

مدلی عددی به روش حجم متناهی برای شبیه‌سازی انتقال گردو خاک در جو

سارا کرمی^۱، عباس رنجبر سعادت‌آبادی^۲، علیرضا محب‌الحججه^{۳*} و محمد مرادی^۲

۱. دانشجوی دکتری، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲. استادیار، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۵/۷/۲۴، پذیرش نهایی: ۹۵/۱۱/۵)

چکیده

امروزه پدیده گردو خاک در بسیاری از مناطق دنیا به‌ویژه خاورمیانه به یکی از مشکلات بزرگ تبدیل شده است. در این مطالعه، به‌منظور شبیه‌سازی انتقال و نهشت ذرات گردو خاک با استفاده از تعدادی از طرحواره‌های روش حجم متناهی، مدلی ارائه و خروجی هریک از این طرحواره‌ها برای دو مطالعه موردی بررسی شده است. همچنین به‌منظور بررسی درستی خروجی‌ها و ارزیابی نحوه شناسایی چشمه گسیل گردو خاک و گستردگی مناطق تحت پوشش آن، خروجی طرحواره UNO مرتبه دوم به‌عنوان نمونه با تصاویر ماهواره و خروجی مدل HYSPLIT مقایسه شده است. داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل از جمله داده‌های باد از خروجی مدل WRF استخراج و برای محاسبه گسیل سطحی گردو خاک از طرحواره GOCART استفاده شده است.

مقایسه خروجی این مدل با تصاویر ماهواره نشان می‌دهد که مدل در هر دو توفان گردو خاک مناطق تحت پوشش و چشمه گسیل را به‌درستی شبیه‌سازی کرده است. همچنین الگوی گردو خاک به‌دست‌آمده توسط طرحواره‌های مختلف با توجه به اینکه میدان باد و طرحواره گسیل مشابه است، شباهت قابل قبولی با یکدیگر دارند و از مقایسه کمی طرحواره‌ها نتیجه‌گیری می‌شود که طرحواره UNO مرتبه دوم پس از طرحواره پادجرینسو، کمترین زمان اجرا را دارد و در مقایسه با سایر طرحواره‌های مرتبه اول و دوم دارای کمترین میرایی است. مقایسه کمی خروجی طرحواره‌ها با خروجی مدل WRF-Chem نشان می‌دهد که این طرحواره از نظر جذر میانگین مجذور خطا و ضریب همبستگی نیز در مقایسه با سایر طرحواره‌های مشابه عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: پدیده گردو خاک، حجم متناهی، شبیه‌سازی، طرحواره، مدل، مقایسه کمی.

۱. مقدمه

جفت می‌شوند (شائو و همکاران، ۲۰۰۶). در بخش گسیل، برای محاسبه شار سطحی گردو خاک، داده‌های اقلیمی از جمله جنس خاک و پوشش گیاهی مورد نیاز است. در بیشتر مدل‌ها مانند CFORS (یونو، ۲۰۰۳)، COAMPS (لیو و وستفال، ۲۰۰۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۳) و DREAM (نیکوویک و همکاران، ۲۰۰۱) از داده‌های سازمان زمین‌شناسی کشور آمریکا (USGS) استفاده می‌کنند که اخیراً داده‌هایی از نوع پوشش جهانی با تفکیک ۰/۵ کیلومتر برپایه داده‌های سنجنده مودیس ماهواره‌های ترا و آکوا در طول ۱۰ سال (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰) ارائه کرده است (بروکستن و همکاران، ۲۰۱۴). جزئیات برخی از طرحواره‌های گسیل را که در مدل‌های مختلف به کار می‌روند، می‌توان در مراجع شائو و همکاران (۱۹۹۳)، مارتیکورنا و برگامتی (۱۹۹۵)، گوئل و همکاران

