

مقایسه طرحواره‌های گسیل گردو خاک در برآورد شار قائم آن در نواحی چشمه‌ای ایران

لیدا خسروسرشکی^۱، پرویز ایران‌نژاد^{۲*} و عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۶/۱۹، پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

در این پژوهش شبیه‌سازی‌های آهنگ گسیل گردو خاک در ایران توسط دو طرحواره مارتیکورنا-برگامتی-آلفارو (MBA) و شائو در ۲۴ می ۲۰۱۲، که پدیده گردو خاک در بسیاری از نقاط کشور گزارش شده بود، باهم مقایسه شده است. داده‌های لازم برای اجرای طرحواره‌ها از شبیه‌سازی مدل WRF بدست آمده است. بررسی‌ها نشان داد که تعداد چشمه‌های گردو خاک حاصل از طرحواره MBA کمتر از طرحواره شائو است. شار قائم گردو خاک (VDF) طرحواره MBA در بعضی نواحی چشمه‌ای بزرگ‌تر و در بعضی دیگر کوچک‌تر از طرحواره شائو است. در مناطقی که طرحواره شائو مقدار صفر را برای VDF برآورد کند، طرحواره MBA نیز همین مقدار را برآورد می‌کند، اما برعکس آن لزوماً درست نیست. در تاریخ مورد بررسی هر دو طرحواره بیشینه VDF را در ساعت ۱۱ نشان داده‌اند. بیشینه VDF توسط طرحواره شائو $۸۶/۸ \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ در نقطه $۳۰/۲۷^\circ \text{N}$ و $۵۷/۳۵^\circ \text{E}$ و توسط طرحواره MBA برابر $۱۸/۴۵ \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ در نقطه $۳۳/۲۴^\circ \text{N}$ و $۵۱/۳۵^\circ \text{E}$ رخ داده است. طول زبری و فشار مومسانی خاک به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها در برآورد VDF با طرحواره‌های MBA و شائو هستند. سرعت اصطکاک و پارامترهای سطح و خاک در برآورد شار قائم گردو خاک آن قدر پیچیده عمل می‌کنند که در مقایسه برآوردهای طرحواره‌ها باید تأثیر هم‌زمان آنها را در نظر گرفت. بیشینه VDF در زمان‌هایی از شبانه‌روز است که رطوبت خاک کمینه و سرعت اصطکاک (u_*) بیشینه مقدار را داشته باشد. همچنین، در هر ناحیه چشمه‌ای به دلیل تغییرات ناچیز رطوبت خاک در یک شبانه‌روز، تغییرات شبانه‌روزی شار قائم گردو خاک بیشتر متأثر از تغییرات شبانه‌روزی سرعت اصطکاک است. ارزیابی این طرحواره‌های گسیل، نیازمند برآورد VDF به روش‌های تجربی و یا سنجش از دور است.

واژه‌های کلیدی: طرحواره MBA، طرحواره شائو، سرعت اصطکاک، آستانه، فشار مومسانی خاک، طول زبری، شار قائم گردو خاک

A comparison of dust emission schemes in estimation of vertical dust flux in dust source regions of Iran

Khosrosreshki, L.¹, Irannejad, P.² and Aliakbari-Bidokhti, A. A.³

¹M.Sc.in Meteorology, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 10 Sep 2013, Accepted: 04 Feb 2014)

Summary

The first step in studying dust events is the estimation of dust emission from sources. In this study, the simulations of the vertical dust flux (VDF) over Iran by the MBA (Marticorena, Bergametti, and Alfaro) and Shao schemes are compared. The MBA scheme is energy-based and derived on the basis of energy balance between the kinetic energy of saltating particles and binding energy of the surface during the bombardment.

E-mail: piran@ut.ac.ir

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۴۷۹

تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۸۲۷۴

*نگارنده رابط:

The Shao scheme, on the other hand, is a volume removal- based approach, in which dust emission rate is estimated on the basis of the volume removed by saltating particles when they impact the surface. Because of the difficulty in measuring interparticle binding forces (or energy), Shao scheme uses the plastic pressure. This quantity is directly related to interparticle binding forces (or energy). The plastic pressure, that shows the surface resistance against the penetration of impacting particles, varies between 10^3 Pa for light spray fine soil and 10^7 Pa for deep wetted soil.

Another difference between the Shao and MBA schemes is in their parameterizations of the threshold friction velocity, at which the wind erosion is initiated. The surface and soil- related factors, which are introduced as roughness and moisture correction functions, are different in Shao and MBA schemes. Final vertical dust flux estimation is different among various versions of the Shao scheme. In this study, we use the version introduced by Shao (2004). The required data to estimate vertical dust flux by the dust emission schemes, including friction velocity, soil moisture, soil texture, surface cover fraction and roughness length were obtained from WRF model. Soil particle size distribution and plastic pressure for different grid squares are estimated based the soil texture data by reviewing the literature.

In this study, dust source regions and emission rates estimated by different parameterization schemes are compared for the 24th May 2012, when dust event was reported in many stations of Iran. According to results, compared to the Shao scheme, the MBA predicted smaller number of source regions in Iran. The vertical dust flux simulated by MBA is higher than that by the Shao scheme in some common source regions, but lower in some others. After applying roughness and moisture correction functions to the threshold friction velocity, the *VDF* simulated by the MBA will be zero wherever the Shao schemes' *VDF* is zero, but this is not necessarily true the other way. Both of the schemes simulated the maximum *VDF* at 11am. The highest value of the estimated *VDF* was $86.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (for the grid centered at 30.27° N , 57.35° E) by the Shao scheme, while it was $18.45 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (or the grid centered at 33.24° N , 51.35° E) for the MBA scheme.

The most influential parameters in the estimation of *VDF* are the roughness length and plastic pressure in MBA and Shao, respectively. Impacts of the friction velocity, and surface and soil- related factors on the estimated vertical dust flux, though complicated, should be considered simultaneously. In every source region, *VDF* increases when the soil moisture decreases and the friction velocity increases. Furthermore, the *VDF* variation during a day is mainly affected by daily changes of the friction velocity, because of negligible changes in the soil moisture during the day. Thorough evaluation of these schemes requires experimental and remote sensing data.

Keywords: MBA scheme, Shao scheme, Threshold friction velocity, Soil plastic pressure, Roughness length, Vertical dust flux

۱ مقدمه

گردوخاک ایجاد شده از فرسایش باد، سهم مهمی در تجمع جرمی جهانی هواویزها دارد (حدود ۴۰٪) و به این ترتیب تأثیر چشم گیری بر الگوهای گردش جوئی می گذارد (لورنت و همکاران، ۲۰۰۵). اندازه گیری های زمینی، سنجش های ماهواره ای و بررسی های مدل سازی

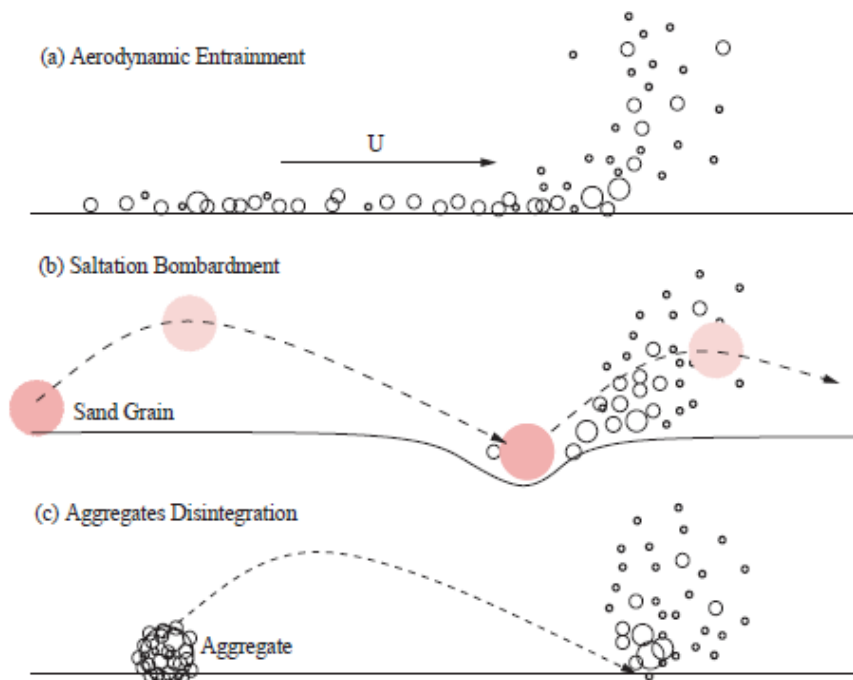
به علت جنبه های اقلیمی، زیست محیطی و ژئوشیمیایی بررسی و درک رفتار گردوخاک در مقیاس های منطقه ای و جهانی اهمیت دارد. تعیین آهنگ گسیل گردوخاک از دو جنبه فرسودگی خاک و تحقیقات جوئی مورد نیاز است (شائو، ۲۰۰۸). در میان چشمه های طبیعی هواویزها،

