., 2013, Analysis of Saharan dust intrusions into the Carpathian Basin (Central Europe) over the period of 1979–2011. *Glob. Planet. Change*, 100, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.007>.
- Varga, G.–Újvári, G.–Kovács, J., 2014, Spatiotemporal patterns of Saharan dust outbreaks in the Mediterranean Basin. *Aeolian Res.*, 15, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.06.005>.
- Varga, G.–Cserhádi, C.–Kovács, J.–Szalai, Z., 2016, Saharan dust deposition in the Carpathian Basin and its possible effects on interglacial soil formation. *Aeolian Res.*, 22, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.05.004>.
- 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, Volume 139*, 105712, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105712>.
- Velasco-Merino, C. et al., 2018, Impact of long-range transport over the Atlantic Ocean on Saharan dust optical and microphysical properties based on AERONET data. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 9411–9424, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9411-2018>.
- Wang, Q.–Gu, J.–Wang, X., 2020, The impact of Sahara dust on air quality and public health in European countries. *Atmos. Environment, Volume 241*, 117771, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117771>.
- Werner, E.–Basart, S.–Benincasa, F., 2021, Activity Report 2020. Barcelona Dust Forecast Center, [online], Dostupné na: https://dust.aemet.es/about-us/copy_of_20190601_BDFC_ActivityReport2020.pdf.