امروزه وقوع توفان‌های شدید گردو خاک در بیشتر مناطق دنیا سبب مختل شدن زندگی مردم و بروز خسارات شدید مالی و جانی می‌شود. پیش‌بینی درست و به‌موقع پدیده توفان گردو خاک می‌تواند در صدور هشدارهای لازم به‌منظور کاهش خسارات ناشی از این پدیده‌ها مؤثر باشد. بنابراین مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی غلظت ذرات معلق گردو خاک و چگونگی انتشار و نشست آن‌ها ارائه شده است (کلارکو و همکاران، ۲۰۰۹؛ زاکی و همکاران، ۲۰۰۶؛ نیکوویک و همکاران، ۲۰۰۱؛ وودوارد، ۲۰۰۱). به‌طور کلی برای پدیده گردو خاک سه فاز گسیل (emission)، انتقال یا ترابرد (transport) و نهشت (deposition) در نظر گرفته می‌شود که در هر یک از این بخش‌ها به داده‌های مختلفی نیاز است؛ بنابراین برای پیش‌بینی پدیده گردو خاک عمدتاً چندین مدل با یکدیگر

(CFORS) یا تابعی از تنش باد در نظر گرفته شود (مدل COAMPS) یا به صورت نهشت گرانشی و پخش (مدل‌های CEMSYS5 و GOCART) محاسبه شود. همچنین در محاسبه نهشت تر، برخی طرحواره‌ها اندازه هواویزها و قطره‌های باران را در نظر می‌گیرند (برای نمونه، جونگ، ۲۰۰۵) و برخی دیگر از طرحواره‌ها، آن را تنها تابعی از مقدار بارش در نظر می‌گیرند (مانند برانت و همکاران، ۲۰۰۲). در طول فرایند پیش‌بینی و شبیه‌سازی گردو خاک برخی مدل‌ها مانند BSC-DREAM8b برهم‌کنش تابشی را در نظر گرفته و برخی دیگر مانند مدل‌های MACC و CHIMERE از برهم‌کنش مستقیم و غیرمستقیم ذرات گردو خاک با تابش صرف نظر می‌کنند. امروزه روش‌های حجم متناهی برای حل معادلات پایستگی در بخش ترابرد مدل‌های جوئی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (لاریتزن، ۲۰۰۶). بر این مبنا، به منظور شبیه‌سازی انتقال ذرات گردو خاک در جو، مدلی با استفاده از طرحواره‌های مختلف روش حجم متناهی توسعه داده شده و خروجی هریک از این طرحواره‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین به منظور محاسبه داده‌های جوئی مورد نیاز از جمله سرعت باد و ارتفاع ژئوپتانسیلی، از خروجی مدل WRF استفاده شده است. داده‌های مذکور از خروجی WRF در بازه‌های زمانی یک‌ساعته استخراج شده و در بازه‌های زمانی ۱۸۰ ثانیه به صورت خطی درونیابی شده‌اند؛ در بخش گسیل گردو خاک از طرحواره GOCART استفاده شده است.

۲. روش پژوهش

در این گونه مطالعات، معادله پایستگی برای غلظت ذرات گردو خاک به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{F}_{adv}) - \nabla \cdot (\mathbf{F}_{dif}) = D + W \quad (1)$$

که در آن c غلظت ذرات گردو خاک بر حسب μgm^{-3} ، $\mathbf{F}_{adv} \equiv \mathbf{v}c$ شار ترابردی یا فرارفتی با میدان سرعت \mathbf{v} ، $\mathbf{F}_{dif} \equiv k\nabla c$ شار پخش با ضریب پخش k ، D نهشت

(۲۰۰۰)، شولز (۲۰۰۷)، مورکرت و همکاران (۲۰۰۸) و (۲۰۰۹)، وودوارد (۲۰۰۱ و ۲۰۱۱) یافت. علاوه بر آن داده‌های هواشناسی همچون سرعت باد یا سرعت اصطکاکی، رطوبت خاک و مقدار بارش نیز مورد نیاز است که به این منظور از خروجی یک مدل پیش‌بینی هوا در مقیاس جهانی یا منطقه‌ای استفاده می‌شود؛ به عنوان مثال CEMSYS5 (شائو و همکاران، ۲۰۰۷) از مدل منطقه‌ای HIRES (لسلی و وایتویک، ۱۹۹۵)، DREAM از مدل منطقه‌ای NCEP-Eta (یانچ، ۱۹۹۰، ۱۹۹۴؛ بلک، ۱۹۹۴؛ مسینگر، ۲۰۰۰) و Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱؛ جیلز، ۲۰۰۵) از مدل جهانی ناسا GEOS-DAS (شوبرت و همکاران، ۱۹۹۳) برای مدل جوئی استفاده می‌کنند که می‌تواند به صورت برخط یا برون خط (offline) باشد.