فرسایش بادی و فرایندهای فیزیکی درگیر در حرکت باد واداشته ذرات خاک است. آلفارو و همکاران (۱۹۹۷)، آلفارو و گومز (۲۰۰۱)، مارتیکورنا و برگامتی (۱۹۹۵) - که از این پس با عبارت MBA از آن یاد می‌شود - و شائو و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۴) تلاش‌هایی را برای توسعه طرحواره‌های گسیل به انجام رسانده‌اند. این طرحواره‌ها عمدتاً بمباران جهشی و واپاشی کلوخه (شکل ۱) را سازوکارهای اصلی گسیل گردوخاک دانسته و با اتخاذ رهیافت‌های متفاوتی به برآورد شار قائم گردوخاک پرداخته‌اند. این طرحواره‌ها همچنین کمیت‌های مؤثر در فرایند گسیل گردوخاک را متفاوت از هم پارامترسازی کرده‌اند.

طرحواره شائو نسخه‌های متعددی دارد (شائو و همکاران، ۱۹۹۶؛ لو و شائو، ۱۹۹۹؛ شائو، ۲۰۰۱ و شائو، ۲۰۰۴). در این پژوهش منظور از طرحواره شائو آخرین نسخه طرحواره‌های خانواده شائو یعنی شائو (۲۰۰۴) است که از این پس با نام «شائو» از آن یاد می‌شود.

مقدار سالانه گردوخاک جهانی وارد شده به جو را از چند صد تا چند هزار مگاتن برآورد کرده‌اند. مقادیر زیادی از گردوخاک در نواحی خشک و نیمه‌خشک حرکت داده و در شرایط مناسب آب‌وهوایی به جو تزریق می‌شود (نیکوویک و کالوس، ۲۰۰۱). آلفارو و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که گسیل ذرات کوچک‌تر گردوخاک که انرژی پوندی بیشتری دارند، با افزایش سرعت باد بیشتر می‌شود. گالیتسین و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی ساختار ریز لایه مرزی در نواحی خشک گسیل گردوخاک از سطح زمین و ورود آن را به جو بررسی کردند و دریافتند که در فصل گرم و در نبود توفان‌های گردوخاک، این فرایندهای همرفتی هستند که گردوخاک را از سطح زمین تا لایه مرزی جو بالا می‌برند. برای محاسبه غلظت هواویزها در جو برآورد دقیق آهنگ گسیل گردوخاک ضرورت دارد.

یک چالش اصلی در مدل‌سازی گردوخاک، تعیین آهنگ گسیل گردوخاک براساس دانش کنونی ما از



شکل ۱. سازوکارهای گسیل گردوخاک (a) با درون‌آمیختگی ایرودینامیکی، (b) از راه بمباران جهشی و (c) از واپاشی کلوخه (شائو، ۲۰۰۸).

۲ مبانی نظری، داده‌ها و روش کار

شرایط جوی، طول زبری ایرودینامیکی، پوشش گیاهی، رطوبت خاک، توزیع اندازه ذرات خاک و کلوخه‌ای بودن آن و نوع کاربری اراضی عوامل مؤثر بر فرسایش بادی و گسیل گردوخاک هستند. فرسایش در مناطق خشک و نیمه‌خشک با پوشش گیاهی اندک رخ می‌دهد (شائو، ۲۰۰۸). مؤلفه‌های اصلی در طرحواره‌های گسیل گردوخاک عبارت‌انداز: (۱) سرعت اصطکاکی آستانه، (۲) شار افقی ماسه‌دانه‌ها و (۳) شار قائم گسیل گردوخاک. گسیل گردوخاک از سطح هنگامی رخ می‌دهد که سرعت اصطکاکی باد (U_*) از سرعت اصطکاکی آستانه (U_{*t}) بیشتر شود. سرعت اصطکاکی آستانه، کمترین سرعت اصطکاکی لازم برای آغاز رویداد فرسایش بادی است. وقتی $U_* > U_{*t}$ شود، با درهم‌شکستن نیروهای پیوندی که ذرات گردوخاک را متصل به هم و یا به سطح زمین نگه می‌دارد، ذرات گردوخاک گسیل می‌شود. سرعت اصطکاکی ظرفیت باد را در ایجاد فرسایش و سرعت اصطکاکی آستانه، ظرفیت سطح را برای مقاومت در برابر فرسایش بادی نشان می‌دهد (شائو، ۲۰۰۸).

سرعت اصطکاکی آستانه به کار رفته در طرحواره MBA برای یک سطح هموار (مارتیکورنا و برگامتی، ۱۹۹۵)، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (گرلی و آیورسن، ۱۹۸۵):

(۱)

$$u_{*t}(d) = \begin{cases} \frac{0.129K}{(1.928 \text{Re}^{0.092} - 1)^{0.5}} & 0.03 < \text{Re} \leq 10 \\ 0.129K \{1 - 0.0858 \exp[-0.0617(\text{Re} - 10)]\} & \text{Re} > 10 \end{cases}$$

که در آن، $\text{Re} = a(d)^x + b$ ، $a = 1.11 \text{cm}^{-x}$ ، $b = 0.38$ ، $x = 1/56$ ، ρ_a شتاب گرانی، $g = 9.81 \text{ms}^{-2}$ $K = (\frac{\rho_p g d}{\rho_a})^{0.5} (1 + \frac{0.006}{\rho_p g (d)^{2.5}})^{0.5}$ و ρ_p به ترتیب چگالی هوا و ذره و d قطر ذره است. شائو و لو (۲۰۰۰) بیان ساده‌تری را عرضه کردند که در

طرحواره شائو به کار می‌رود:

$$u_{*t}(d) = (A_N (\delta_p g d + \frac{\gamma}{\rho_a d}))^{0.5} \quad (2)$$

که در آن، $\delta_p = \rho_p / \rho_a$ و $\gamma = 1.65 \times 10^{-4} \text{kg s}^{-2}$ ، $A_N = 0.0123$ است. در هر دو تعریف، سرعت اصطکاکی آستانه تابعی از توزیع اندازه ذرات خاک است. براساس نتایج ژائو و همکاران (۲۰۰۶) سرعت اصطکاکی آستانه در طرحواره شائو کوچک‌تر و یا برابر سرعت اصطکاکی آستانه در طرحواره MBA است ($u_{*t, \text{Shao}}(d) \leq u_{*t, \text{MBA}}(d)$). شار جهش افقی (Q) جرم ماسه‌دانه‌ها و یا کلوخه‌های عبوری در یکای زمان از یکای طول است. این کمیت در هر دو طرحواره با استفاده از معادله شار ماسه وایت (۱۹۷۹) محاسبه می‌شود:

$$Q(d) = c \frac{\rho_a}{g} u_*^3 (1-R)(1+R^2) \quad (3)$$

Q تابعی از سرعت اصطکاکی (u_*) و سرعت اصطکاکی آستانه (u_{*t}) است. $c = 2.6$ ثابت تناسب، $\rho_a = 1/2 \text{kg m}^{-3}$ و $R = u_{*t} / u_*$ چگالی هوا است.

