

STUDIJA

**Aerosol mineralnog porijekla iz Sahare transportovan na podrucje
Crne Gore: Analiza procesa i efekata upotrebom modela za prognozu
zivotnog vijeka aerosola
(Projektni elaborat)**

*Slobodan Nickovic, naucni istrazivac,
Euro–Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics (ICoD), Malta*

Malta, april 2004.

Ugovor br. 01-2487 sa Republickim hidrometeoroloskim zavodom,
Podgorica

Aerosol mineralnog porijekla iz Sahare transportovan na podrucje Crne Gore: Analiza procesa i efekata upotrebom modela za prognozu zivotnog vijeka aerosola

Slobodan Nickovic, naucni istrazivac,

Euro–Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics (ICoD), Malta

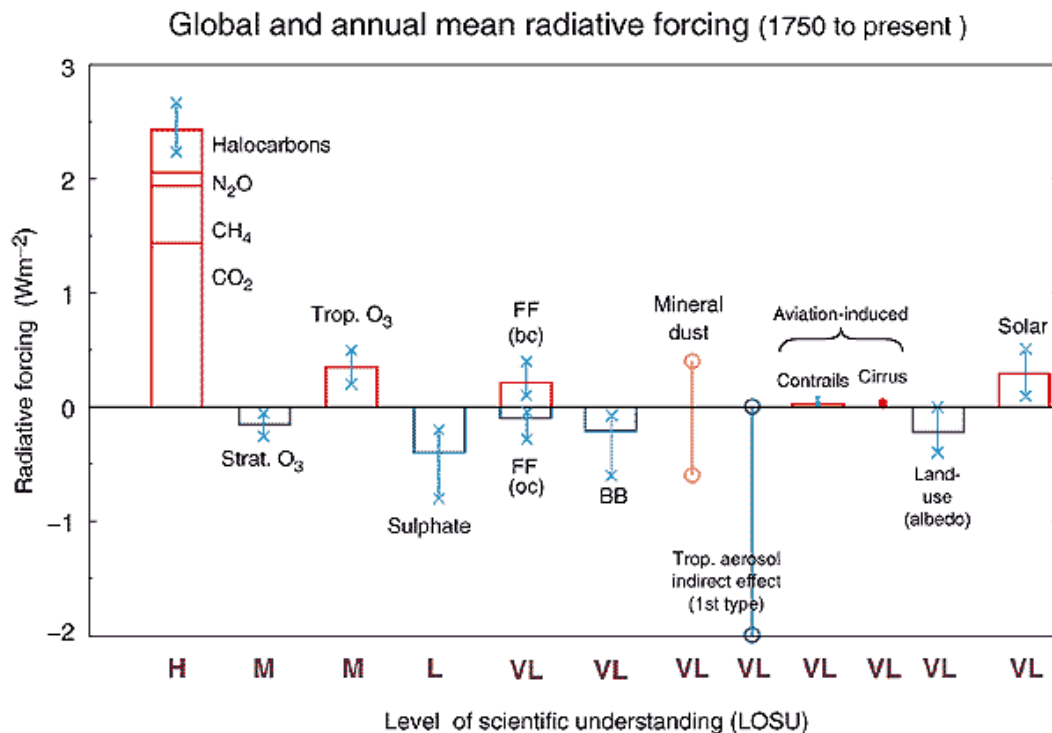
UVOD

Velike kolicine mineralnog aerosola (peska i pustinjske prasine) se pod pogodnim vremenskim uslovima unose u atmosferu iz pustinskih krajeva. Iako tacnije procene ovih kolicina jos uvek nisu potpuno pouzdane, smatra se da se godisnji unos krece od nekoliko stotina do nekoliko hiljada megatona (*Dulac et al, 1992; Tegen i Fung. 1994*).

Do pre desetak godina, smatralo se da pustinjska prasina nema znacajnijeg uticaja na zivotnu okolinu i klimu. Saznanje se u tom smislu u skorije vreme drasticno menja. Naime, razvoj satelitskih tehnika za detekciju atmosferskog aerosola kao i druga merenja, ukazuju da aerosol moze znacajnije da promeni radijacione osobine atmosfere, narocito u oblastima kao npr. Mediteran koje su skoro permanentno eksponirane uticaju pustinjske prasine. Nasuprot efektima povecanje kolicine gasova ‘zelene baste’ koji generalno imaju tendenciju da zagrevaju atmosferu, cini se da mineralni aerosol ima tendenciju hladenja atmosfere. Naime, skorasnje studije (*Tegen i Fung 1994; Li i dr., 1996*) pretpostavljaju da su efekti ove dve grupe supstranci poredive ali suprotnog znaka. U vidljivom delu spectra aerosol absorbuje manji deo solarne energije, a veci deo se rasipa i vraca u Kosmos. Ova kvalitativna procena medjutim ostavlja otvorenim pitanje ukupnog radijacionog efekta mineralnog aerosola. IPPC izvestaj za 2001 ukazuje na znacajne efekte aerosola na klimu, ali istovremeno upozorava na cinjenicu da je taj klimatski efekat aerosola jos uvek najmanje istrazen (Slika 1.).

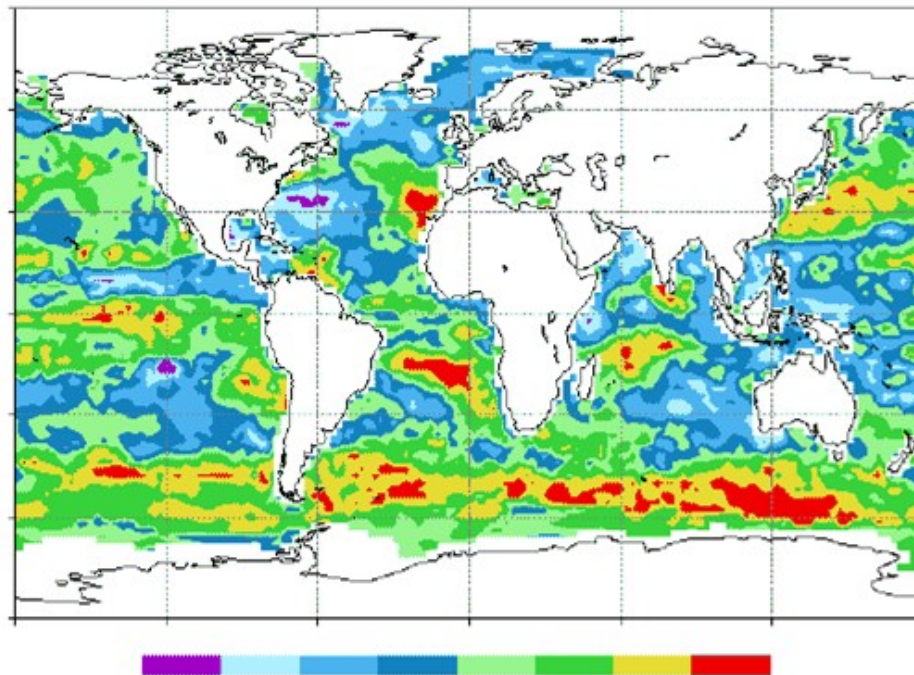
Pored radijacionih, postoje brojni drugi efekti koje pustinjska prasina izaziva. Pod određenim uslovima, i nakon deponiranja na površinu mora, prasina i jedinjenja gvozdja i fosfora koje sadrzi, mogu da iniciraju komplekni biohemijski process (Martin i

Fitzwater, 1998), koji rezultira u ‘cvetanju’ mora (razvoj algi). Iako jos uvek nedovoljno kvantifikovan i demonstriran ujticaaj mineralnog aerosola na biohemijske procese u moru, nedavnim istrazivanjem izracunata je korelacija boje okeana (koja je indikator prisustva algi) i depozicije pustinske prasine izracunate tokom jednogodisnje egzekucije NASA globalnog modela prasine (Erickson, D., J. Hernandez, J. et al., 2001). Slika 2 pokazuje visok stepen korelacije izmedju mineralnog aerosola i boje mora u mnogim delovima svetskog okeana.



Slika 1. Radijaciono forsiranje prema izvestaju IPCC (2001); Mineralna prasina je oznacena kao komponenta ciji se uticaj najmanje poznaje

Takodje, kao rezultat atmosferskih hemijskih reakcija, tzv. kisele kise koje nastaju kao posledica industrijskog zagađenja, bivaju neutralizirane prisustvom mineralnog aerosola (Hedin i Likens, 1996). Nadalje, u oblastima koje su u blizini pustinja, povišene koncentracije prasine mogu znacajno da smanje kvalitet vazduha i da tako uticu na zdravlje populacije. Posledice ovakvih uticaja su povecan broj slucajeva astme i drugih bolesti disajnih organa, infekcije oci i alergije.



Slika 2. Korelacija izmedju boje mora i depozicije pustinjske prasine

S obzirom na relativno malu geografsku udaljenost od Saharskih izvora, Crna Gora je povremeno izložena uticaju pustinjske prasine. Transport veće količine pustinjske prasine se povremeno manifestuje u obliku žute kise. Svakako da kvalitativna iskustva nisu dovoljna da bi se kvantifikovali efekti ovog procesa. Uspostavljena merenja u Crnoj Gori na nekoliko stanica su jedan od izvora informacija koji mogu da pomognu u proceni efekata mineralnog aerosola na ovo područje. Komplementarni način da se takva procena dopuni je upotreba matematičkih modela za transport pustinjske prasine. Danasnji modeli pustinjske prasine, iako neminovno proizvode prognostičke greske, u

najvecem broju slucajeva sa razumnom tacnoscu uspevaju da prognoziraju sve glavne pustinjske oluje i transport koji ih prati (Soderman i Dulac, 1998; Westphal I dr., 2001) .

Kao posledica povecanog interesa naucne i laicke javnosti za proces mineralnog aerosola, nekoliko istrazivackih grupa tokom poslednjih desetak godina intenzivno radi na razvoju numerickih modela za simulaciju i operativnu prognozu transporta pustinjske prasine (Liu i Westphal, 2001; Tegen I Fung, 1996; Nickovic I dr. 2001). Numericki modeli se koriste kao komplementarni metod osmatranjima u istrazivanju aerosola. Za razliku od ustanovljene operative merenja i razmene atmosferskih parametara u okviru GTS sistema Svetske meteoroloske organizacije, praksa merenja mineralnog aerosla je jos uvek na pocetku a mreza osmatranja nedovoljne gustine da detaljnije opise zivotni ciklus ove pojave. U tom smislu, informacija dobijena modelima znacajno ublazava nedostatak operativnih osmatranja. Prognoze prasine danasnjim modelima kada se uporede sa raspolozivim osmatranjima pokazuju relativno visok nivo pouzdanosti.

U ovoj studiji je koriscen jedan od takvih modela za prognozu produkcije transporta i depozicije pustinjske prasine, tzv. DREAM model - Dust Regional Atmospheric Model (Nickovic and Dobricic, 1996; Nickovic et al., 1997a, 1997b, 2001). *Cilj ove studije* je da se analiziraju procesi Saharskog aerosola i kvantifikuju njegovi efekti na podrucju Crne Gore upotrebom modela DREAM. Studija se zasniva na analizi arhive operativnih prognoza pustinjske prasine u jednogodisnjem periodu januar - decembar 2002. U okviru studije, sacinjen je katalog slucajeva povecanog transporta i depozicije Saharske prasine iznad Crne Gore i analizirana njihova ucestalost. Takodje, analizirana je prostorna i vremenska varijabilnost procesa. Nadalje, odredjene su vrednosti akumulirane vlazne i suve depozicije iznad mora i kopna Crne Gore. U slucajevima transporta aerosola, izracunate su ekstremne vrednosti prizemne koncentracije. Ovi rezultati studije omogucuju procenu mogucih efekata prasine na zdravlje populacije kao i radijacione efekte u atmosferi iznad Crne Gore. Najzad, studija sadrzi detaljan opis naucnih metoda i tehnika primenjenih u modelu, kao i opis operativnog sistema koji omogucuje primenu modela za operativnu prognozu pustnjske prasine.

DREAM MODEL

DREAM model je razvijen zahvaljujuci podrsci nekoliko projekata Evropske Unije u periodu 1996-2003 (projekti MEDUSE, SKIRON, ADIOS-NAS I EARLINET-NAS). Ovaj model je prvi operativni regionalni model koji je uspesno primenjen za prognozu pustinjske prasine. U okviru Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics (ICoD), Malta, model se trenutno dalje razvija. Takodje se koristi u istrazivacke i/ili opertivne svrhe u nekoliko drugih institucija: u SAD, Izraelu, Italiji, Turskoj, Grckoj, Egiptu i Sudanu.

DREAM model je integrisan u strukturu atmosferskog modela NCEP/Eta (Janjic, 1977; Janjic, 1984; Janjic, 1990; Janjic 1994; Janjic 1996,a, b; Janjic 1997). Dizajniran je tako da se poziva kao jedan od pod-programa atmosferskog NCEP/Eta modela. Ovakav pristup omogucuje da se DREAM egzekutira simultano sa atmosferskim modelom, koristeći u svakom iteracionom vremenskom koraku sve neophodne prognozirane parametre atmosferskog modela. Ovim se postize mnogo veca tacnost u prognozi aerosola nego kod tzv. off-line aerosol modela koji svoje izracunavanje realizuju naknadno, posto se atmosferska prognoza završi.