در بخش انتقال گردو خاک معادله پایستگی جرم حل می‌شود که هریک از مدل‌های گردو خاک از روشی خاص برای حل این معادله استفاده می‌کنند. برای مثال، بنابر نیکویک و همکاران (۲۰۰۱)، در مدل DREAM در بخش ترابرد افقی و قائم طرحواره‌های مورد استفاده مشابه مدل جوئی NCEP-Eta است و در محاسبه ضرایب پخش قائم نیز مشابه مدل Eta، یک طرحواره بسته‌ای نوع تلاطمی کولموگروف-هایزنبرگ با فرض اینکه k برابر با ضریب پخش قائم گرما باشد، به کار می‌رود (یانچ، ۱۹۹۰، ۱۹۹۴، ۱۹۹۶). همچنین مدل DREAM از ضرایب انتشار افقی نوع اسمالگورینسکی که با انرژی تلاطمی مدل اصلاح شده است، استفاده می‌کند (یانچ، ۱۹۹۰). در مدل CEMSYS برای ترابرد افقی از یک روش مرتبه دوم محدودکننده شار استفاده شده (لوک، ۱۹۹۶) و محدودکننده شار MC (ون‌لیر، ۱۹۷۷) به کار رفته است. همچنین ترابرد قائم با طرحواره بوت (۱۹۸۹) حل شده و ضرایب پخش نیز از مدل جوئی مورد استفاده، مدل HIRES استخراج شده است.

در بخش نهشت ممکن است میزان آن ثابت (مدل

پایستگی در سه بعد، معادله ۶ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \varphi_j^{n+1} = & \varphi_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{i+\frac{1}{2},j,k} - F_{i-\frac{1}{2},j,k} \right) - \\ & \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2},k} - G_{i,j-\frac{1}{2},k} \right) \\ & - \frac{\Delta t}{\Delta z} \left(H_{i,j,k+\frac{1}{2}} - H_{i,j,k-\frac{1}{2}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن G و H مانسته‌های F به ترتیب در راستای y و z هستند. حل این معادله بر روی یک شبکه آراکاو C با فاصله شبکه‌ای ۳۰ km با ۹۸ نقطه در راستای x و ۸۴ نقطه در راستای y و ۳۰ تراز قائم انجام گرفته است. دستگاه مختصاتی که به منظور حل معادله در نظر گرفته شده، دستگاه مختصات دکارتی با مختصه قائم ارتفاع است که با توجه به ارتفاع سطوح ۱۱ در مدل WRF، متغیر در نظر گرفته شده است. همچنین از تصویر نقشه کمربت استفاده شده که برای عرض‌های جغرافیایی میانی مناسب است.

به منظور محاسبه داده‌های جوی مورد نیاز برای حل معادله، مدل WRF روی شبکه‌ای یکسان اجرا شده و کمیت‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، سه مؤلفه سرعت باد، ضرایب پخش که برای گردو خاک نیز مشابه رطوبت فرض شده است و فاکتور نقشه از خروجی مدل که با بازه زمانی یک‌ساعته موجود بود، استخراج شده است. از آنجا که گام زمانی در شبیه‌سازی انتقال ذرات گردو خاک به منظور رعایت شرط CFL برابر با ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد، داده‌های به دست آمده از مدل به صورت خطی درون‌یابی می‌شوند. برای شرایط اولیه و مرزی مدل WRF از داده‌های تحلیل GFS با تفکیک ۰/۵ درجه استفاده شده است. طرحواره‌هایی که در اجرای این مدل استفاده شده‌اند در جدول ۱ ارائه شده است.

خشک و W نهشت تراست.