آهنگ گسیل گردوخاک (F)، شار جرمی قائم گردوخاک (Vertical Dust Flux) (VDF) از سطح است. این کمیت در طرحواره MBA براساس رهیافت انرژی پایه و در طرحواره شائو براساس رهیافت برداشت حجمی برآورد می‌شود. پارامترسازی انرژی پایه در طرحواره MBA براساس ترازمندی بین انرژی جنبشی ذره جهیده و انرژی پیوندی ذرات ریز گردوخاک در خلال برخورد ذره و سطح استوار است. در جهش و در فرایند ماسه‌باد، ذرات ریز بسته به انرژی جنبشی هر ذره هم از کلوخه جهیده و هم از سطح خاک آزاد می‌شود (آلفارو و همکاران، ۱۹۹۸). در رهیافت انرژی پایه برآورد دقیق انرژی پیوندی ذرات گردوخاک دشوار است (هم به

خاک‌های رسی تا 5×10^{-5} برای خاک‌های ماسه‌ای سست تغییر می‌کند (شائو، ۲۰۰۴). γ تابعی است که به شکل $\gamma = \exp[-(u_* - u_{*t})^3]$ تعریف می‌شود. d_i قطر میانگین ذرات گردو خاک و Q شار جهش افقی کلوخه‌ای به قطر d_s است. η_{fi} کسر کلی گردو خاک آزاد شده از واحد جرم خاک را نشان می‌دهد. σ_p نسبت گردو خاک آزاد به گردو خاک کلوخه‌ای و σ_m نسبت جرم ذره پرتاب شده به بیرون با بمباران، به جرم ذره برخورد کننده است که با معادله (۶) بیان می‌شود:

$$\sigma_m = 12u_*^2 \frac{\rho_b}{p} (1 + 14u_* \sqrt{\frac{\rho_b}{p}}) \quad (6)$$

p فشار موم‌سانی خاک و ρ_b چگالی توده خاک است. فشار موم‌سانی خاک مقاومت خاک را در برابر نفوذ ذرات برخورد کننده به سطح، که باعث تولید گردو خاک می‌شوند، نشان می‌دهد. با افزایش فشار موم‌سانی خاک VDF برآورد شده کاهش می‌یابد (ژائو و همکاران، ۲۰۰۶). از آنجا که داده‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات و فشار موم‌سانی خاک در مقیاس منطقه‌ای در دسترس نیست، در عمل برای برآوردهای منطقه‌ای VDF اندازه این عامل‌ها براساس نوع خاک (بافت خاک) برآورد می‌شود (شائو، ۲۰۰۴).

عوامل مرتبط با خاک و سطح به شدت بر گسیل گردو خاک تأثیر می‌گذارند و شامل بافت و رطوبت خاک و حضور عنصرهای زبری سطح از جمله پوشش‌های گیاهی هستند. بنابراین، باید سرعت اصطکاکی آستانه، $u_{*t}(d)$ ، برای این عوامل تصحیح شود:

$$u_{*t}(d, \lambda, w) = u_{*t}(d) f_\lambda f_w \quad (7)$$

ضریب f_λ تابع تصحیح زبری و f_w تابع تصحیح رطوبت خاک است. طرحواره MBA تابع تصحیح زبری را برحسب طول زبری برآورد می‌کند (مارتیکورنا و

لحاظ نظری و هم تجربی). به این دلیل رابطه نهایی محاسبه VDF در طرحواره MBA - که یک طرحواره تجربی است - از برازش نسبت F/Q به درصد محتوای رس، η_c ، و با استفاده از داده‌های گیلت و واکر (۱۹۷۷) به دست می‌آید (مارتیکورنا و برگامتی، ۱۹۹۵):

$$\frac{F}{Q} = 0.01 \exp(0.308\eta_c - 13.82) \quad (4)$$

همچنین در برخورد ذرات جهیده با سطح انرژی جنبشی آنها پایسته نمی‌ماند و بخشی از آن تبدیل به گرما می‌شود که این تبدیل در رهیافت انرژی پایه به حساب نمی‌آید. برای غلبه بر این نارسایی‌ها طرحواره شائو رهیافت برداشت حجمی را پیشنهاد کرده است. کمیت کلیدی در این رهیافت فشار موم‌سانی خاک (p) است که به جای انرژی پیوندی از آن استفاده می‌شود. اندازه گیری p ساده تر است و این مزیت طرحواره شائو بر MBA است (لو و شائو، ۱۹۹۹). فشار موم‌سانی بر خاک‌های سخت زیاد و بر خاک‌های نرم، کم است (شائو، ۲۰۰۸).

در رهیافت برداشت حجمی، VDF براساس حجم حفره ایجاد شده در اثر برخورد ذرات جهیده به سطح برآورد می‌شود (لو و شائو، ۱۹۹۹). هنگامی که یک ماسه‌دانه جهیده به سطح برخورد می‌کند، چاله کوچکی را حفر می‌کند و ذرات خاک را به هوا پرتاب می‌کند (شائو، ۲۰۰۱). ماسه‌دانه جهیده در خاک هدف پیش می‌رود و سرانجام آن را ترک می‌کند و یا اینکه تا عمقی در خاک فرو می‌رود و با تلف شدن انرژی جنبشی‌اش متوقف می‌شود. گسیل گردو خاک در طرحواره شائو از تعریف شائو (۲۰۰۴) محاسبه می‌شود:

$$\tilde{F}(d_t, d_s) = c_y \eta_{fi} [(1 - \gamma) + \gamma \sigma_p] (1 + \sigma_m) \frac{gQ}{u_*^2} \quad (5)$$

c_y یک ضریب بی‌بعد است که از 1×10^{-5} برای

برگامتی، (۱۹۹۵):

می شود:

$$f_w(w) = \begin{cases} 1 & w < w' \\ [1 + 1.21(w - w')^{0.68}]^{0.5} & w > w' \end{cases} \quad (11)$$

$$w' = 0.0014(\%c)^2 + 0.17(\%c) \quad \text{با:}$$

در تحقیق حاضر شبیه سازی های گسیل گرد و خاک از سطح با دو طرحواره MBA و شائو در تاریخ ۲۴ مه ۲۰۱۲ باهم مقایسه شد که در آن تاریخ پدیده گرد و خاک در بسیاری از نقاط ایران گزارش شده بود. اندازه پارامترهای سطحی و واداشتهای جوئی لازم برای محاسبه VDF توسط طرحوارهها با اجرای مدل WRF در تاریخ مورد نظر به دست آمد. داده های شرایط آغازی و مرزی برای اجرای مدل WRF از داده های باز تحلیل شده نهایی (FNL, Final Analysis) پایگاه (National Centers for Environmental Prediction) NCEP، با تفکیک مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ و به صورت ۶ ساعته دریافت شد. کمیت های مورد نیاز برای اجرای طرحوارهها شامل نوع خاک، رطوبت خاک، سرعت اصطکاکی (m/s)، کسر پوشش گیاهی (%) و طول زبری ایروودینامیکی (m) است. منظور از رطوبت خاک رطوبت لایه سطحی خاک (لایه فوقانی به ضخامت ۱۰cm) است که در معرض فرسایش بادی قرار می گیرد و گسیل گرد و خاک از آن صورت می گیرد. برای اجرای مدل WRF دو شبکه تودرتو انتخاب شد، به نحوی که شبکه درونی کشور ایران را پوشش دهد (شکل ۲). شبکه مورد بررسی، شبکه درونی است. تفکیک مکانی شبکه درونی $10\text{km} \times 10\text{km}$ و شبکه بیرونی $30\text{km} \times 30\text{km}$ است. حوزه درونی در راستای طولی از $35/86^\circ\text{E}$ تا $66/31^\circ\text{E}$ و در راستای عرضی از $24/59^\circ\text{N}$ تا $40/85^\circ\text{N}$ گسترده شده است. از طرحواره سطح زمین Noah در قسمت فیزیک مدل استفاده شد. این طرحواره دما و رطوبت خاک را در چهار لایه خاک برآورد می کند. از رطوبت نخستین لایه (به ضخامت cm) برای محاسبه VDF در طرحواره های گسیل

$$f_\lambda = \left\{ 1 - \left[\frac{\ln(Z_m/z_{0s})}{\ln[0.35(10/z_{0s})^{0.8}]} \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

Z_m (cm) طول زبری سطح خاک عریان و z_{0s} ($\sim 10^{-3}$ cm) طول زبری مؤثر زمین ناهمگن (عنصرهای زبری و سطح عریان) است که از روش موزاییک (آویسار و پیلکه، ۱۹۸۹) محاسبه می شود. کسر پوشش گیاهی و طول زبری ایروودینامیکی از داده های مدل WRF گرفته می شود. اگر z_0 طول زبری ایروودینامیکی متناظر با کسر پوشش گیاهی (a_c) باشد، طول زبری مؤثر از رابطه (۹) به دست می آید:

$$Z_m = ac \times z_0 + (1 - ac) \times z_{0s} \quad (9)$$

طرحواره شائو تأثیر عنصرهای زبری را با تعریف مفهومی به نام شاخص ناحیه جبهه ای (λ) محاسبه می کند. تابع تصحیح زبری در طرحواره شائو با رابطه روپک (۱۹۹۲) تعریف می شود:

$$f_\lambda(\lambda) = (1 - m_r \sigma_r \lambda)^{0.5} (1 + m_r \beta_r \lambda)^{0.5} \quad (10)$$

$\sigma_r = 1$ ، $\beta_r = 90$ و $m_r = 0.5$ ضرایب ثابت هستند. شاخص λ از رابطه $\lambda = -C_\lambda \ln(1 - a_c)$ برآورد می شود که در آن a_c کسر پوشش گیاهی و $C_\lambda = 0.35$ ضریبی تجربی است (شائو، ۲۰۰۸).