Zivotni ciklus pustinjske prasine je opisan jednačinom kontinuiteta za koncentraciju aerosola:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = -u \frac{\partial C_k}{\partial x} - v \frac{\partial C_k}{\partial y} - (w - v_{gk}) \frac{\partial C_k}{\partial z} - \nabla \cdot (K_H \nabla C_k) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_Z \frac{\partial C_k}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial C_k}{\partial t} \right)_{source} + \left(\frac{\partial C_k}{\partial t} \right)_{sink} \quad (1)$$

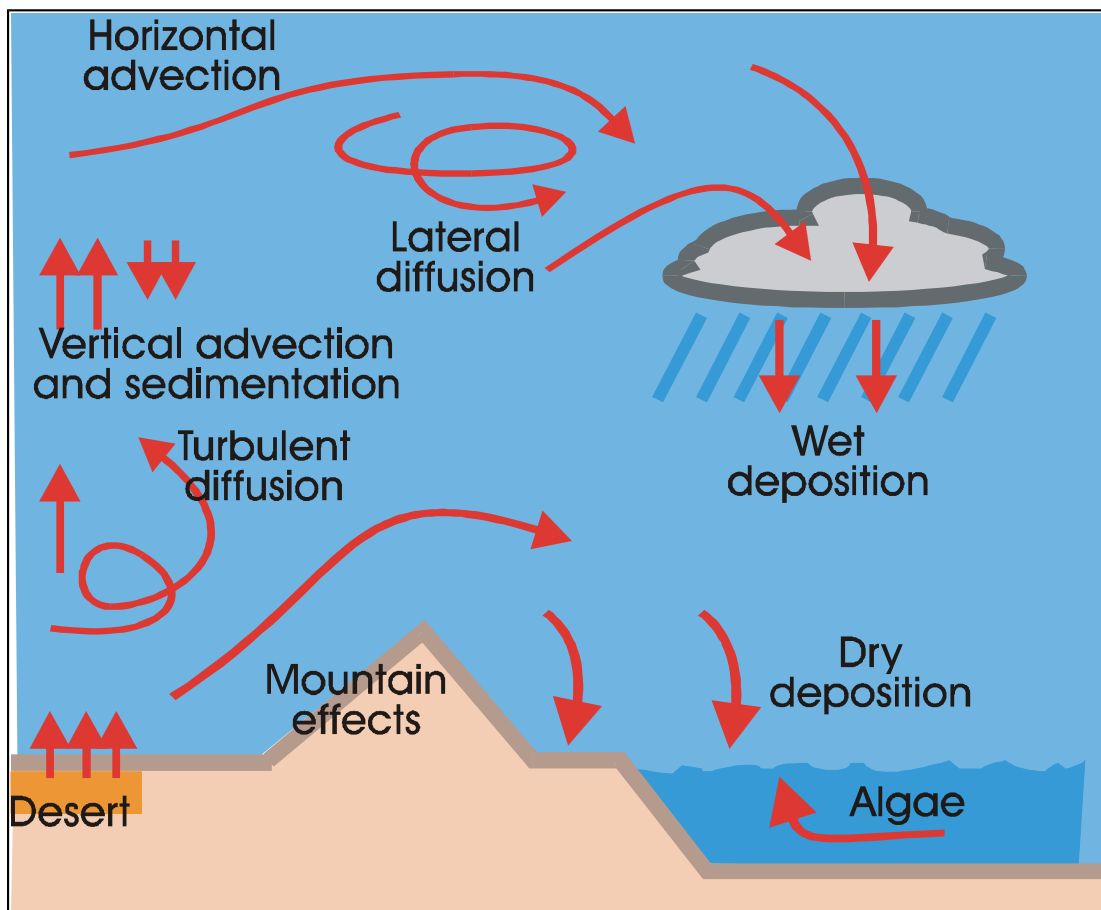
U jednačini (1), indeks k oznacava broj delica aerosola odredjenog poluprecnika. Koncentraciju u modelu sacinjavaju cetiri klase delica cije poreklo vodi od gline, mulja (cestice vecih i manjih dimenzija) i pesak. Simboli u i v oznacavju komponente horizontalne brzine, w vertikalnu brzinu, C_k je koncentracija k -te klase, ∇ je horizontalni nabla operator, K_H je koeficient bocne difuzije, K_Z je koeficient turbulentnog mesanja, $\left(\frac{\partial C_k}{\partial t} \right)_{source}$ i $\left(\frac{\partial C_k}{\partial t} \right)_{sink}$ su izvori i ponori pustinjske prasine. Ukupna koncentracija je otezana srednja vrednost koncentracija K klasa:

$$C = \sum_{k=1}^K \delta_k C_k; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_k = 1 \quad (3)$$

Ovde δ_k oznacava frakciju mase k-te kategorije delica; taj factor ce biti kasnije objasnjen.

Sematski prikaz ciklusa pustinjske rasine u atmosferi je prikazan na slici 3.



Slika 3. Zivotni ciklus pustrinjskog aerosola

Modeliranje izvora

Erozija tla vetrom je kontrolisana sledecim faktorima: (1) vrstom tla, (2) vrstom billnog pokrivaca, i (3) turbulentnim mesanjem u prizemnoj atmosferi.

Produkcija koncentracije mineralnog aerosola se racuna kroz sledece tri faze:

- Tacke mreze modela koje imaju ulogu potencijalnih izvora se odredjuju iz globalnog seta podataka o biljnom pokrivicu. Kategorije pustinja i polupustinja se proglašavaju buducim izvorima i prevode iz originalne globalne mreze u mrezu modela. Frakcija pripadajuće oblasti jedne racunske tacke modela pokrivene pustinjom se izracunava pomocu

$$\alpha = \frac{\text{broj pustinjskih tacaka u pripadajucoj oblasti}}{\text{ukupan broj tacaka biljnog pokrивaca u pripadajucoj oblasti}} \quad (4)$$

- Globalni set podataka o teksturi zemljista se prevodi u tacke mreze modela. Za svaku klasu tekture se procenjuju frakcije β delica gline, sitne i krupne cestice koje poticu od mulja i cestice peska.
- Definisu se katakteristican poluprecnih i gustina za cetiri kategorije delica. Procenjuje se odnos γ pokretne mase delica prema njihovoj ukupnoj masi (Tegen i Fung, 1996).
- Kombinacija faktora α , β i γ se korisiti da bi se izracunao faktor produktivnosti aerosola δ .

Za odredjivanje produktivnosti aerosola, koriste se setovi podataka relativno visokog horizontalnog razlaganja za teksturu i biljni pokrивac . Istovremeno, ovi podaci se koriste za seme prizemnih procesa i u atmosferskom NCEP/Eta modelu. Maska M koja odredjuje koje su tacke modela pustinjske, odredjuje se kao sto je tp pokazano u Tabeli 1.

Tabela 1. Maska modela koja opisuje produktivnost aerosola izvedena iz seta podataka Olson World Data Set

Broj koda	Vrsta biljnog pokrивaca	Maska modela M
8	Pustinja, golo stenje, glina	1.0
50	Pescana pustinja i pustinjska dina	1.0
51	Polupustinja, sporadicno bilje	0.5
52	Polupustinja, stepa	0.5
Ostalo	/	0

Da bi se odredile teksturne klase zemljista koje zahteva NCEP/Eta model, koriste se dva seta podataka. Prvi je Staub i Zobler globalni set tekstura zemljista, sa razlaganjem od jednog stepena sa 7 teksturnih kategorija; drugi, UNEP/GRID FAO/UNESCO set za kategorije zemljista, koji je raspoloziv u globalnoj mrezi od 2 minuta sa 134 legende. Radi pronalazenja korespondencije izmedju dva seta, FAO vrednosti se prevode u ZOBLEK kategorije za svaku tacku ZOBLEK mreze. Izborom vrednosti FAO kategorija sa najvecom frekvencijom javljanja, uspostavlja se korespondencija jedan-prema-jedan izmedju dva seta. Na kraju, uspostavlja se veza izmedju ZOBLEK kategorija i takozvanih Cosby kategorija zemljista (Cosby kategorije zahteva NCEP/Eta model) kao sto je to prikazano u Tabeli 2. Relativno ucesce gline, mulja i peska u zemljistu je odredjeno pomcu trougla glina/pesak/mulj, i pritom se mali i veliki mulj se tretiraju na isti nacin (Tegen i Fung, 1994).

Tabela 2. Veza izmedju teksturnih klasa I relativan doprinos gline, mulja i peska

ZOBLEK teksturne klase	Cosby klase zemljista	Glina	Sitan mulj	Krupan mulj	Pesak
gruba	glinast pesak	0.12	0.08	0.08	0.80
srednja	mulj/glina	0.34	0.56	0.56	0.10
fina	glina	0.45	0.30	0.30	0.25
gruba-srednja	pescani glina	0.12	0.18	0.18	0.70
gruba-fina	pesak glina	0.40	0.10	0.10	0.50
srednja-fina	glina loam	0.34	0.36	0.36	0.30
gruba-srednja-fina	Pescana glina mulj	0.22	0.18	0.18	0.60

Slika 4. ilustruje geografsku raspodelu izvora pustinjske prasine izracunate na osnovu podataka o pokrivenosti tla.

Raspodela velicine/mase delica

Totalna masa delica koja posle pokretanja sa podloge ulazi u atmosferu veoma zavisi od raspodele velicine delica. Model u sadasnjoj verziji ima $K = 4$ kategorije velicine delica. Delice cineelementi pustinskog zemljista sacinjenog od gline, sitnog i krupnog mulja, i peska. Za svaku od kategorija k , odredjuju se karakterisitcan poluprecnik (R_k), gustina (ρ_k) i odnos mase delica raspolozivih za pokretanje sa podloge

u odnosu na ukupnu masu delica (γ_k) [Tegen and Fung, 1994], kao sto je pokazano u Tabeli 3.

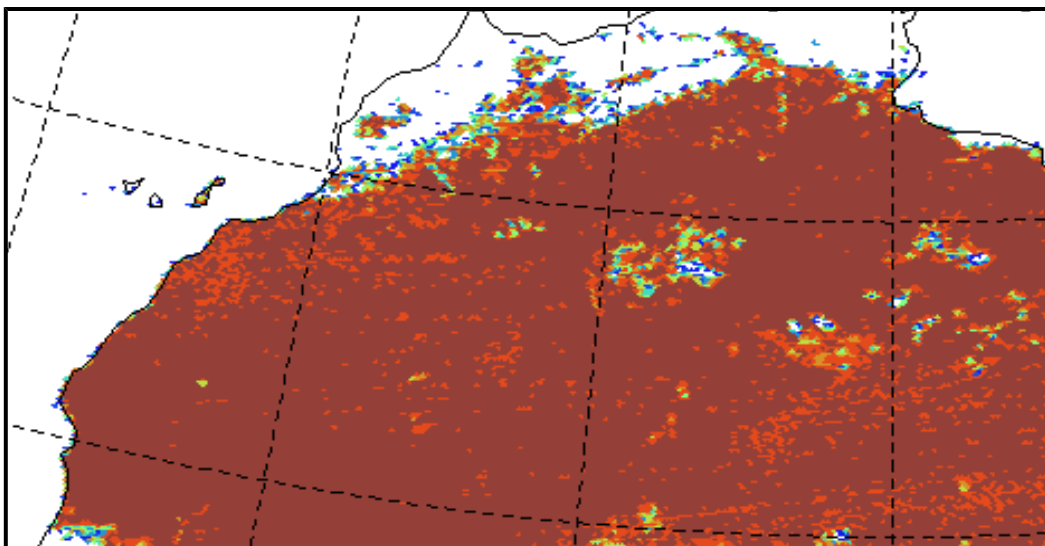
Tabela 3. Osobine delica prasine

k	Tip	Karakterisitican <i>poluprecnik</i> $R_k (\mu m)$	Gustina $\rho_{pk} (g\ cm^{-3})$	γ_k
1	Glina	0.73	2.50	0.08
2	Sitan mulj	6.1	2.65	1.00
3	Krupan	18	2.65	1.00
	mu			
	lj			
4	Pesak	38	2.65	0.12

Procenjuje se da je masa delica gline 1-2 reda velicine manja od mase ostalih delica ciji se radijus krece od 1 – 10 μm . Tegen i Fung [1994] pretpostavljaju da je frakcija gline raspoloziva za eroziju u intervalu 0.02 – 0.17. U modelu DREAM, korisiti se $\gamma_1 = 0.08$.

Poluprecnik delica sitnog mulja se krece od 1 – 25 μm . Delici manji od 10 μm se vraćaju na podlogu uglavnom putem vlažne i suve depozicije i turbulencijom. Delici veci od 10 μm se deponuju gravitacionim mehanizmima. Da bi se ovi efekti razdvojili, delici mulja su podeljeni na sitan (1 –10 μm) i krupan (10 – 25 μm) mulj. Uvedena je pretpostavka da za obe vrste mulja vazi ista erodibilnost $\gamma_2 = \gamma_3 = 1$.