بر اساس نتایج ژائو و همکاران (۲۰۰۶) حساسیت طرحواره MBA به کسر فرسایش ناپذیر (کسر غیربیابانی) سطح بیشتر است و در شرایط یکسانی از سایر کمیت ها (سرعت اصطکاکی، نوع و رطوبت خاک) VDF کمتری را برآورد می کند. در این پژوهش تابع تصحیح رطوبت خاک به کاررفته در هر دو طرحواره، مشترک و مطابق بیان فکان و همکاران (۱۹۹۹) در نظر گرفته شده است. از این رو در مقایسه VDF برآورد شده از طرحوارهها، اثر رطوبت خاک در نظر گرفته نمی شود. در تعریف فکان و همکاران (۱۹۹۹) تابع تصحیح رطوبت خاک (f_w) برحسب رطوبت (w) و مقدار نسبی رُس خاک (c) بیان

اجرای مدل WRF به دست آمده‌اند. نوع کاربری زمین به منظور تحلیل نتایج طرحواره‌ها آورده شده است. توزیع اندازه‌های VDF برای ساعت ۱۱ در داخل ایران در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ طرحواره شائو تعداد نواحی چشمه‌ای بیشتری را در مقایسه با طرحواره MBA نشان می‌دهد، زیرا براساس تحقیق ژائو و همکاران (۲۰۰۶) طرحواره MBA به کسر فرسایش ناپذیر سطح حساس تر است. از مقایسه شکل ۴ با شکل ۳ پیدا است که رطوبت خاک، طول زبری و کسر پوشش گیاهی در نواحی چشمه‌ای مقادیر کمی دارند و سرعت اصطکاکی در این نواحی زیاد است.

در جدول ۲ نواحی چشمه‌ای تولید شده با بیشینه VDF در داخل ایران برای ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه آمده است. شکل ۵ اختلاف VDF را بین طرحواره شائو و MBA در ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه نشان می‌دهد. رنگ سفید در این شکل نقاطی را نشان می‌دهد که هر دو طرحواره VDF را مساوی صفر برآورد کرده‌اند.

جدول ۱. زمان‌ها و مقادیر بیشینه و کمینه VDF ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) در تاریخ ۲۴ مه ۲۰۱۲.

	ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه (بیشینه)	ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه (کمینه)
شائو	۰ - ۹۰	۰ - ۱۲/۵
MBA	۰ - ۲۵	۰ - ۶/۵

جدول ۲. نواحی چشمه‌ای با بیشینه VDF برای ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه در داخل ایران.

	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	VDF ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
شائو	۵۷/۳۵° E	۳۰/۲۷° N	۸۶/۸
MBA	۵۱/۳۵° E	۳۳/۲۴° N	۱۸/۴۵

گردو خاک استفاده شد. در تاریخ موردنظر، مدل به مدت ۴۸ ساعت اجرا شد. ۲۴ ساعت نخست، زمان رسیدن مدل به پایداری (Spin Up) بود. بنابراین، ۲۴ ساعت دوم مربوط به زمان موردنظر یعنی ۲۴ مه است.

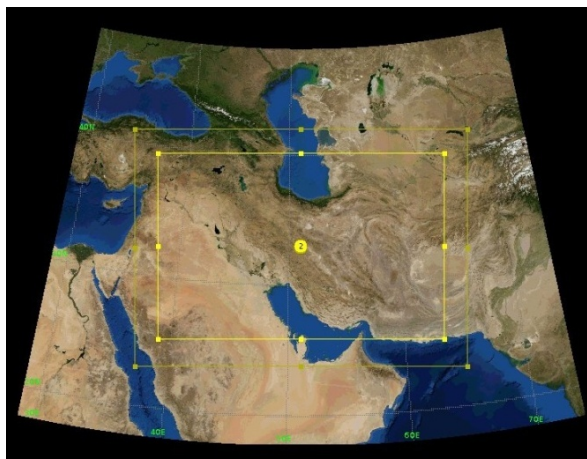
نوع خاک، طول زبری و کسر پوشش گیاهی کمیت‌هایی هستند که در بازه زمانی کوتاه یک شبانه‌روز تغییر نمی‌کنند و داده‌های مربوط به آنها در تاریخ ۲۴ مه از مدل گرفته شد. داده‌های مربوط به متغیرهای سرعت اصطکاکی و رطوبت خاک هر یک ساعت دریافت شد. به این ترتیب، نخست داده‌های ورودی طرحواره‌ها برای ۲۴ ساعت (ساعت ۰۰، ۰۱، ۰۲ و...) روز ۲۴ مه به دست آمد و سپس در هر ساعت VDF برای نقاط شبکه محاسبه شد. برای مقایسه طرحواره‌ها زمان‌هایی از شبانه‌روز انتخاب شد که VDF محاسبه شده، بیشینه و کمینه مقدار خود را داشت. در این ساعت‌ها ورودی‌ها و نتایج طرحواره‌ها و نیز تفاوت‌های طرحواره‌ها در برآورد VDF نشان داده شد. برای مقایسه دقیق‌تر طرحواره‌ها نواحی چشمه‌ای انتخاب شد که بیشینه VDF محاسبه شده با طرحواره‌ها در آنها گزارش شده بود. مقادیر کمیت‌های ورودی و نتایج به دست آمده از طرحواره‌ها در این نقاط باهم مقایسه شد. همچنین تغییرات VDF در ۲۴ ساعت شبانه‌روز برای دو ناحیه چشمه‌ای انتخابی در ایران عرضه شد.

۳ بحث و نتایج

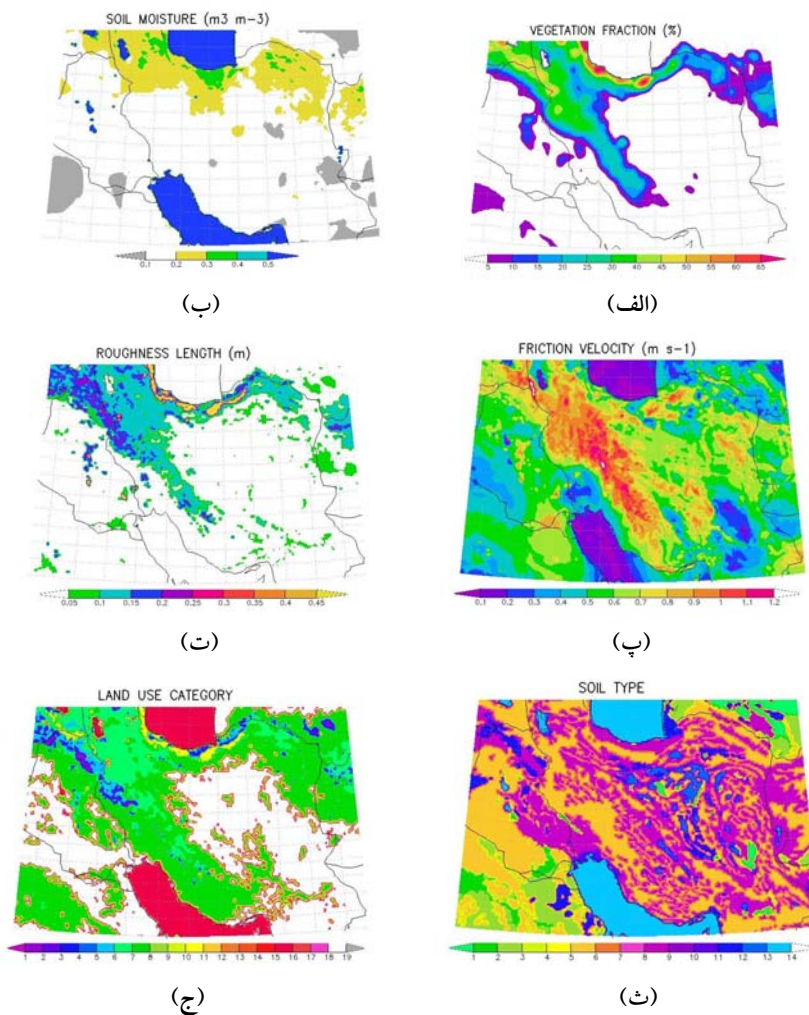
جدول ۱ زمان‌هایی را که VDF برآورد شده، بیشترین و کمترین مقدار را دارد، برای رویداد تابستانی ۲۴ مه ۲۰۱۲ نشان می‌دهد.

۱-۳ ساعت ۱۱

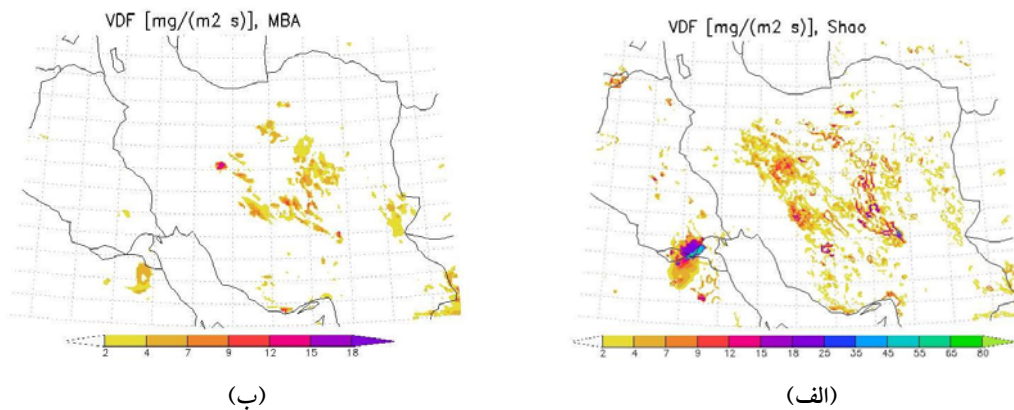
شکل ۳ داده‌های لازم را برای اجرای طرحواره‌ها در ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه در داخل ایران نشان می‌دهد که از



شکل ۲. شبکه‌های نودرتوی انتخاب‌شده برای استخراج داده‌ها از مدل WRF و اجرای طرحواره‌های گسیل گردو خاک.



شکل ۳. داده‌های لازم برای اجرای طرحواره‌ها در ساعت ۱۱ روز ۲۴ می: (الف) کسر پوشش گیاهی، (ب) رطوبت خاک، (پ) سرعت اصطکاکی، (ت) طول زبری، (ث) نوع خاک و (ج) کاربری زمین.

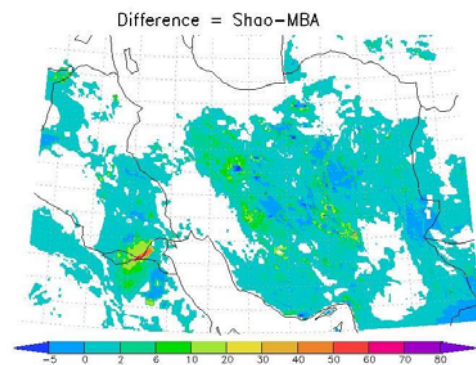


شکل ۴. اندازه‌های VDF برآورد شده با طرحواره‌های (الف) شائو و (ب) MBA در ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه در داخل ایران.

یافته است. با وجود سرعت اصطکاکی زیاد و یکسان بودن تقریبی رطوبت خاک در هر دو نقطه، علت صفر شدن VDF در طرحواره MBA در نقطه ۱، بیشتر بودن کسر پوشش گیاهی و طول زبری در این نقطه و تأییدی است بر نتایج ژائو و همکاران (۲۰۰۶) مبنی بر حساسیت بیشتر طرحواره MBA به کسر فرسایش‌ناپذیر سطح. اگرچه در نقطه ۲ سرعت اصطکاکی افزایش و کسر پوشش گیاهی کاهش یافته است، اما به علت افزایش فشار مومسانی نسبت به نقطه ۱ مقدار VDF برآورد شده با طرحواره شائو کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که طرحواره شائو به شدت تحت تأثیر فشار مومسانی خاک است. اما چون طرحواره MBA تحت تأثیر کسر پوشش گیاهی و طول زبری است، در نقطه ۱ مقدار $VDF=0$ و در نقطه ۲ بیشینه مقدار را برای VDF برآورد می‌کند. زیرا در نقطه ۲ سرعت اصطکاکی افزایش و کسر پوشش گیاهی و طول زبری کاهش یافته‌اند.

۲-۳ ساعت ۲۴

شکل ۶ سرعت اصطکاکی و رطوبت خاک را در ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه (ساعت ۰۰ روز ۲۵ می) نشان می‌دهد. نوع خاک، طول زبری، کسر پوشش گیاهی و رده کاربری



شکل ۵. اختلاف VDF برآورد شده با طرحواره‌های شائو و MBA در ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه.

بیشینه اختلاف در داخل ایران در نقطه $35^{\circ}E$ و $27^{\circ}N$ است که همان نقطه‌ای است که طرحواره شائو بیشینه VDF را در آن برآورد کرده است (جدول ۲). مقدار سرعت اصطکاکی و کمیت‌های مربوط به سطح و خاک در این نقطه و در نقطه‌ای که طرحواره MBA بیشینه VDF را برآورد می‌کند، در جدول ۳ آمده است. نقاط این جدول از چپ به راست ۱ و ۲ هستند. در این دو نقطه فشار مومسانی بیشترین تغییر را در میان کمیت‌ها داشته است و از $p=2500Pa$ در نقطه ۱ به $p=40000Pa$ در نقطه ۲ رسیده است. در نقطه ۲ مقدار VDF برآورد شده با طرحواره شائو به حدود ۱۱٪ مقدار اولیه کاهش

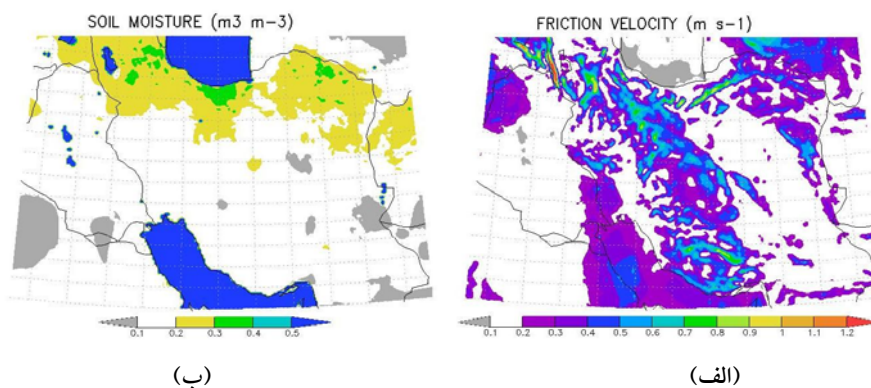
نواحی چشمه‌ای مقادیر کوچکی دارند، ولی سرعت اصطکاکی در این نواحی زیاد است. مقایسه رده کاربری زمین در شکل ۳ با نتایج طرحواره‌ها در شکل‌های ۴ و ۷ نشان می‌دهد که در تابستان رده کاربری زمین در نواحی چشمه‌ای، چمن‌زار، بوته‌زار، چمن‌زار/بوته‌زار و بیابان است. جدول ۴ نواحی چشمه‌ای تولید شده با بیشینه VDF را در داخل ایران برای ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه نشان می‌دهد. در این زمان دو طرحواره فعال‌ترین ناحیه چشمه‌ای را متفاوت از هم گزارش می‌کنند. شکل ۸ تفاوت VDF بین طرحواره شائو و MBA را در ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه نشان می‌دهد.

زمین در شکل ۳ آمده‌اند. اجرای طرحواره‌ها VDF را مطابق شکل ۷ برای ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه محاسبه کرد. در این شکل طرحواره شائو تعداد نواحی چشمه‌ای بیشتری را در مقایسه با طرحواره MBA نشان می‌دهد.