Sa zivotnim vekom od oko jednog casa, delici peska prakticno ne ucestvuju u transportu prasine na velike distance. Medjutim, modeliranje transporta peska moze biti od znacaja za simulaciju lokalnog premestanja pescanih dina. U modelu se erozija peska predstavlja vrednoscu $\gamma_4 = 0.12$.



Slika 4. Izvori pustinjske prasine iznad dela Sahare izvedeni iz podataka o pokrivenosti tla

Izracunavanje clana $\left(\frac{\partial C_k}{\partial t} \right)_{SOURCE}$

Pokretanje delica prasine i peska na površini pustinjskog zemljišta je pretežno uzrokovano tzv. procesom bombardovanja [Alfaro, 1997], gde krupniji delici sa poluprecnikom vecim od $20 \mu m$ razbijaju kohezione sile delica na površini i tako omogucuju sitnijim delicima da udju u atmosferu. Broj pokrenutih finijih delica pritom direktno zavisi od transporta atmosferske kolicine kretanja na podlogu. S druge strane, uslovi zemljišta (structura i vlaznost zemljišta, i biljni pokrivac) odredjuju da li i koliko aerosola ce se konacno naci u atmosferi.

U modeliranju produkcije pustinjske prasine postoje uglavnom dva moguca pristupa u odredjivanu donjeg granicnog uslova u jednacini (1): metod površinskog fluksa i metod površinske koncentracije. Metod fluksa se korisiti u vecini danasnjih modela [npr. Westphal et al., 1987; Marticorena i Bergametti, 1995; Tegen i Fung, 1994]. U modelu DREAM se koristi površinska koncentracija kao donji uslov, cime se izracunavanje flukseva konzistentno usaglasava sa izracunavanjem površinskih atmosferskih flukseva u Eta/NCEP modelu u kome se površinski parametri (temperature, vlaznost) uzimaju kao donji granicni uslov.

Proces pokretanja delica sa podloge i odgovarajuci povrinski fluks aerosola zavisi od dve grupe uslova. Jedna grupa se odnosi na strukturu i stanje zemljista. Druga ukljucuje turbulentno stanje prizemne atmosphere.

U naucnoj javnosti ne postoji potpuna saglasnost kako da se opise zavisnost povrinskog fluksa aerosola od brzine trenja. Na primer, Gillette i Passi [1988] smatraju da je vertikalni fluks prasine F_S funkcija brzine trenja koja asimptotski postize cetvrti stepen brzine za njene velike vrednosti:

$$F_S = const \times u_*^4 \left(1 - \frac{u_{*t}}{u_*} \right) \quad za \quad u_* \geq u_{*t}. \quad (5)$$

Ovde je u_* brzina trenja, i u_{*t} njena kriticka vrednost ispod koje prestaje produkcija prasine.

Tegen i Fung [1994] koriste drugaciju zavisnost za vertikalni fluks:

$$F_S = const \times u_*^2 (u_* - u_{*t}) \quad za \quad u_* \geq u_{*t}. \quad (6)$$

Prema studiji Shao i dr.. [1993] zasnovanoj na eksperimentima u wind tunelu, sledeca relacija se predlaze za istu svrhu:

$$F_S = const \times u_*^3 \left[1 - \left(\frac{u_{*t}}{u_*} \right)^2 \right] \quad za \quad u_* \geq u_{*t}, \quad (7)$$

U modelu DREAM, (7) je polazna relacija za uvodjenje novog metoda za parametrizaciju produkcije prasine. Efekti podloge i raspodela velicine delica se opisuju parametrima α , β , and γ [videti Tabele 2. and 3.]. Faktor produktivnosti se definise kao:

$$\delta_k = \alpha \gamma_k \beta_k. \quad (8)$$

Ovde, k oznacava kategoriju delica. Uticaj teksture tla je ukljucen u β . Efektivni povrinski fluks prasine se definise kao:

$$F_{Sk}^{EFF} = \delta_k F_S. \quad (9)$$

S druge strane, površinska koncentracija se može izraziti preko vrednosti vertikalnog fluksa [Nickling i Gillies, 1989] na sledeći način:

$$C_{Sk} = \text{const} \times \frac{F_{Sk}^{EFF}}{ku_*}. \quad (10)$$

Izraz (10) je izveden pod pretpostavkom da je atmosfera neutralna.

Kombinovanjem (7)-(10), površinska koncentracija može da se izračuna kao:

$$C_{Sk} = c_1 \times \delta_k u_*^2 \left[1 - \left(\frac{u_{*tk}}{u_*} \right)^2 \right] \quad \text{za} \quad u_* \geq u_{*tk}. \quad (11)$$

Vrednost dimenzionalne empirijske konstante $c_1 = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-5} \text{ kg s}^{-2}$ je određena a posteriori u eksperimentima sa modelom. Zavisnost kritične brzine trenja od veličine delica se opisuje u poglavlju koje sledi.

Kritična brzina trenja

Kritična brzina trenja pri kojoj erozija tla započinje veoma zavisi od vlažnosti tla i veličine delica. Vlažnost tla povećava kritičnu brzinu trenja, smanjujući tako količinu praskine koja ulazi u atmosferu. Voda u tlu opstaje zahvaljujući kapilarnim silama i zbog molekularne adsorpcije. U modelu DREAM, efekti vlažnosti tla na u_{*t} se određuju na osnovu metoda koji su predložili Fecan i dr. [1999]. Maksimalni iznos adsorbovane vode w' je rastuća funkcija sadržaja gline u tlu određena empirijskim putem:

$$w' = 0.0014(\%gline)^2 + 0.17(\%gline). \quad (12)$$

Kombinovanjem (12) and β_k iz Tabele 2, određuje se veza između w' i sedam tekstura tla koje se koriste, prikazana u Tabeli 4. Fecan i dr. [1999] definišu the kritičnu brzinu u (11) kao:

$$\begin{aligned} u_{*tk} &= U_{*tk} & \text{za } w \leq w' \quad (\text{suvo tlo}) \\ u_{*tk} &= U_{*tk} \sqrt{1 + 1.21(w - w')^{0.68}} & \text{za } w > w' \quad (\text{vlazno tlo}) \end{aligned} \quad (13)$$

Ovde je w aktualna vlaznost tla prognozirana atmosferskim modelom. Prema Bagnold-u [1941], zavisnost kritične brzine od velicine delica se definiše kao:

$$U_{*tk} = A_k \sqrt{2gR_k \frac{\rho_{pk} - \rho_a}{\rho_a}}, \quad (14)$$

Ovde je g gravitaciono ubrzanje, ρ_{pk} i ρ_a su gustina delica i vazduha, redom.

Parametar A_k je funkcija Reynolds-ovog broja $(Rr)_{pk} = \frac{2R_k U_{*tk}}{\nu}$; $\nu = 0.000015 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

je molekularna difuzivnost za kolicinu kretanja. Za cetiri kategorije delica u modelu, zadaju se vrednoosti $A_k = \{1, 0.7, 0.4, 0.25\}$ na osnovu raspolozivih empirijskih podataka [White, 1979].

Iako Bagnoldova relacija za kritičnu brzinu trenja ne predviđa fluks ispod vrednosti U_{*tk} , osmatranja ukazuju da u slucaju opadanja u_* , erozija tla se ne zaustavlja trenutno vec traje jos neko vreme pod sub-kriticnim uslovima [Jackson, 1996]. Ovo se objasnjava inercijom procesa, cime transport opstaje izvesno vreme iako je dostignuta kritična vrednost brzine. Ovi inercijalni efekti su takodje ukljuceni u model.

Efekti viskoznog podsloja

U Eta/NCEP modelu postoje dva sloja koja su odgovorna za kontrolu površinske razmene na površini okean-atmosfera: prvi, tanak viskozni podsloj tik iznad površine vode u kome se razmena toplote, vlaznosti i kolicine kretanja obaslja molekularnom difuzijom; drugi je sloj iznad viskoznog u kome su fluksevi razmene odredjeni

turbulentnim mesanjem [Janjic, 1994]. Osobine viskoznog podsloja su određene različitim režimima strujanja vazduha uz granicnu površinu.

Posto postoji fizicka slicnost u razmeni mase, toplote i kolicine kretanja iznad razlicitih površina sa pokretnim elementima, kao sto su površine sa talasima, snegom i pustinjskom prasinom [Chamberlain, 1983; Segal, 1990], pomenuti model viskoznog sloja je primenjen i za koncentraciju prasine. Koristeci analogiju sa atmosferskim izracunavanjem flukseva, član produkcije/izvora u jednacini (1) je predstavljen kao

$$\left(\frac{\partial C_k}{\partial t} \right)_{SOURCE} = - \frac{F_{Sk}}{\Delta z} \quad . \quad (15)$$

Ovde je Δz dubina poslednjeg sloja u modelu, k je indeks koji oznacava kategoriju velicine delica, a F_{Sk} je turbulentni fluks koncentracije prasine iznad viskoznog podsloja. S druge strane, turbulentni fluks moze da se izracuna koriscenjem parametara viskoznog podsloja kao:

$$F_{Sk} = \nu \frac{C_{0k} - C_{Sk}}{z_c} \quad . \quad (16)$$

Indeks 0 oznacava vrednosti na granici izmedju viskoznog podsloja i turbulentnog sloja; indeks S oznacava vrednosti na podlozi. Dubina viskoznog podsloja se aproksimira sa

$$z_c = \frac{0.35 M R r^{0.25} S c^{0.5} \nu}{u_*} \quad . \quad (17)$$

Ovde je M parametar koji se menja za razlicite turbulentne rezime, a u_* je brzina trenja. Reynoldsov broj hrapavosti Rr i Schmidov broj Sc su definisani sa

$$Rr = \frac{z_0 u_*}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{\lambda}, \quad (18)$$

gde je λ difuzivnost delica, a $z_0 = \max \left(0.018 \frac{u_*^2}{g}, 1.59 \times 10^{-5} \right)$.

Koristeci metod Janjica [1994], uvedena je pretpostavka da viskozni podsloj za transport prasine vazi za sledece rezime iznad pokretnih površina: a) glatki i prelazni rezim, b) hrapav i c) veoma hrapav. Njihove su karakteristike odredjene turbulentnim stanjem opisanim sa Rr (sto je takodje ekvivalentno u_*). Uvodi se pretpostavka da prelaz izmedju rezima nastaje za vrednosti $u_{*r} = 0.225 \text{ m s}^{-1}$ and $u_{*s} = 0.7 \text{ m s}^{-1}$. Parametar M je definisan sa $M = 30$ za prvi rezim i $M = 10$ za ostale, a ove vrednosti su odredjene merenjima.

Difuzivnost delica λ je mnogo puta manja od V [Businger, 1986]. U eksperimentima sa wind tunelom [Chamberlain et al., 1984] u kome su korisцени sinteticki delici precnika $0.65\mu\text{m}$, odredjene su sledece vrednosti difuzivnosti delica: $\lambda = 4.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ za glatke i prelazne površine, i $\lambda = 3.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ za hrapave površine. Ove dve vrednosti se koriste i u nasem modelu. Podaci o λ za treci rezim nedostaju pa se uzima vrednost $\lambda = 7.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Objasnimo sada kako se fluksevi prasine racunaju pod razlicitim rezimima strujanja. U rezimu glatkih površina viskozno mesanje dominira nad turbulentnim u formiranju površinskih flukseva u razmeni materije i energije izmedju podloge i atmosfere. . Kada u_* predje kriticni vrednost u_{*r} , tog momena rezim glatke površine prestaje da funkcioniše, i strujanje prelazi u rezim hrapave površine. Tada viskozni podsloj za kolicinu kretanja prestaje da radi, dok su podslojevi za flukseve ostalih velicina (toplota, vlaznost, prasina) jos uvek aktivni, sve dok se ne dostigne druga kriticka vrednost, tj. u_{*s} . Tog momenta, hrapavi rezim prelazi u veoma hrapavi i turbulentno strujanje postaje potpuno razvijeno. Viskozni podslojevi skalarnih velicina ovde prestaju da funkcionišu.

Izraz (16) moze da se predstavi i na drugi nacin. Kada se umesto velicina viskoznog mesanja uvedu parametri koji vase za turbulentnu razmenu, tada se na gornjoj površinu viskoznog sloja fluks (16) moze izracunati kao:

$$F_{Sk} = K_s \frac{C_{LMk} - C_{0k}}{\Delta z} . \quad (19)$$

K_s je površinski koeficient turbulentnog mesanja za koncentraciju, a LM označava najniži računski nivo modela. Pretpostavljamo da je K_s ekvivalentno koeficientima za vlažnost i toplotu. Koeficienti površinskog mesanja se inače u atmosferskom modelu izračunavaju na osnovu metoda Monina i Obukhova [Janjić, 1996b].