در ساعت ۲۴ تعداد نواحی چشمه‌ای نشان داده شده توسط طرحواره‌ها نسبت به ساعت ۱۱ (شکل ۴) کاهش یافته است. علت آن کاهش سرعت اصطکاکی در ساعت ۲۴ (شکل ۶-الف) نسبت به ساعت ۱۱ (شکل ۳-پ) است. مقایسه شکل ۷ با شکل‌های ۳ و ۶ نشان می‌دهد که رطوبت خاک، طول زبری و کسر پوشش گیاهی در

جدول ۳. اطلاعات مربوط به نقاط با بیشینه VDF برآورد شده با طرحواره‌ها در داخل ایران در ساعت ۱۱ روز ۲۴ مه.

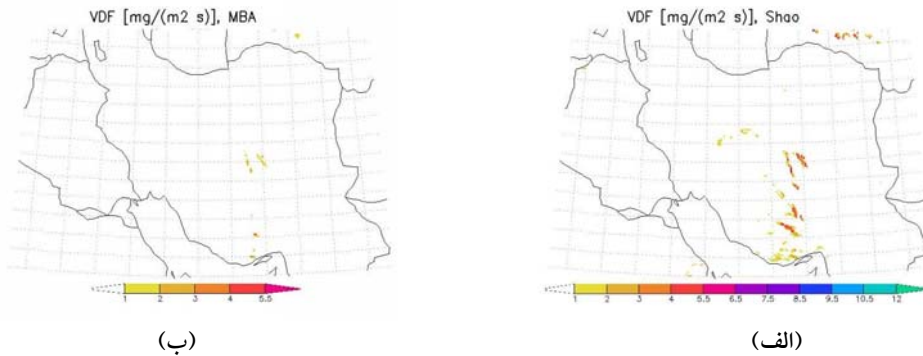
	lon=۵۷/۳۵° E lat=۳۰/۲۷° N	lon=۵۱/۳۵° E lat=۳۳/۲۴° N
نوع خاک	۳ (ماسه‌لوم)	۹ (رُس‌لوم)
سرعت اصطکاکی (m/s)	۰/۹۲	۱
رطوبت لایه سطحی خاک (m^3/m^3)	۰/۱	۰/۱۲
کسر پوشش گیاهی (%)	۲/۶	۱/۰۷
طول زبری (m)	۰/۰۴۶	۰/۰۳۶
کاربری زمین	۸ (بوته‌زار)	۹ (چمن‌زار/بوته‌زار)
$VDF (mg m^{-2} s^{-1})$	Shao	۹/۴۹
	MBA	۱۸/۴۵



شکل ۶. (الف) سرعت اصطکاکی و (ب) رطوبت خاک در ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه.

جدول ۴. نواحی چشمه‌ای با بیشینه VDF در داخل ایران برای ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه.

	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	VDF ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
شائو	$۵۵/۲۵^\circ \text{E}$	$۳۱/۵۷^\circ \text{N}$	۸/۲۸
MBA	$۵۵/۴^\circ \text{E}$	$۲۸/۱۵^\circ \text{N}$	۵/۷۱



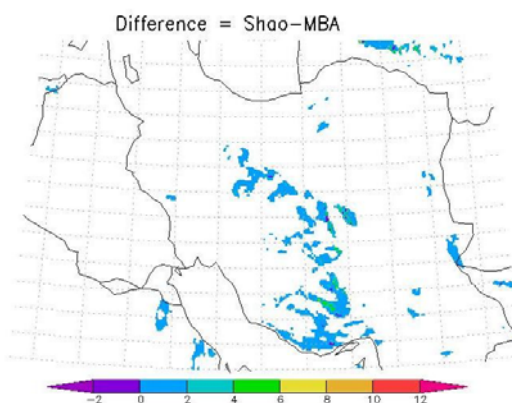
شکل ۷. اندازه‌های VDF برآورد شده توسط طرحواره‌های (الف) شائو و (ب) MBA در ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه در داخل ایران.

موم‌سانی در نقطه ۱ برابر با $p = 30000 \text{ Pa}$ است. در نقطه ۲ بزرگ بودن فشار موم‌سانی خاک رُس لوم ($p = 40000 \text{ Pa}$) باعث شده است که VDF برآورد شده با طرحواره شائو کمترین مقدار را در میان سایر نقاط داشته باشد. در نقطه ۲ طول زبری و کسر پوشش گیاهی مشابه با نقاط ۱ و ۳ است. بنابراین چون سرعت اصطکاکی نقطه ۲ از نقاط ۱ و ۳ بیشتر است، VDF برآورد شده با طرحواره MBA در نقطه ۲ بیشینه است.

با وجود شباهت کسر پوشش گیاهی و رطوبت خاک نقطه ۳ با نقاط ۱ و ۲، به علت بیشتر بودن طول زبری و کمتر بودن سرعت اصطکاکی در این نقطه طرحواره MBA مقدار VDF را بسیار کمتر از طرحواره شائو و تقریباً نزدیک صفر برآورد می‌کند. فشار موم‌سانی خاک ماسه‌رُس (نقطه ۳) برابر است با $p = 20000 \text{ Pa}$ که کمترین مقدار را در میان سایر نقاط دارد. یعنی فشار موم‌سانی و سرعت اصطکاکی بر نتایج طرحواره شائو تأثیر گذاشته است.

بیشینه اختلاف VDF برآورد شده با طرحواره‌ها در داخل ایران در نقطه $۵۵/۴۱^\circ \text{E}$ و $۲۹/۱۵^\circ \text{N}$ رخ می‌دهد که برابر $۷/۲ \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ است. با توجه به جدول ۴ این نقطه از نقطه‌ای که طرحواره شائو بیشینه VDF را گزارش می‌کند، متفاوت است. بنابراین، در این نقطه طرحواره MBA مقدار VDF را مخالف صفر، ولی کوچک ($۰/۰۰۷ \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) برآورد می‌کند. جدول ۵ اندازه سرعت اصطکاکی و کمیت‌های سطح و خاک را در این نقاط نشان می‌دهد.

نقطه‌های جدول ۵ از چپ به راست، ۱، ۲، ۳ هستند. در نقطه ۱ اگرچه طول زبری و کسر پوشش گیاهی کوچک است، اما به علت کم بودن سرعت اصطکاکی VDF برآورد شده با طرحواره شائو از طرحواره MBA بزرگ‌تر است. زیرا براساس نتایج ژائو و همکاران (۲۰۰۶)، بدون در نظر گرفتن تابع‌های تصحیح رطوبت و زبری، $u_{t, \text{Shao}}^* \leq u_{t, \text{MBA}}^*$ و بنابراین طرحواره شائو VDF را بزرگ‌تر از طرحواره MBA برآورد می‌کند. در نقطه ۱ طرحواره شائو بیشینه VDF را نشان داده است. فشار



شکل ۸. اختلاف VDF برآورد شده توسط طرحواره‌های شائو و MBA در ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه.

جدول ۵. اطلاعات مربوط به نقاط با بیشینه VDF برآورد شده با طرحواره‌ها و نقطه‌ای که طرحواره‌ها بیشترین اختلاف را با هم دارند در ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه.

	lon=۵۵/۲۵° E lat=۳۱/۵۷° N	lon=۵۵/۴° E lat=۲۸/۱۵° N	lon=۵۵/۴۱° E lat=۲۹/۱۵° N
نوع خاک	۱۱ (سیلت رُس)	۹ (رُس لوم)	۱۰ (ماسه رُس)
سرعت اصطکاکی (m/s)	۰/۵۹	۰/۷۳۵	۰/۵۳
رطوبت لایه سطحی خاک (m^3/m^3)	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۲
کسر پوشش گیاهی (%)	۱	۱/۰۲	۱
طول زبری (m)	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴
کاربری زمین	۱۹ (بیابان)	۸ (بوته زار)	۹ (چمن زار/بوته زار)
$VDF (mg m^{-2} s^{-1})$	Shao	۲	۷/۲۸
	MBA	۳/۲۵	۰/۰۰۷

رطوبت خاک را برای این ناحیه چشمه‌ای در بازه زمانی ساعت ۰۰ تا ساعت ۲۴ روز ۲۴ مه نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به رده کاربری زمین، کسر پوشش گیاهی، طول زبری و نوع خاک در جدول ۶ آورده شده است. تغییرات زمانی VDF تولیدشده با طرحواره‌ها در این ناحیه چشمه‌ای در شکل ۱۰ آورده شده است. باتوجه به شکل ۱۰ در این نقطه هر دو طرحواره بیشینه VDF را در ساعت ۱۱ و کمیته آن را در ساعت ۱۷ و بعد از آن نشان داده‌اند. در این ناحیه چشمه‌ای طرحواره MBA در هر ساعت VDF