Na vrhu podsloja, fluksevi (16) i (19) moraju da budu jednaki kako bi se zadovoljio zahtev za kontinualnošću koncentracije. Kao posledicu imamo:

$$C_{0k} = \frac{C_{Sk} + \omega C_{LMk}}{1 + \omega}. \quad (20)$$

Ovde

$$\omega = \frac{\left(\frac{K_s}{\Delta z} \right)}{\left(\frac{\lambda}{z_c} \right)}, \quad (21)$$

ima ulogu težinskog faktora u jednačini (20). Iz (19) i (20), površinski fluks se izračunava kao:

$$F_{Sk} = K_s^* \frac{C_{LMk} - C_{Sk}}{\Delta z}. \quad (22)$$

gde je C_{Sk} definisano sa (11), a

$$K_s^* = \frac{1}{1 + \omega} K_s \quad (23)$$

je koeficient mesanja iz teorija slicnosti, samo što je u našem slučaju korigovan viskoznim efektima.

Konvektivni mesanje u odsustvu smicanja vetra sa visinom

Dosadasnje razmatranje se odnosilo na uslove strujanja kod kojih postoji smicanje vetra, pa shodno tome i turbulentno mesanje. U pustinskim uslovima, međutim, može se

u uslovima pregrejane podloge pojaviti jako uzlazno kretanje i u pocetnom odsustvu smicanja vetra sa visinom. Ovakve lokalne cirkulacione structure mogu da pospese razmenu prasine u vertikalnom pravcu. U takvim slucajevima se povrinski fluksevi racunaju drukcije od (22).

Zilitinkevich i dr. [1998] su predložili metod koji se odnosi na ovu kategoriju mesanja. U odsustvu smicanja vetra, brzina trenja postaje jednaka nuli sto uzrokuje pojavu singulariteta u izracunavanju povrinskih flukseva u tradicionalnom pristupu kao sto je npr. teorija Monina i Obukhova. Da bi se otklonila ova teskoca, metod Beljaarsa [1994] je primenjen u Eta/NCEP modelu tako sto se turbulentna kineticka energija koriguje uzimajuci u obzir parameter turbulentnog mesanja vecih turbulentnih elementa u slobodnoj atmosferi [Janjic, 1996b]. Na taj nacin se spreca da brzina trenja postane nula. Prema Beljaarsovom metodu, povrinski fluks potiska $(\overline{w'T'})_s$ se koristi da bi se izracunala turbulentna kineticka energija vetra pri površini:

$$U_B^2 = (1.2 \times W^*)^2, \quad (24)$$

gde je razmer konvektivne brzine definisan sa

$$W^* = \left[\frac{1}{273} \times gh(\overline{w'T'}) \right]^{1/3}. \quad (25)$$

Ovde je h dubina konvektivnog granicnog sloja. U praksi, Beljaarsova korekcija se racuna tako sto se vrednost U_B dodaje vrednosti vetra na gornjoj granici povrinskog sloja.

Umesto Beljaarsove korekcije, u DREAM je uveden metod Zilitinkevicha i dr. [1998] za slucajeve odsustva smicanja vetra kada je podloga pregrejana. Vodjeno potiskom, formira se strujanje sa jakom konvergencijom pri tlu i zancajnim uzlaznim kretanjem iznad. Takvo kretanje se karakterise takozvanom ‘minimalnom brzinom trenja’ U_* i ‘minimalnom duzinom Monin i Obukhova’ L_* . Rezultujuci konvektivni fluks prasinese izracunava pomocu ‘aerodinamickog’ koeficienta mesanja

$$K_{AC} \equiv \frac{F_s}{U_* \Delta C_A}, \quad (26)$$

Izraz (26) vazi za prilicno širok opseg turbulentnih uslova, tj. za $10^{-10} \leq z_{0u} / h \leq 10^{-5}$. Ovde je z_{0u} visina hrapavosti za kolicinu kretanja. ‘Aerodinamicki dodatak’ za koncentraciju se definise kao

$$\Delta C_A \equiv C_{AS} - C_{LM} = \left(C_S - \frac{F_C}{\kappa U_*} \ln \frac{z_{0u}}{z_{0C}} \right) - C_{LM}, \quad (27)$$

gde je $\kappa = 0.4$ von Karmanova konstanta, C_{LM} koncentracija na najnižem nivou modela, C_S je površinska koncentracija definisana sa (11), i C_{AS} koncentracija koja je logaritamski ekstrapolisana naniže na visinu $z = z_{0u}$. Prateći metod Zilitinkevicha i dr. [1998], uvode se sledeće pretpostavke:

$$\frac{U_*}{W_*} = 0.36 \left(\frac{z_{0u}}{h} \right)^{0.1}, \quad (28)_1$$

$$K_{AC} = \frac{1}{4.4 \left(\frac{h}{z_{0u}} \right)^{0.1} - 1.5}. \quad (28)_2$$

Ove vrednosti se odlicno slazu sa osmatranjima.

Na kraju, koriscenjem (26), (27) i (28), površinski fluks kada nema smicanja vetra se izracunava kao:

$$F_s = \frac{0.36 \left(\frac{z_{0u}}{h} \right) W_* (C_S - C_{LM})}{\frac{1}{\kappa} \ln \frac{z_{0u}}{z_{0C}} + 4.4 \left(\frac{z_{0u}}{h} \right)^{-1} - 1.7}. \quad (29)$$

Suva depozicija

Proces suve depozicije je parametrizovan koriscenjem metoda Georgi-a [1986]. Ovaj metod ukljucuje depoziciju putem povrinskog turbulentnog mesanja, putem Braunove difuzije, gravitacionim uticajem i uticajem hrapavosti podloge.

Depoziciona brzina v_{dep} se parametrizuje sa:

$$v_{dep} = \frac{1}{\frac{1}{v_{SL}} + \frac{1}{f_{B0} v_{IL}}} . \quad (30)$$

Ovde je v_{SL} brzina turbulentne depozicije, u sloju izmedju z_s i 10 m; v_{IL} je brzina turbulentne depozicije na vrhu viskoznog podsloja z_s , i f_{B0} je empirijska konstanta. Brzina v_{SL} se izracunava sa

$$v_{SL} = C_{D10} U_{10} \frac{\sqrt{C_{D10}}}{\sqrt{C_{D0}} - \sqrt{C_{D10}}} , \quad (31)$$

gde su $C_{D10} = \frac{u_*^2}{U_{10}^2}$ and $C_{D0} = \frac{u_*^2}{U_{z_s}^2}$ koeficijenti trenja i U_{10} and U_{z_s} brzine koje vase na visinama $z=10\text{ m}$ i z_s redom.

Brzina v_{IL} se izracunava kao

$$v_{IL} = G \sqrt{C_{D10}} u_* . \quad (32)$$

Funkcija G [Georgi, 1986] odrazava osobine delica (velicina, sastav) i površine na koju se delici deponuju (hrapavost, tekstura, pokrivenost tla). G se izracunava pomocu

$$G = \frac{B_{St}}{\sqrt{C_{D0}}} , \quad (33)$$

gde je B_{St} Stanton-ov broj za delice prasine. U isto vreme, G se predstavlja kao zbir doprinosa od Braunovog mesanja, intercepcije and impakcije [Slinn, 1982]:

$$G = G_{BD} + G_{int} + G_{imp} . \quad (34)$$

G je razlicito za dva razlicita rezima strujanja: prvi, za površine sa uslovima koji se krecu od glatkih do hrapavih, i drugi, za površine pokrivene vegetacijom.

Prva vrsta površina uklucuje more, golo zemljiste i led, za koje se uzima $f_{B0} = 1$.

Iznad ovih površina, parametri $\frac{1}{\sqrt{C_{D0}}}$ i G su odredjeni izrazima prikazanim u Tabeli 5.

[Georgi, 1986]. Ovde je $St = \frac{v_g u_*^2}{\nu g}$ Stokes-ov broj, a brzina gravitacione depozicije na najnižem nivou modela je definisana sa

$$(v_{gk}) = \frac{2g\rho_{pk}R_k^2}{9\nu} . \quad (35)$$

$g = 9.8 \text{ m s}^{-1}$ je gravitaciono ubrzanje, R_k i ρ_{pk} su poluprecnik i gustina k -te klase velicine delica, kao sto je dato u Tabeli 3.

Jednacine (30) - (35) i Tabele 3 i 5 potpuno odredjuju depozicionu brzinu v_{dep} .

Za površine pokrivene vegetacijom, parametri i konstante koje se tu koriste su prikazane u Tabeli 6. Iznad površina sa vegetacijom, Georgi [1986] definise

$$G = \sqrt{\frac{\eta}{c_{dm}}} , \quad (36)$$

Ovde je c_{dm} lokalni koeficient trenja koji zavisi od m razlicitih vrsta vegetacija (videti Tabelu 6.) i od η - efikasnosti biljnog pokrивaca da sakuplja delice. Efikasnost sakupljanja se aproksimira sa

$$\eta = \eta_{BD} + \eta_{int} + \eta_{imp} + \eta_s . \quad (37)$$

Indeksi u formuli oznacavaju Braunovo mesanje, zadrzavanje, sabijanje i prikupljanje na malim preprekama na tlu, redom.

Parametar efikasnosti prikupljanja za Braunovo mesanje je dat sa

$$\eta_{BD} = c_{vm} Sc^{-1.3} , \quad (38)$$

gde lokalni koeficient viskoznog trenja c_{vm} zavisi od m razlicitih tipova vegetacije (videti Tabelu 6.).

Parametar efikasnosti prikupljanja kod zadrzavanja zavisi od velcine delica k i odredjen je sa

$$\eta_{int} = \frac{F_k^2}{a} , \quad (39)$$

gde je $F_k = \frac{R_k}{a}$, R_k je poluprecnik k -te klase delica, i $a = 0.5 \text{ mm}$ je srednji radijus prepreke.

Parametar efikasnosti prikupljanja zadrzavanjem na malim vegetacionim elementima je definisan sa

$$\eta_s = A_{sm} F_{sk} \ln(1 + F_{sk}) , \quad (40)$$

gde su $F_{sk} = \frac{R_k}{a_s}$, $a_s = 10 \text{ } \mu\text{m}$. Faktor A_{sm} je odnos izmedju površine malih ‘sakupljaca’ i površine hrapavih elemenata koji zavise od razlicitih vegetacionih tipova m (videti Tabelu 6).

Konacno, parametar efikasnosti prikupljanja sabijanjem se aproksimira sa

$$\eta_{imp} = \frac{St_a^{3.2}}{(St_a + 0.6)^{3.2}}, \quad (41)$$

gde je $St_a = \frac{v_g u_*}{ga}$ Stanton-ov broj iznad vegetacije.

Za depoziciju iznad vegetacije koristi se $f_{BO} = \frac{1}{e^{\sqrt{St_a}}}$. Parametar $\left(\frac{1}{\sqrt{C_{D0}}} \right)_m$ koji zavisi od tipa vegetacije m je određen vrednostima u Tabeli 6.

Najzad, pomocu (38) - (41) i (37), izvodi se sledeci izraz:

$$\eta = c_v Sc^{-1.3} + \frac{F^2}{2} + \frac{St_a^{3.2}}{(St_a + 0.6)^{3.2}} + A_s F_s \ln(1 + F_s). \quad (42)$$

Pomocu (31) – (42), brzina suve depozicije v_{dep} (30) je potpuno podređena. Na kraju, doprinos suve depozicije članu ‘ponora’ u jednačini (1) je izracunat sa

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{SINKddep} = - \left(\frac{C v_{dep}}{\Delta z} \right)^{LM}. \quad (43)$$

Vlazna depozicija

Vlazna depozicija koncentracije se izracunava pomocu kisne vode prognozirane atmosferskim delom modela. U svakoj tacki modela, promena koncentracije sa vremenom je predstavljena sa

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = -\phi \frac{\partial}{\partial z} \left(C \frac{\partial P}{\partial t} \right), \quad (44)$$

Ovde je $\frac{\partial P}{\partial t}$ intenzitet padavina, a koeficient spiranje se smatra konstantnim, tj. $\phi = 5 \times 10^5$. Depozicija na tlu je izracunata sa

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{SINKwdep} = -\phi \left(\frac{C}{\Delta z} \frac{\partial P}{\partial t} \right)^{LM}. \quad (45)$$

Horizontalna advekcija

Numericka sema za advekciju pasivne materije u NCEP/Eta modelu [Janjic, 1997] je konzervativna, odrzva funkciju koja se advektira pozitivnom, i ne proizvodi nove maksimume. To su osobine seme koje upravo zahteva advekcija koncentracije, s obzirom da koncentracija mora uvek da bude pozitivna. Aproksimacija clana advekcije u obliku konacnih razlika se primenjuje na clanove oblika

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{adv} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y}. \quad (46)$$

U prvom koraku seme, primenjuje se uzvodna aproksimacija prvog reda tacnosti. U drugom koraku, anti-difuzioni clan kontrolise iznos difuzije. U jednodimenzionom obliku, advekcija se opisuje sledecom diskretizovanom jednačinom:

$$C_j^{n+1} = C_j^n - \mu \frac{C_j^n - C_{j-1}^n}{\Delta x} - \frac{1}{3} \mu (C_{j-1}^n - 2C_j^n + C_{j+1}^n) \quad (47)$$

Ovde j oznacava indeks mreze tacaka, n vremenski korak, $\mu = c \frac{\Delta t}{\Delta x}$ je Courantov broj c je brzina advekcije (koja se u ovom razmatranju smatra konstantom), a Δx i Δt su koraci u prostoru i vremenu, redom.