۳-۳ بررسی تغییرات شبانه‌روزی VDF در دو ناحیه

چشمه‌ای

برای بررسی تغییرات VDF برآورد شده با طرحواره‌ها برحسب زمان در روز ۲۴ مه ناحیه چشمه‌ای در داخل ایران واقع در $۵۵/۸^{\circ} E$ و $۳۲/۵^{\circ} N$ انتخاب شد. زیرا بررسی ساعت به ساعت گسیل گردو خاک نشان داد که هر دو طرحواره برای این ناحیه به جز در ساعت‌های پایانی روز VDF را مخالف صفر برآورد می‌کنند. شکل ۹ نمودار تغییرات زمانی متغیرهای سرعت اصطکاکی و

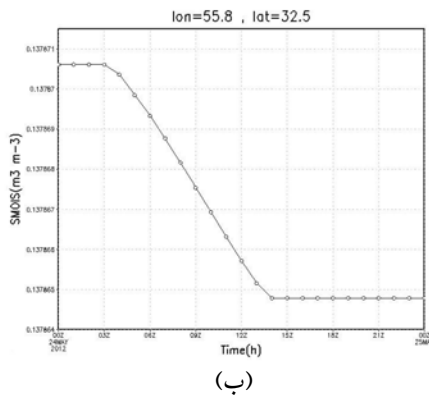
است. طرحواره شائو در این ناحیه چشمه‌ای VDF بیشتری را در هر ساعت در مقایسه با طرحواره MBA برآورد می‌کند. مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که بیشینه VDF در زمان‌هایی از شبانه‌روز است که رطوبت خاک کمینه و سرعت اصطکاکی بیشینه است؛ همچنین تغییرات VDF به شدت به تغییرات سرعت اصطکاکی بستگی دارد. هر دو طرحواره کمترین مقدار VDF را در ساعت ۰۲ و بیشترین مقدار آن را در ساعت ۱۶ نشان می‌دهند.

علت اینکه طرحواره شائو مقدار VDF را در همه ساعت‌ها بیش از طرحواره MBA برآورد می‌کند، کم بودن سرعت اصطکاکی است (بیشینه سرعت اصطکاکی فقط 0.5 m/s و حدود ساعت ۱۷ است) و براساس نتایج ژائو و همکاران (۲۰۰۶)، صرف نظر از تابع‌های تصحیح رطوبت و زبری، $u_{t, \text{Shao}}^* \leq u_{t, \text{MBA}}^*$ است. بنابراین، چون تابع تصحیح رطوبت در طرحواره‌ها یکسان، ولی حساسیت طرحواره MBA به پوشش گیاهی بیشتر است، در این نقطه که بیشینه سرعت اصطکاکی کوچک است، طرحواره شائو VDF بزرگ‌تری را برآورد می‌کند.

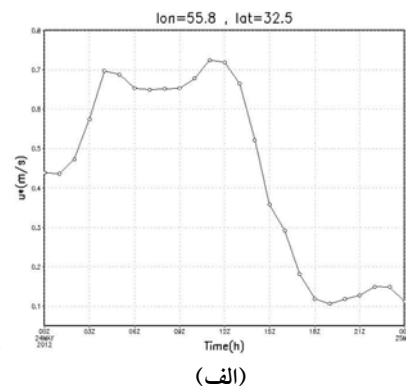
بیشتری را در مقایسه با طرحواره شائو تولید می‌کند که علت آن بزرگ بودن فشار موم‌سانی خاک در این نقطه است ($p = 50000 \text{ Pa}$).

مقایسه شکل ۹ با شکل ۱۰ نشان می‌دهد که بیشینه VDF در زمان‌هایی از شبانه‌روز دیده می‌شود که رطوبت خاک، کمینه و سرعت اصطکاکی بیشینه مقدار خود را داشته باشد. این مقایسه همچنین نشان می‌دهد که تغییرات سرعت اصطکاکی نسبت به تغییرات رطوبت خاک - شاید به علت تغییر ناچیز رطوبت در طول روز - تأثیر بیشتری بر تغییرات VDF دارد. یعنی VDF بیشتر تابعی از سرعت اصطکاکی است، زیرا تغییر رطوبت خاک در یک شبانه‌روز ناچیز است.

تغییرات VDF برآورد شده با طرحواره‌ها برحسب زمان در ناحیه چشمه‌ای دیگری واقع در $30/2^\circ \text{N}$ و $54/5^\circ \text{E}$ در تاریخ ۲۴ مه در شکل ۱۲ و تغییرات رطوبت خاک و سرعت اصطکاکی با زمان در همین نقطه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نوع خاک، طول زبری و کسر پوشش گیاهی در این ناحیه چشمه‌ای در جدول ۷ آمده



(ب)



(الف)

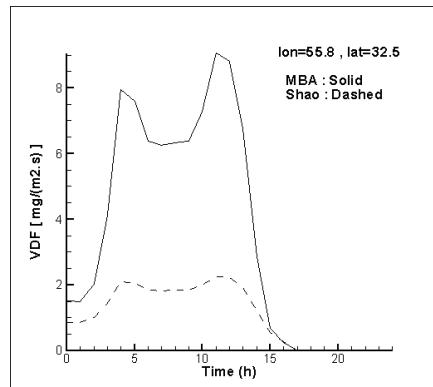
شکل ۹. تغییرات زمانی (الف) سرعت اصطکاکی و (ب) رطوبت خاک در ۲۴ مه در ناحیه چشمه‌ای $32/5^\circ \text{N}$ و $55/8^\circ \text{E}$.

جدول ۶. اطلاعات مربوط به ناحیه چشمه‌ای $32/5^\circ \text{N}$ و $55/8^\circ \text{E}$ در ۲۴ مه.

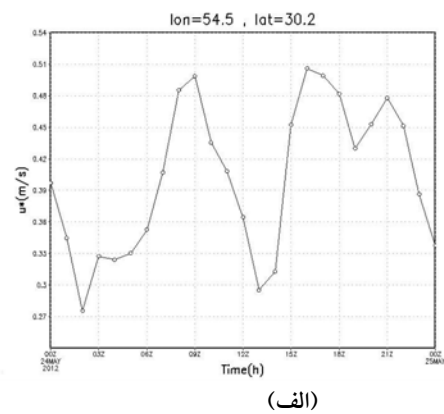
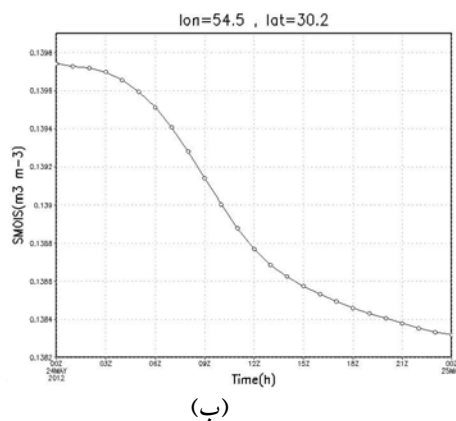
کاربری زمین	طول زبری (m)	کسر پوشش گیاهی (%)	نوع خاک
۱۹	۰/۰۱	۱	۱۲ (رُس)

جدول ۷. اطلاعات مربوط به ناحیه چشمه‌ای $54/5^{\circ}E$ و $30/2^{\circ}N$ در ۲۴ مه.

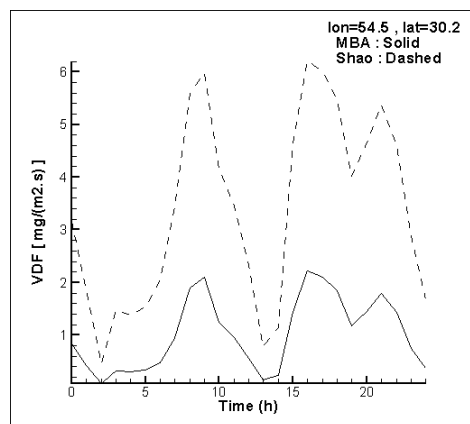
کاربری زمین	طول زبری (m)	کسر پوشش گیاهی (%)	نوع خاک
۱۹ (بیابان)	۰/۰۱	۱	۱۰ (ماسه‌زس)



شکل ۱۰. تغییرات زمانی VDF برآورد شده با طرحواره‌های شائو و MBA در ۲۴ مه در ناحیه چشمه‌ای $55/8^{\circ}E$ و $32/5^{\circ}N$.