Vertikalna advekcija

Konvencionalne numercke za advekciju mogu da negativne vrednosti inace pozitivnih velicina kao sto je koncentracija. Efektivna vertikalna brzina u izracunavanju vertikalne advekcije je algebarski zbir prognozirane atmosferske vertikalne brzine i brzine:

$$W = w - v_g \quad (48)$$

Ovde je gravitaciona brzina v_g izracunate prema Stokes-ovoj formuli:

$$v_{gk} = \frac{2g\rho_{pk}R_k^2}{9\nu} \quad (49)$$

gde je ρ_{pk} gustina delica, R_k poluprecnik delica, ν viskoznost vazduha, i g gravitaciono ubrzanje.

Vertikalna difuzija

U NCEP/Eta modelu, Kolmogorov-Heisenbergova sema turbulentnog zatvaranja se primenjuje [Janjic, 1990; Janjic, 1994; Janjic, 1996b]. Kao rezultat, izracunavaju se koeficienti vertikalnog turbulentnog mesanja koji se dalje koriste da bi se izracunala vertikalna difuzija prognostickih parametara, ukljucujuci i koncentraciju prasine:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{diff}} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (50)$$

Bocna difuzija

Clan bocne difuzije u (1)

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{diff}} = - \nabla (K_z \nabla C) \quad (51)$$

se parametrizuje koriscenjem metoda Smagorinskog gde se koeficijent bocne difuzije modifikovan ukljucivanjem uticaja turbulentne kineticke energije (TKE) [Janjic, 1990] koristi u obliku:

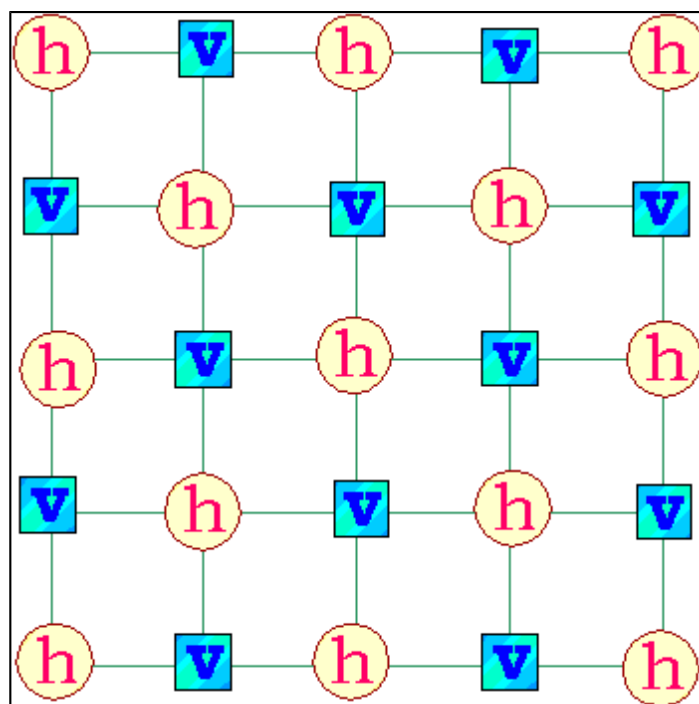
$$K_H = F d_{\min} \sqrt{2(\Delta_x u - \Delta_y v)^2 + 2(\Delta_x u + \Delta_y v)^2 + F' TKE} \quad (52)$$

Ovde su F i F' empirijske konstante, $d_{\min}$ je najmanja veliicna horizontalnog koraka mreze, a operator Δ oznacava konacne razlike racunate u pravcima kako to indeksi oznacavaju.

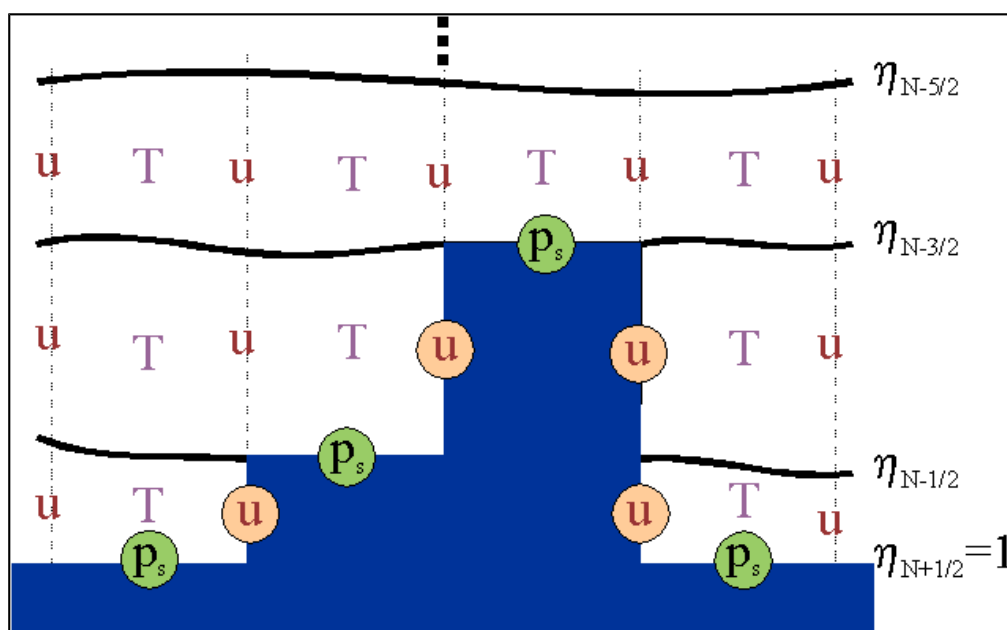
OPERATIVNA POSTAVKA EKSPERIMENTA

Kao sto je vec pomenuto, DREAM model predstavlja u tehnickom smislu, jedan od potprograma atmosferskog NCEP/Eta modela. (Janjic 1974, 1979, 1984, 1990, 1994; Janjic et al. 1988; Mesinger et al. 1988) U svom dinamickom i fizickom delu, NCEP/Eta koristi sledeca numericka resenja:

- polu-razmaknutu E mrezu kombinoivanu sa metodom za sprecavanje resenja na dve podmreze (videti sliku 5);
- economicnu semu rasceplivanja u vremenu; semu za horizontalnu advekciju koja odrzava integralne osobine atmosfere (kvadrat vrtloznosti, kineticku energiju, masu, itd).
- ‘eta’ vertikalni koordinatni sistem i odgovarajuce stepenicasto predstavljanje topografije u modelu (videti sliku 6);
- pozitivnu definitnu semu za horizontalnu advekciju pasivnih supstanci; nelinernu semu za bocnu difuziju; semu za kontrolu divergencije;
- semu za fiziku povrinskih procesa u i na zemljistu;
- seme za prizemnu i turbulenciju u slobodnoj atmosferi;
- seme za padavine kovektivnih i velikih razmera
- semu za fiziku suncevog zracenja u atmosferi.



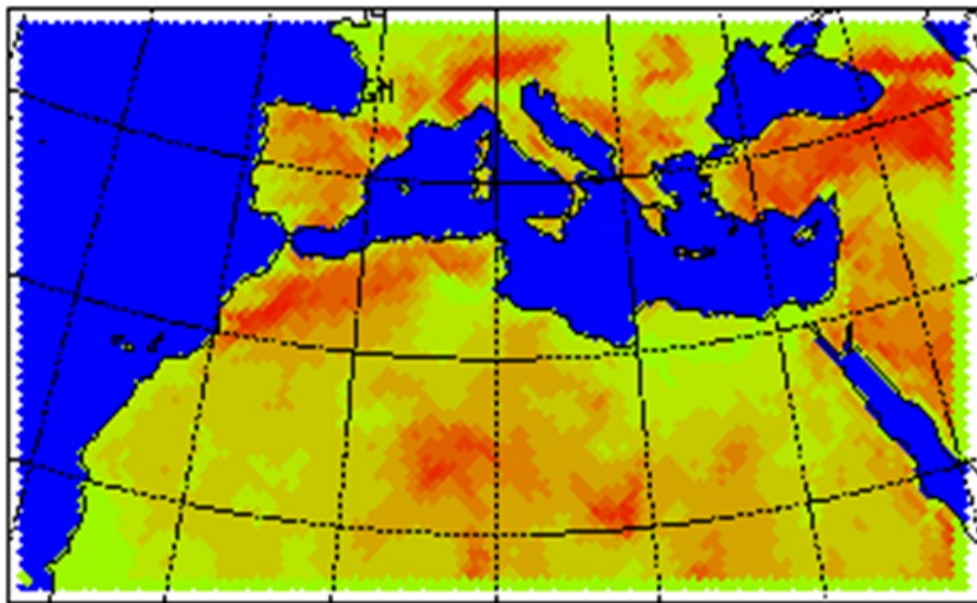
Slika 5. Sematski prikaz horizontalne mreze modela



Slika ?6. Sematski prikaz topografije modela

U eksperimentu cije cemo rezultate kasnije analizirati, izracunate su 24-casovne prognoze vremena i koncentracije prasine pomocu NCEP/Eta I DREAM modela u periodu 1. januar – 31. decembar 2002. Modeli su kao ulazne podatke koristili prognosticke podatke globalnog modela NCEP, Washington, takozvane WAFS podatke

sa razlaganjem od oko 1 stepena u Mediteranu. NCEP podaci su korisni za određivanje početnih i granicnih uslova atmosferskog modela. Novi početni i granicni uslovi su uvedeni svakih 24 casa. S obzirom da operativna merenja koncentracije pustinjske prasinne ne postoje kao sto je to slucaj sa atmosferskim parametrima, za inicijalizaciju koncentracije u modelu je koriscena njena 24-casovna prognoza iz prethodnog dana. Oba modela koriste 24 racunska sloja u vertikalnom pravcu do visine od oko 16 km, kao i horizontalno raslaganje od oko 45 kilometra. Oblast modela pokriva Mediteran i okolna podrucja, kao sto je to pokazano na slici 7.



Slika 7. Oblast i topografija modela

ANALIZA REZULTATA

Model DREAM je prognozirao/simulirao produkciju, transport i depoziciju Saharske prasinne i peska tokom 2002. godine. Zbog nedostatka ulaznih meteoroloskih podataka ili drugih razloga, oko 10% slicajeva nije prognozirano. Procenat nedostajucih slucajeva prognoze je takav da se klimatoloska analiza moze realizovati i izvesti odgovarajuci statisticki proracuni bez znacajnijeg uticaja na konacni rezultat.

Tokom jednogodisnjeg perioda, arhivirana su sledeca polja iz DREAM modela za svaku 24-casovnu prognozu radi njihove naknadne analize:

- 3-dimenzionalna koncentracija aerosola ($\mu\text{g m}^{-3}$)
- 2-dimenzionalni dust load (DL)– masa aerosola u vertikalnom stubu vazduha po jedinici površine (g m^{-2})
- 2-dimenzionalna suva depozicija aerosola (mg m^{-2})
- 2-dimenzionalna vlažna depozicija aerosola (mg m^{-2})

Podaci su arhivirani u originalnim tackama trodimenzionalne mreže DREAM modela. Cilj analize ovih podataka je da se odredi vremenska i prostorna promenljivost parametara aerosola i njihova sezonska varijacija, posvecujuci pritom posebnu paznju raspodeli ovih parametara iznad podrucja Crne Gore. Zbog nedostatka sistematskih operativnih merenja mineralnog aerosola (nasuprot ustanovljenoj praksi rutinskih merenja atmosferskih parametara), danas se jos uvek ne moze pouzdano i kvalitativno utvrditi kolicina pustinskog aerosola koja se transportuje i deponuje izvan oblasti pustinja. Rezultati modeliranja dobijeni u ovoj studiji bar delimicno mogu pruziti informaciju o kumulativnim, klimatskim efektima pustinskog aerosola. Tokom visegodisnje operativne upotrebe DREAM modela (http://www.icod.org.mt/modeling/forecasts/dust_med.htm) i sistematskim poredjenjem njegovih rezultata sa satelitskim podacima SeaWiFS, demonstrirana je njegova sposobnost da uspesno prognozira opticku dubinu aerosola u vecini slucajeva pustinskih nepogoda i transporta velikih razmera. Ova cinjenica ukazuje da se i ostale vrednosti, kao sto je depozicija i prizemna koncentracija za koje ne postoje sistematska merenja, mogu prihvatiti kao dovoljno pouzdani parametri za klimatsko analiziranje.

U tom kontekstu, formiran je katalog mapa koji cine slucajevi povecanog DL sa vrednoscu vecom od 0.05 g m^{-2} iznad podrucja Crne Gore (**KATALOG A: Slucajevi povecanog DL**; videti Prilog).. Broj takvih slucajeva je naveden u tabeli 4. Ukupan broj takvih dana je 88, sto znaci da se 'oblak' pustinskog aerosola javljao prosečno svaki cetvrti dan tokom 2002. godine. Najveci broj takvih dana javlja se prolecnom i letnjem periodu.

Tabela 4. Broj dana sa povecanim DL iznad Crne Gore

MESEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

BROJ DANA	0	4	15	12	22	7	11	8	6	3	0	0
----------------------	---	---	----	----	----	---	----	---	---	---	---	---

Kriterijum za izbor slucajeva povecane koncentracije u tabeli 4. je koriscen kod formiranja priloga KATALOG A. Svaki slucaj takve prognoze je uporedjen sa satelitskim SeaWiFS kartama (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>). SeaWiFS podaci mogu jasno da ukazu prisustvo pustinjskog aerosola iznad morske površine, s obzirom da je boja aerosola znatno svetlija od tamne podloge mora. Iznad kopna, gde su albedo aerosola i podloge slicni, detekcija aerosola nije moguca. Takodje, prisustvo oblacnosti onemogucuje da se aerosol prepozna. U Katalogu nedostaje 9 prognoza izabranih po navedenom kriterijumu jer za takve slucajeve nisu bili raspoloživi SeaWiFS podaci. Pazljivim upoređivanjem prikazanih mapa moze se zakljuciti da je oblik, vreme i prostorna raspodela prognoziranog DL u najvećem broju slucajeva jako dobroj saglasnosti sa satelitskim podacima.

U periodu od 16. do 19. februara, dogodio se slucaj slabijeg transporta pustinjskog aerosola koji se karakterise relativno slabim vrednostima dust load-a. Izvoriste ovih koncentracija je bilo u zapadnom delu Sahare a transport velikih razmera je imao osu jugozapad-severoistok.

Tokom perioda 3-17. marta osmotrena je i prognozirana povecana aktivnost produkcija pustinjskog aerosola. 3. marta se moze uociti izuzetno jak intenzitet transportovanih koncentracija u zapadnom i centralnom Mediteranu. Maksimum koncentracije (3-6 mart) je lociran juznije od Crne Gore, iznad koje DL ne prelazi vrednosti 0.3 g m^{-2} . Od 5-10. marta se javlja druga pustinjska nepogoda cije je izvoriste locirano u Libiji. Strujanje u atmosferi je u ovom periodu takvo da donosi vecu kolicinu aerosola iznad Crne Gore nego u prethodnom periodu; DL dostize vrednosti do 0.3 g m^{-2} . U periodu 11-14 mart dolazi do odsecanja koncentracije na visini i njenog odrzavanja u istocnom Mediteranu, odrzavajući u isto vreme povecane vrednosti dust load-a u Crnoj Gori ($0.3-0.75 \text{ g m}^{-2}$). 15. marta nastaje treća pescana nepogoda u Libiji, koja odrzava povecane koncentracije u centralnom Mediteranu a DL dostize vrednosti do 1 g m^{-2} iznad Crne Gore.

U drugoj trecini aprila 2002. osmotren je pescana nepogoda sa spektakularnom velikom kolicinom produkovanog i transportovanog pustinjskog aerosola u Mediteran.

Poreklo prasine i peska je bilo u istocnom delu Sahare (11. april) i centralnoj Sahari (14. april). Tokom celog perioda do 21 aprila, podrucje Crne Gore je bilo izloženo povećanim vrednostima DL narocito u periodu 13-15. aprila kada DL dostize vrednosti do 4.5 g m^{-2} . Maksimalne vrednosti DL se krecu iznad 7 g m^{-2} sto sto se smatra jako visokom vrednoscu. Spektakularnost ovog slucaja je privukla paznju naucne javnosti i slucaj je detaljno analiziran od strane nekoliko istrazivackih grupa (npr. Projekti EU ADIOS i EARLINET). U sledecem poglavlju cemo pokazati neke rezultate naseg istrazivanja ovog slucaja.

Citav period od 4-28 maja se karakterise povećanim koncentracijama nad podrucjem Crne Gore. Tokom perioda, nekoliko uzastopnih prasinskih oluja se dogodilo iznad zapadne i centralne Sahare, a aerosol transportovan preovladjujucim jugozapadnim i juznim strujanjem u slobodnoj atmosferi. Period 9-13 maj se karakterise vrednostima DL vecim od 1.5 g m^{-2} iznad Crne Gore.

U prvoj dekadi juna 2002 kao i na kraju ovog meseca postoji nesto povećana vrednost DL iznad Crne Gore koja ne prelazi vrednosti od oko 1 g m^{-2} koji je posledica umeriene aktivnosti produkcije Saharskog aerosola. U julu, avgustu i septembru 2002, podrucje Crne Gore je pod umerenim uticajem pustinjskog aerosola – posledica jugozapadnog transporta tokom speradicne aktivnosti Sahare. U prvoj polovini oktobra 2002 povećana vrednost DL, neuobicajena za ovo doba godine, dostize vrednost preko 1.5 g m^{-2} iznad Crne Gore 10-tog oktobra.

U novembru i decembru je izostala pojava povećanog DL iznad Crne Gore.

KATALOG B: Dnevna suva i vlažna depozicija, i 10m koncentracija (videti Prilog) sadrzi dodatne informacije o prisustvu mineralnog aerosola – prognozu prostorne raspodele depozicije i prizemne koncentracije. Pazljivom analizom prilozenih mapa uocava se ocekivan povezanost parametara depozicije i koncentracije sa vrednostima DL iz Kataloga A. Vece vrednosti suve depozicije i 10m koncentracije se mogu ocekivati kada se dugorocni transport odvija na manjoj visini iznad Crne Gore. Nasuprot tome, vlažna depozicije je direktno povezana sa pojavom padavina i njeno sporadicno dogadjanje sa vrednostima koje prevazilaze nekoliko puta vrednost suve depozicije moze se uociti na mapama Kataloga.

KATALOG C: Mesečna klimatologija parametara mineralnog aerosola u 2002. (vidi Prilog) sadrži izračunate srednje mesečne vrednosti suve depozicije, vlažne depozicije, 10m koncentracije i DL za područje Mediterana. Prikazana mesečna klimatologija ukazuje na značajnu sezonsku varijabilnost produkcije, transporta i depozicije mineralnog aerosola. Ovo je svakako direktno povezano sa klimatskim karakteristikama atmosferskih procesa u Mediteranu koji utiču na sve faze životnog ciklusa aerosola u atmosferi. Područje Crne Gore ne trpi značajan uticaj aerosola u januaru, februaru, avgustu, septembru, oktobru i decembru. Najveće vrednosti prikazanih parametara događaju se u martu, aprilu i maju. Vlažna depozicija koja je direktno korelisana sa padavinama prati sezonsku varijabilnost kise u Crnoj Gori i ima najveće vrednosti u martu, aprilu, maju i novembru.

ZAKLJUCI

Procena mogućih efekata povećane koncentracije na zdravlje stanovništva

Nivo mineralnog aerosola suspendovanog u prizemnoj atmosferi može imati uticaj na ljudsko zdravlje, atmosfersku vidljivost i klimu određenog područja.

Za takvu procenu neophodno je raspolagati informacijom kakvi su pragovi vrednosti koncentracije, koji, ako se prevaziđu, mogu da utiču na ljudsko zdravlje. U tom cilju, korisno je znati kakvi su standardi preporučeni u tom smislu u zemljama razvijemog sveta. U poslednjoj dekadi, mnoge države uvode standarde o kvalitetu vazduha (National Air Quality Standards), podstaknute epidemiološkim podacima i studijama koje ukazuju na tesnu vezu između aerosola i zdravstvenih efekata (npr. Dockery and Pope, 1996). Evropska komisija je nedavno usvojila novu direktivu o kvalitetu vazduha, Air Quality Directive (Directive 1999/30/EC) koja nalaze da vrednost PM₁₀ (aerosol manji od 10 mikrona) do 2010. ne može da prelazi 20 µgPM₁₀/m³ kao godišnja srednja vrednost i 50 µgPM₁₀/m³ kao dnevna vrednost u trajanju od 7 uzastopnih dana. U međuvremenu (2005 do 2010), označeni pragovi su 40 µgPM₁₀/m³ za godišnju srednju vrednost i 50 µgPM₁₀/m³ tokom 35 dana godišnje).

Da bismo uporedili vrednosti koje su prognozirane u ovoj Studiji sa preporučenim standardima, formiran je **KATALOG D: Dnevna depozicija i 10m koncentracija**

aerosola u gradovima Crne Gore (videti Prilog) koji sadrži dnevne vrednosti ova dva prognozirana parametra za devet izabranih lokacija Crne Gore. Izabrane lokacije su:

- Bar,
- Berane,
- Cetinje,
- Herceg Novi,
- Kolasin,
- Niksic,
- Pljevlja,
- Podgorica i
- Zabljak.

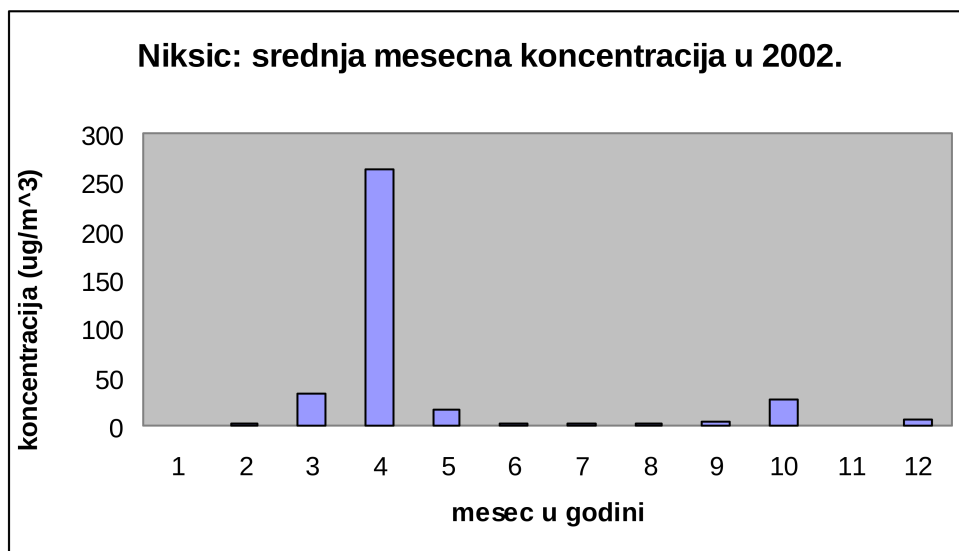
Prikazane vrednosti potvrđuju veliku dnevnu, i u izvesnoj meri prostornu, varijabilnost depozicije i koncentracije u navedenim lokacijama. Relativno mala prostorna varijabilnost vrednosti za određeni datum povezana je sa malom distancom između izabranih lokacija. Uocena sporadicnost i trajanje slučajeve sa povećanim vrednostima ovih parametara je svakako povezano sa karakteristikama transporta i depozicije velikih razmera ilustrovano podacima u Katalozima A, B i C.

Mesecni maksimumi i koncentracije variraju od 20 do 7000 mg/m³ za depoziciju, odnosno od 10 do 2000 za koncentraciju. µg/m³. Prema tome, u određenim situacijama, prizemna koncentracija vistruko prevazilazi štetnu vrednost od 20 µg/m³. Ovde je svakako vazno odrediti dužinu trajanja takvih perioda. Naime, sporadicne pojave visoke koncentracije ne moraju biti opasne za zdravlje ukoliko su kratkotrajne.

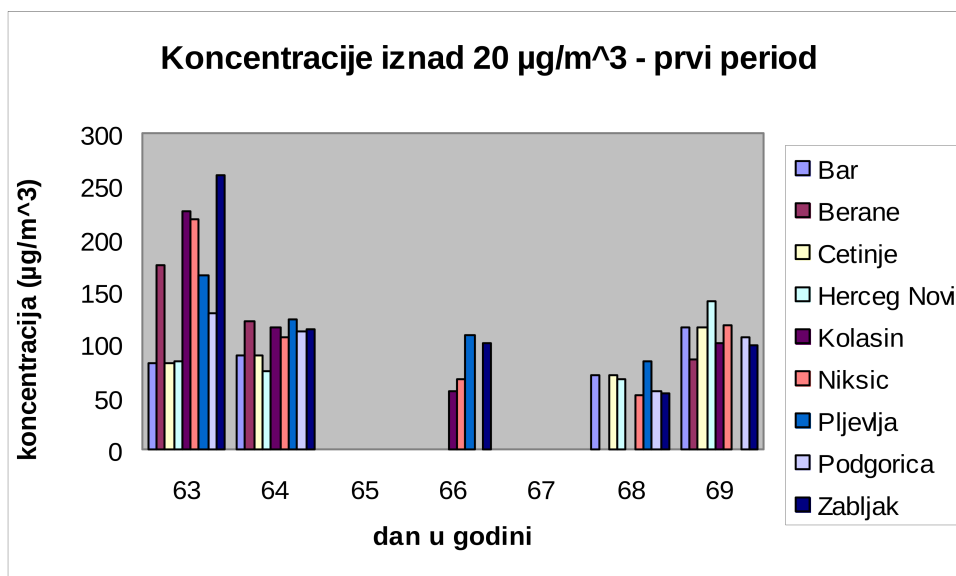
Analizom podataka modela, ustanovili smo da je u Niksici postignut apsolutni maksimum za prizemnu koncentraciju u poredjenju sa presotralih 8 lokacija. Naime, 9. aprila 2002., 10m koncentracija je u Niksici iznosila 7042 µg/m³. April je inace i mesec sa znatno povećanom srednjom mesecnom koncentracijom od 263 µg/m³ u Niksici (slika 8.), vrednost koja je oko 5 puta veća nego što je preporučeni standard EU u periodu 2005-2010. Nesto niže vrednosti simulirane su za ostale lokacije u Crnoj Gori.