شکل ۱۱. تغییرات زمانی (الف) سرعت اصطکاکی و (ب) رطوبت خاک در ۲۴ مه در ناحیه چشمه‌ای $54/5^{\circ}E$ و $30/2^{\circ}N$.



شکل ۱۲. تغییرات زمانی VDF برآورد شده با طرحواره‌های شائو و MBA در ۲۴ مه در ناحیه چشمه‌ای $54/5^{\circ}E$ و $30/2^{\circ}N$.

۴ نتیجه‌گیری

برآورد خواهد کرد. از میان همه کمیت‌های تأثیرگذار در برآورد VDF با طرحواره‌ها، طول زبری مهم‌ترین کمیت در طرحواره MBA و فشار موم‌سانی خاک مهم‌ترین کمیت در طرحواره شائو است.

در وضعیتی که کسر پوشش گیاهی حدود ۰.۱٪، رطوبت خاک حدود $0.6 \text{ m/s} \geq u_*$ ، $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ، اگر فشار موم‌سانی خاک کمتر از $Z_0=1 \text{ cm}$ باشد، آن‌گاه VDF برآورد شده با طرحواره MBA ۴۰۰۰۰ باشد، اگر فشار موم‌سانی از طرحواره شائو کمتر است، ولی اگر فشار موم‌سانی خاک بزرگ‌تر یا برابر 40000 Pa باشد، آن‌گاه VDF برآورد شده با طرحواره MBA از طرحواره شائو بیشتر است.

بیشینه VDF در یک ناحیه چشمه‌ای در زمان‌هایی از شبانه‌روز است که رطوبت خاک کمینه و سرعت اصطکاکی (u_*) بیشینه مقدار خود را داشته باشد. همچنین در هر ناحیه چشمه‌ای به علت تغییرات ناچیز رطوبت خاک در یک شبانه‌روز، تغییرات شبانه‌روزی سرعت اصطکاکی تأثیر بیشتری بر تغییرات VDF در یک شبانه‌روز دارد. یعنی تغییرات شبانه‌روزی VDF در نواحی چشمه‌ای بیشتر تابعی از تغییرات شبانه‌روزی سرعت اصطکاکی است.

مراجع

- Alfaro, S. C. and Gomes, L., 2001, Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distribution in source areas, *J. Geophys. Res.*, **106**(D16), 18,075-18,084.
- Alfaro, S. C., Gaudichet, A., Gomes, L. and Maille', M., 1997, Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting, *J. Geophys. Res.*, **102**, 11239-11249.
- Alfaro, S. C., Gaudichet, A., Gomes, L. and Maille', M., 1998, Mineral aerosol production by wind erosion: aerosol particle sizes and binding energies, *J. Geophys. Res. Lett.*, **25**(7), 991-994.

در این پژوهش شبیه‌سازی گسیل گردو خاک با طرحواره‌های گسیل گردو خاک مارتیکورنا - برگامتی - آلفارو (MBA) و شائو در نواحی چشمه‌ای ایران با هم مقایسه شد که به ترتیب با استفاده از رهیافت‌های انرژی پایه و برداشت حجمی، شار قائم گردو خاک (VDF) را برآورد می‌کنند. کمیت‌های مورد نیاز برای اجرای طرحواره‌ها نوع خاک، سرعت اصطکاکی (m/s)، طول زبری سطح (m)، کسر پوشش گیاهی و رطوبت حجمی لایه سطحی خاک هستند. این کمیت‌ها برای تاریخ ۲۴ مه ۲۰۱۲ با اجرای مدل WRF در ایران به دست آمد. با اجرای طرحواره‌ها VDF در نقاط شبکه محاسبه شد. نتایج نشان داد طرحواره شائو تعداد نواحی چشمه‌ای را بیش از طرحواره MBA نشان می‌دهد. در نقطه‌هایی که طرحواره شائو، $VDF=0$ را برآورد کند، طرحواره MBA هم $VDF=0$ را محاسبه خواهد کرد، اما برعکس آن لزوماً درست نیست.

رطوبت خاک، طول زبری و کسر پوشش گیاهی در نواحی چشمه‌ای مقادیر کوچکی دارند، ولی سرعت اصطکاکی در این نواحی زیاد است. یعنی در نواحی چشمه‌ای، رطوبت خاک حدود $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ، طول زبری حداکثر تا 4 cm (که البته طرحواره MBA برای طول زبری بیش از 1 cm ، مقدار VDF را همیشه صفر یا تقریباً صفر محاسبه می‌کند)، کسر پوشش گیاهی کمتر از ۰.۵٪ و سرعت اصطکاکی بیش از 0.5 m/s است. رده کاربری زمین در نواحی چشمه‌ای، بیابان، چمن‌زار، بوته‌زار و چمن‌زار/بوته‌زار است.

حساسیت طرحواره MBA به کسر پوشش گیاهی و طول زبری (Z_0) بیش از طرحواره شائو است. اگر $Z_0 \geq 4 \text{ cm}$ باشد، آن‌گاه نوع خاک هر چه باشد و سایر کمیت‌ها هر مقداری داشته باشند، طرحواره MBA، مقدار VDF را صفر یا مقداری ناچیز (در مرتبه $10^{-3} \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

- Geophys. Res., **104**(D14), 16827-16842.
- Marticorena, B. and Bergametti, G., 1995, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, **100**, 16415-16430.
- Nickovic, S. and Callos, G., 2001, A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **106**(D16), 18113-18129.
- Raupach, M. R., 1992, Drag and drag partition on rough surfaces, *Boundary Layer Meteorol.*, **60**, 375-395.
- Shao, Y., 2008, *Physics and modeling of wind erosion*, Springer, New York.
- Shao, Y., 2001, A model for mineral dust emission, *J. Geophys. Res.*, **106**, 20239-20254.
- Shao, Y., 2004, Simplification of a dust emission scheme and comparison with data, *J. Geophys. Res.*, **109**, D10202, doi: 10.1029/2003JD004372.
- Shao, Y. and Lu, H., 2000, A simple expression for wind erosion threshold friction velocity, *J. Geophys. Res.*, **105**(D17), 22437-22443.
- Shao, Y., Raupach, M. R. and Leys, J. F., 1996, A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region, *Aust. J. Soil Res.*, **34**, 309-342.
- White, B., 1979, Soil transport by wind on Mars, *J. Geophys. Res.*, **84**, 4643-4651.
- Zhao, T. L., Gong, S. L., Zhang, X. Y., Abdel-Mawgoud, A. and Shao, Y., 2006, An assessment of dust emission schemes in modeling East Asian dust storms, *J. Geophys. Res.*, **111**, D05S90, doi:10.1029/2004JD005746.
- Avissar, R. and Pielke, R. A., 1989, A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Mon. Weather Rev.*, **117**, 2113-2136.
- Fe'can, F., Marticorena, B. and Bergametti, G., 1999, Parameterization of the invrease of the aeolian erosion threshold wind friction elocitydue to soil moisture for arid and semi-arid areas, *Ann. J. Geophys.*, **17**, 149-157.
- Golitsyn, G. S., Granberg, I. G., Andronova, A. V., Ponomarev, V. M., Zilitinkevich, S. S., Smirnov, V. V. and Yablokov, M. YU., 2002, Investigation of boundary layer fine structure in arid regions: injection of fine dust into the atmosphere, *Water, Air, and Soil Pollution, Focus*, **3**, 245-257.
- Gillette, D. A. and Walker, T. R., 1977, Characteristics of airborne particles produced by wind erosion on sandy soil, high plains of west Texas, *Soil Sci.*, **123**, 97-110.
- Greeley, R. and Iversen, J. D., 1985, *Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Laurent, B., Marticorena, B., Bergametti, G., Chazette, P., Maignan, F. and Schmechtig, C., 2005, Simulation of the mineral dust emission frequencies from desert areas of China and Mongolia using an aerodynamic roughness length map derived from the POLDER/ADEOS 1 surface products, *J. Geophys. Res.*, **110**, D18S04, doi: 10.1029/2004JD005013.
- Lu, H. and Shao, Y., 1999, A new model for dust emission by saltation bombardment, *J.*