Maj, juni i oktobar su meseci kada su za Niksic simulirane nešto povećane srednje mesecne koncentracije (32, 16, 27 µg/m³ redom), koje su ispod preporučenog praga

prema standardu EU. Slke 9a-9d prikazuju vrednosti prizemne koncentracije za izabranih 9 lokacija u ova cetiri perioda kada koncentracija prelazila $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Preostali meseci (januar, februar, juli, avgust, septembar, novembar i decembar) imaju vrednosti sredne mesecne prizemne koncentracije koja ne prelazi vrednost od $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

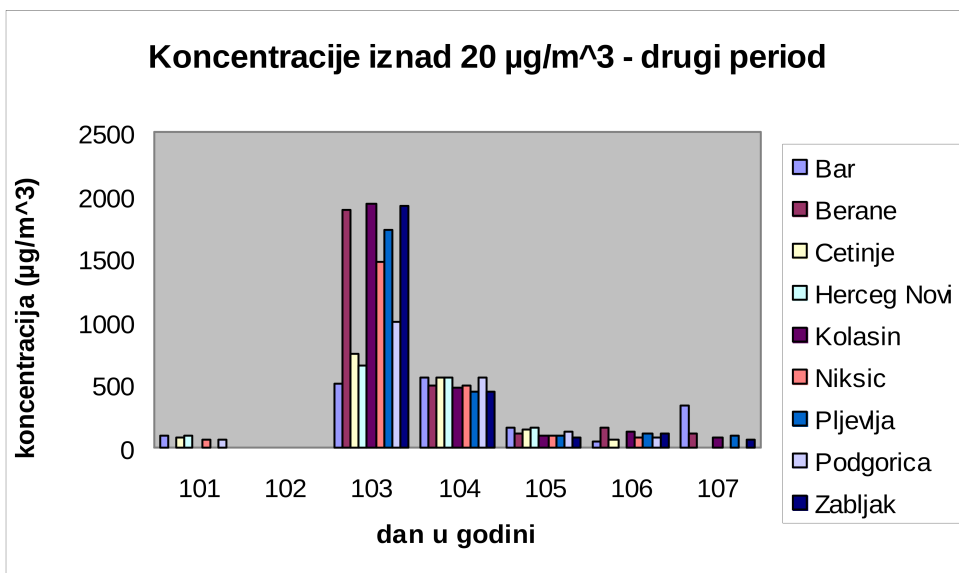


Slika 8. Srednja mesecna koncentracija Niksiku u periodu 2002.

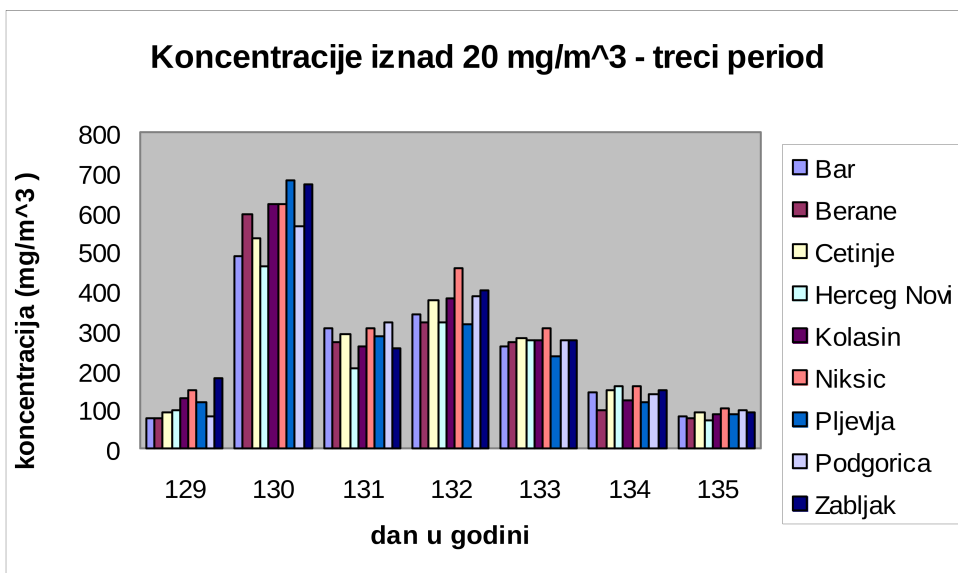


Slika

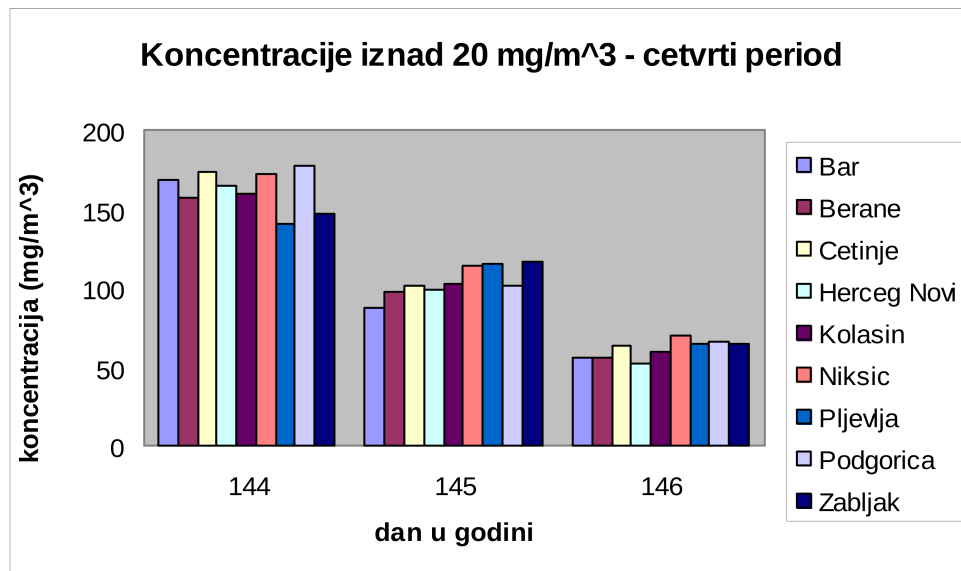
Slika 9a. Dnevne koncentracije iznad $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – prvi period



Slika 9b. Dnevne koncentracije iznad 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – drugi period



Slika 9c. Dnevne koncentracije iznad 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – treci period



Slika 9d. Dnevne koncentracije iznad 20 ug/m³ – cetvrti period

Moze se stoga zakljuciti da je samo u jednom mesecu bilo znatno povecaje koncentracije u periodu od oko 6 dana koja je mogla da bude stetna po zdravlje populacije Crne Gore. U preostalom periodu godine, sporadicne pojave povecane koncentracije u mesecnom proseku nisu bile opasne po zdravlje.

Procena mogucih efekata povecane depozicije na sastav tla i biohemiju mora

Kao sto je pomenuto na pocetku Studije, nakon deponiranja na površinu mora i kopna, prasina i jedinjenja gvozdja i fosfora koje sadrzi, mogu da dovedu do odredjenih promena u ovim prirodnim sredinama. U moru, depozicija moze da inicira biohemijski process (Martin i Fitzwater, 1998), koji rezultira u ‘cvetanju’ mora (razvoj algi). Skorasnje studije (npr. Erickson, D., J. Hernandez, J. et al., 2001) ukazuju na postojanje korelacije izmedju depozicije mineralnog pustinjskog aerosola i boje mora. Nasi podaci pokazuju., kao i pre, da je depozicija bila najveca tokom aprila 2002. kada je u primorskoj lokaciji Bar dostigla vrednost 0.55 g/m³ u toku jednog dana (10. april) odnosno srednju mesecnu vrednost od 71 mg/m³. Takvi periodi generalno pogoduju razvoju planktona ako su drugi uslovi (temperatura mora, slanost, turbulentno mesanje) za njihov rast ispunjeni.

Depozicija mineralnog aerosola koji je bogat feratima, nitratima i sulfatima se smatra fertilizatorom zemljišta na koje se deponuje. Na kopnu, maksimum prosečne mesečne depozicije postignut je aprila meseca u Zablaku (86 mg/m^3).

Procena mogućih efekata smanjene optičke dubine na termičko stanje atmosfere

Indikaciju o mogućim efektima smanjivanja optičke dubine zbog prisustva aerosola daje parametar DL – ukupna masa aerosola u stubu atmosfere po jedinici površine. Aerosol iznad kopna slično utiče na termičko stanje atmosfere kao i oblačnost. Naime, zbog veće refleksivnosti u odnosu na kopnu, aerosol ne dopušta da sunčeva energija u potpunosti dospe na površinu zemlje. Postavlja se pitanje u kom iznosu prizemna temperatura može da se promeni u prisustvu 'oblaka' mineralnog aerosola. Detaljnije studije o ovim efektima još uvek nedostaju ili su nepotpune u naučnoj javnosti danas, kao što je to konstatovano u poslednjem izveštaju IPCC. Nasa nedavna istraživanja termičkih efekata aerosola u atmosferu pokazuju da u slučaju jakih pustinjskih nepogoda dolazi do promene u vertikalnom profilu temperature kada vrednost DL prevazilazi 10 g/m^2 . Pritom, najveće promene se događaju u prizemnom delu atmosfere gde temperatura može da se smanji i do 5°C . Nasa prethodna analiza pokazuje da je najveće prisustvo Saharskog aerosola bilo u prvoj polovini aprila 2002. U tom periodu apsolutni maksimum DL od 5.7 g/m^2 je simuliran iznad Herceg Novog. Uzimajući u obzir rezultate naših nedavnih istraživanja, može se pretpostaviti da tokom takvih perioda temperatura u prizemlju može da opadne za $1\text{--}2^\circ \text{C}$.

S obzirom na sporadični karakter pojave pustinjskog aerosola iznad Crne Gore, značajnija promena dnevnih atmosferskih uslova se ne može očekivati. U klimatskom pogledu, direktan uticaj aerosola može da se očekuje pre svega u prolećnom delu godine kada dolazi do značajnijeg transporta aerosola. Kvantifikovanje klimatskih efekata je danas još uvek nemoguće izvesti na precizniji način jer današnji atmosferski, radijacioni i aerosolni modeli nisu još uvek interaktivno povezani. Takva istraživanja su u pripremi ili u toku (npr. Nicković 2003).

Ova studija, koristeći rezultate jednogodišnjeg eksperimenta izvedenih modelom za prognozu pustinjskog aerosola DREAM, pokazuje sledeće:

- Da je CRNA GORA izložena povremenom uticaju Saharskog peska i prasine transportovanog preko velikih distanci
- Da je najveća aktivnost aerosola tokom prolećnih, i nešto manje, tokom letnjih meseci, što se odražava u mesečnoj klimatologiji svih analiziranih parametara
- Da je transport prema Crnoj Gori posledica sporadičnih pesanih oluja čije je izvoriste u zapadnoj i centralnoj Sahari
- Da postoji velika dnevna vremenska variabilnost parametara aerorola
- Da ne postoji znatna dnevna prostorna promenljivost aerosola s obzirom da je rastojanje crnogorskih lokacija manje nego što su kontinentalne razmere procesa transporta aerosola
- Da u slučajevima jakih pesanih oluja i pogodnog atmosferske cirkulacije može doći do povećanja koncentracije u Crnoj Gori koja prevazilazi danas prihvaćene standarde o kvalitetu vazduha, i time uticati na zdravlje populacije. U periodu koji je analiziran u studiji, jedan takav slučaj višednevnog jakog uticaja aerosola je prognozirano.
- Da je depozicija na kopnu i moru Crne Gore takva da tokom prolećnog perioda može uticati na biologiju mora i kvalitet zemljišta
- Da je uticaj Saharskog aerosola u Crnoj Gori takav da može da izazove određenu promenu termičke strukture atmosfere i snizi temperaturu za 1-2 stepena tokom slučajeva jakog transporta

Model DREAM, koji prema zadacima Projekta treba da se operativno implementira u Hidrometeorološkom zavodu Crne Gore, može da na osnovu rezultata ove studije da se uspešno koristi za ranu najavu/proгнозу transporta i depozicije iznad područja Crne Gore.

REFERENCE

- Alfaro, S. C., A. Gaudichet, L. Gomes, and M. Maille, Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting, *J. Geophys. Res.*, 102, 11239-11249, 1997.
- Andreae, M. O., Raising dust in the greenhouse, *Nature*, 380, 389-340, 1996.
- Arakawa, A., Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two dimensional incompressible flow. Part I, *J. Comp. Phys.* 1, 119-143, 1966.
- Arao, K. and C. Sakaguchi, Yellow Sand Events Measured by an Optical Particle Counter at Nagasaki University in 1996-1998 (in Japanese), *J. Environ. Studies*, Nagasaki University, 1, pp.175-186, 1999.
- Bagnold, R. A., *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, 265 pp., Morrow, New York, 1941.
- Beljaars, A. C. M., The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 121, 255-270, 1994.
- Betts, A., A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis, *Quart. J. Meteor. Soc.*, 112, 677-693, 1986.
- Businger, J. A., Evaluation of the accuracy with which dry deposition can be measured with current micrometeorological techniques, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 25, 1100-1124, 1986.
- Chamberlain, A. C., Roughness length of sea, sand and snow, *Boundary-Layer Meteor.*, 25, 405-409, 1983.
- Chamberlain, A. C., J. A. Garland, and A. C. Wells, Transport of gasses and particles to surfaces with widely spaced roughness elements, *Boundary-Layer Meteor.*, 24, 343-360, 1984.
- Chen F., K. Mitchell, Z. Janjic, and M. Baldwin, Land-surface parameterization in the NCEP Mesoscale Eta Model, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, WMO, Geneva, CAS/JSC WGNE, No. 23, 4.4., 1996.
- Corine, 1993, Land cover – Technical Guide. EUR 12585 EN. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Dulac, F., D. Tanre, G. Bergametti, P. Buat-Menard, M. Desbois, and D. Sutton, Assessment of the African airborne dust mass over the western Mediterranean Sea using Meteosat data, *J. Geophys. Res.*, 97, 2489-2506, 1992.
- Dockery, D., Pope, A., 1996. Epidemiology of acute health effects: Summary of time-serie studies. In: Wilson, R., Spengler, J.D. (Eds), *Particles in our air: concentration and health effects*. Cambridge, MA, USA, Harvard University Press, pp. 123-147.
- Dulac, F., C. Moulin, C. E. Lambert, F. Guillard, J. Poitou, W. Guelle, C. R. Quetel, X. Schneider, and U. Ezat, Quantitative remote sensing of African dust transport to the Mediterranean, in *The impact of desert dust across the Mediterranean*, edited by S. Guerzoni and R. Chester, pp. 25-49, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- EPA, Global Ecosystem Database, Version 1.0 (on CD ROM). *Documentation Manuel*, EPA Global Change Research Program – NOAA/NGDC Global Change Database Program, USDC, Colorado, 1992.
- Fels, S. B. and M. D. Schwartzkopf, The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations, *J. Atmos. Sci.*, 32, 1475-1488, 1975.
- Fecan, F., B. Marticorena, and G. Bergametti, Parameterization of the increase of the Aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. *Annales Geophysicae*, 17, 194-157, 1999.
- Georgi, F., A particle dry-deposition parameterization scheme for use in tracer transport models, *J. Geophys. Res.* 91, 9794-9806, 1986.
- Gillette, D. A., and R. Passi, Modeling dust emission caused by wind erosion, *J. Geophys. Res.* 93, 14233-14242, 1988.
- Hedin, L. O., and G. E. Likens, Atmospheric dust and acid rain, *Scientific American*, 12, 56-60, 1996.

- Herman, J. R., P. K. Bhartia, O. Torres, C. Hsu, C. Seftor, and E. Celarier, Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus-7/TOMS data. *J. Geophys. Res.*, **102**, p. 16,911-16,929, 1996.
- Hillel, D., *Introduction to soil physics*, 364pp., Academic Press, New York, 1982.
- Husar, R. B., D. Tratt, D. Jaffe, S. Gasso, T. Gill, N. S. Laulinen, F. Lu, M. Reheis, Y. Chun, D. Westphall, B. N. Holben, C. Geymard, I. McKendry, N. Kuring, G. C. Feldman, C. McClain, R. J. Froulin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, N. Sugimoto, S. Nickovic, W. E. Wilson, K. Sassen, B. A. Schichtel, and S. R. Falke, The Asian dust events of April 1998, *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Jackson, D. W. T., Potential inertial effects in Aeolian sand transport: preliminary results, *Sedimentary Geology*, 106, 193-201, 1996.
- Janjic, Z.I., Pressure gradient force and advection scheme used for forecasting with steep and small scale topography, *Contrib. Atm. Phys.*, 50, 186-199, 1977.
- Janjic, Z.I., Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models, *Contrib. Atm. Phys.*, 52, 69-84, 1979.
- Janjic, Z.I., Non-linear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids, *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1234-1245, 1984.
- Janjic, Z.I., The step-mountain coordinate: physical package, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429-1443, 1990.
- Janjic, Z.I., The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945, 1994.
- Janjic Z.I., The Mellor-Yamada Level 2.5 turbulence closure scheme in the NCEP Eta Model, in: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, edited by H. Ritchie WMO, Geneva, CAS/WGNE, 4, pp. 4.15, 1996a.
- Janjic Z.I., The Surface Layer Parameterization in the NCEP Eta Model, in: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, edited by H. Ritchie WMO, Geneva, CAS/WGNE, 4, pp. 4.16-4.17, 1996b.
- Janjic Z.I., Advection scheme for passive substance in the NCEP Eta Model, in: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, edited by H. Ritchie WMO, Geneva, CAS/WGNE, 1997.
- Joussaume, S., Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, *J. Geoph. Res.*, 95, 1909-1941, 1990.
- Kallos, G., Nickovic, A. Papadopoulos, D. Jovic, O. Kakaliagou, N. Misirlis, L. Boukas, N. Mimikou, G. Sakellaridis, J. Papageorgiou, E. Anadranistakis and M. Manousakis, The Regional Weather Forecasting System SKIRON: An Overview, in *Proceedings of Symposium on Regional Weather prediction on Parallel Computer Environments*, ISBN: 960-8468-22-1. Edited by G. Kallos, V. Kotroni and K. Lagouvardos, pp. 109-122, University of Athens, Greece. 1997.
- Kremling, K., and P. Streau, Saharan dust influenced trace element fluxes in deep North Atlantic subtropical waters, *Deep Sea Res.*, I, 40, 1155-1168, 1993.
- Krichak, S.O., M. Tsidulko, P. Alpert, A. Papadopoulos, O. Kakaliagou, and G. Kallos, Eta Weather prediction system with the aerosol production/transport/deposition at TAU, in: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, edited by H. Ritchie WMO, Geneva, CAS/WGNE, 28, pp. 5.29, 1999.
- Kubilay, N., E. Ozsoy, S. Nickovic, I. Tegen, and C. Saydam, A hemispheric dust storm affecting the Atlantic and Mediterranean (April 1994): Analysis, Modelling, ground-based measurements and satellite observations, in *Proceedings on International Symposium: Satellite-Based Observation: A Tool for the Study of the Mediterranean Basin, Tunis, 23-27 November 1998*.
- Kubilay, N., S. Nickovic, C. Moulin, and F. Dulac, An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the eastern Mediterranean, *Atm. Environment*, (in press), 1999.
- Lacis, A. A. and J. E. Hansen, A parameterization of the absorption of air-solar radiation in the earth's atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133, 1974.
- Li, X., H. Maring, D. Savoie, K. Voss, and J. M. Prospero, Dominance of mineral dust in aerosol light scattering in the North Atlantic trade winds, *Nature*, 380, 416-419, 1996.

- Liu, M.; Westphal, D. L., 2001. A Study of the Sensitivity of Simulated Mineral Dust Production to Model Resolution, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* August 27, 2001 (Vol. 106, No. D16, p. 18,099)
- Marticorena, B., and G. Bergametti, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geoph. Res.* 100, 16415-16430, 1995.
- Marticorena, B., G. Bergametti, B. Aumont, Y. Callot, C. N'Doume, and M. Legrand, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Simulation of Saharan dust sources, *J. Geoph. Res.* 102, 4387-4404, 1997.
- Martin, J. K., and S. E. Fitzawater, Ion deficiency limits phytoplankton growth in the North-East Pacific subarctic, *Nature*, 331, 341-343, 1988.
- Mesinger, F., Z.I. Janjic, S. Nickovic, D. Gavrilo and D.G. Deaven, The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment, *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1518, 1988.
- Moulin, C., C. E. Lambert, F. Dulac, and U. Dayan, Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation, *Nature*, 387, 691-694, 1997.
- Murayama, T., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, K. Iokibe, R. Koga, T. Sakai, Y. Kubota, Y. Saito, M. Abo, N. Hagiwara, H. Kuze, N. Kaneyasu, R. Imasu, K. Asai, and K. Aoki, , Lidar network observation of Asian dust (Kosa) in Japan, in *Proc. SPIE*, Vol.3504, pp.8-15, 1998.
- Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B. Sohn, J. Won, S. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka, Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia, *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Nickling, W. G., and J. A. Gillies, Emission of fine-grained particulates from desert soils, in *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, edited by Leinen, M., and M. Sarnthein, pp. 133-165, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- Nickling, W. G., and J. A. Gillies, Dust emission and transport in Mali, West Africa, *Sedimentology*, 40, 859-868, 1993.
- Nickovic, S., and S. Dobricic, A model for long-range transport of desert dust, *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2537-2544, 1996.
- Nickovic, S., D. Jovic, O. Kakaliagou, and G. Kallos, Production and lon-range transport of desert dust in the Mediterranean region: Eta model simulations, in *Proceedings of 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Applications*, 2-6 Jun 1997, Clermont-Ferrand, France, 1997a.
- Nickovic, S., G. Kallos, O. Kakaliagou, and D. Jovic, Aerosol production/transport/deposition process in the Eta model: desert dust simulations, in *Proceedings of Symposium on Regional Weather prediction on Parallel Computer Environments*, ISBN: 960-8468-22-1, Edited by G. Kallos, V. Kotroni and K. Lagouvardos, pp. 137-145, University of Athens, Greece. 1997b.
- Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos, O. Kakaliagou, 2001: A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere *J. Geophys. Res.* **106**, 18113-18130.
- Perry, K.D., T.A. Cahill, R.A. Eldred, and D.D. Dutcher, 1997: Long-range transport of North African dust to the eastern Union States, *J. Geophys. Res.*, 102, 11225-11238, 1997.
- Papadopoulos, A. G. Kallos, S. Nickovic, D. Jovic, M. Dacic, and P. Katsafados, Sensitivity studies of the surface and radiation parameterization schemes of the SKIRON system, in *Proceedings of Symposium on Regional Weather prediction on Parallel Computer Environments*, ISBN: 960-8468-22-1, Edited by G. Kallos, V. Kotroni and K. Lagouvardos, pp. 155-164, University of Athens, Greece, 1997.
- Reichholf, J. H., Is Saharan dust a major source of nutrients for the Amazonian rainforest, *Stud. Neotrop. Fauna Environ.*, 21, 251-255, 1986. Segal, M., On the impact of thermal stability on some rough flow effects over mobile surfaces, *Boundary-Layer Meteor.*, 52, 193-198, 1990.
- Segal, M., On the impact of thermal stability on some rough flow effects over mobile surfaces, *Boundary-Layer Meteor.*, 52, 193-198, 1990.
- Soderman, D. and Dulac, F.: 1998, 'Monitoring and Prediction of the Atmospheric Transport and Deposition of Desert Dust in the Mediterranean Region', in *Programme on Weather Prediction Research (PWPR) Report Series Project*, 10, World Meteorological Organization, pp. 181-186.
- Shao, Y., M. R. Raupach, and P. A. Findlater, Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind, *J. Geophys. Res.*, 98, 12719-12726, 1993.

- Slinn, W. G. N., Prediction for particle deposition to vegetative canopies. *Atmos. Environ.*, 1785-1794, 1982.
- Tegen, I., and I. Fung, Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport and optical thickness, *J. Geophys. Res.*, 99, 22987-22914, 1994.
- Van Leer, B., Towards the ultimate conservative difference scheme: IV. A second-order sequel to Godunov's method. *J. Comput. Phys.*, **32**, 101-136, 1979.
- Westphal, D. L., O. B. Toon, and T. N. Carlson, A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, *J. Geophys. Res.* 92, 3027-3049, 1987.
- Westphal, D. L., O. B. Toon, and T. N. Carlson, A case study of mobilization and transport of Saharan dust, *J. Atmos. Sci.* 45, 2145-2175, 1988.
- White, B. R., Soil transport by winds in Mars, *J. Geophys. Res.*, 84, 4643-4651, 1979.
- Wilson, M. F., and A. Henderson-Sellers, A global achieve of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *J. Climatology*, 5, 119-143, 1985.
- Zhao, Q., and F. H. Carr, A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1931-1953, 1997.
- Zilitinkevich, S. S., Non-local turbulent transport: pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows, in *Air Pollution III - Volume I. Air Pollution Theory and Simulation*, edited by. H. Power, N. Moussiopoulos and C.A. Brebbia, pp. 53-60, Computational Mechanics Publications, Southampton Boston, 1995.
- Zilitinkevich, S., A. A. Grachev, and J. C. R. Hunt, Surface frictional processes and non-local heat/mass transfer in the shear-free convective boundary layer. In: *Buoyant Convection in Geophysical Flows* (Eds. E. J. Plate et al.), *Kluwer Acad. Publishers, The Netherlands*, 83-113, 1998.