چنانچه معادله پایستگی را در یک بعد، به صورت کلی برای کمیت ψ در نظر گرفته و مجموع شارهای فرارفتی و پخشی را با f نمایش دهیم:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} f(\psi) = 0, \quad (2)$$

با میانگین‌گیری از قانون پایستگی دقیق (۲) روی j امین یاخته شبکه و انتگرال‌گیری در یک گام زمانی، به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta x} \int_{x_j - \frac{\Delta x}{2}}^{x_j + \frac{\Delta x}{2}} \psi(x, t^{n+1}) dx = & \frac{1}{\Delta x} \int_{x_j - \frac{\Delta x}{2}}^{x_j + \frac{\Delta x}{2}} \psi(x, t^n) dx - \\ & \frac{1}{\Delta t} \left(\int_{t^n}^{t^{n+1}} f\left(\psi\left(x_j + \frac{\Delta x}{2}, t\right)\right) dt - \right. \\ & \left. \int_{t^n}^{t^{n+1}} f\left(\psi\left(x_j - \frac{\Delta x}{2}, t\right)\right) dt \right) \end{aligned} \quad (3)$$

در تقریب حجم متناهی، φ_j میانگین فضایی ψ روی یاخته j را تقریب می‌زند:

$$\varphi_j^n \approx \frac{1}{\Delta x} \int_{x_j - \frac{\Delta x}{2}}^{x_j + \frac{\Delta x}{2}} \psi(x, t^n) dx, \quad (4)$$

و $F_{j+\frac{1}{2}}$ میانگین زمانی شار از طریق دیواره بین یاخته‌های j و $j+1$ است:

$$F_{j+\frac{1}{2}} \approx \frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^{n+1}} f\left(\psi\left(x_j + \frac{\Delta x}{2}, t\right)\right) dt. \quad (5)$$

بنابراین روش‌های حجم متناهی رابطه زیر را حل می‌کنند:

$$\varphi_j^{n+1} = \varphi_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{j+\frac{1}{2}} - F_{j-\frac{1}{2}} \right) \quad (6)$$

آنچه طرحواره‌های مختلف روش حجم متناهی را از یکدیگر متمایز می‌سازد، نحوه محاسبه شارها در مرز یاخته است که برای همه الگوریتم‌های مورد بررسی، در بخش ۲-۱ ارائه می‌شود. حال برای حل معادله

جدول ۱. طرحواره‌های استفاده شده در اجرای مدل WRF.

WRF Single-Moment 5-class scheme	فیزیک خردمقیاس
RRTM scheme (Mlawer et al., 1997)	تابش موج بلند
Goddard shortwave (Chou and Suarez, 1994)	تابش موج کوتاه
Noah Land Surface Model	فیزیک سطحی
Yonsei University scheme (Noh et al., 2003)	لایه مرزی
Grell 3D	همرفت کومه‌ای

WRF گزینه محاسبه ضرایب پخش سه‌بعدی با استفاده از الگوریتم اسماگورینسکی مرتبه اول به کار می‌رود که در آن ضرایب پخش با استفاده از جملات دگرشکلی محاسبه می‌شود. مرحله آخر محاسبه نهشت خشک و تر است. سرعت نهشت خشک ثابت و برابر با 0.01 ms^{-1} در نظر گرفته می‌شود که مشابه کار ساندرام و همکاران (۲۰۰۴) است. در بخش نهشت تر، در صورتی که این نهشت برابر با λc باشد که در آن λ ضریب نهشت تر و واحد آن $1/s$ است، این مقدار به صورت $\lambda = AP^B$ محاسبه می‌شود که در آن P مقدار بارش برحسب mmh^{-1} است و A و B ضرایب ثابتی هستند که مطابق کار برانت و همکاران (۲۰۰۲) به ترتیب برابر با 0.79×10^{-5} و $8/4 \times 10^{-5}$ در نظر گرفته شده است. در نهایت این معادله با طرحواره‌های مختلف حجم متناهی از جمله پادجریانسو، روش محدودکننده شار super_minmode bee (رو، ۱۹۸۵)، MC (ون لیر، ۱۹۷۷) و Van Leer (ون لیر، ۱۹۷۴)، UNO مرتبه دوم و سوم (لی، ۲۰۰۸) و بوت مرتبه دوم و چهارم (بوت، ۱۹۸۹) حل شده و نتایج شبیه‌سازی پس از ۷۲ ساعت ارائه و با یکدیگر مقایسه می‌شود. به منظور مقایسه کمی خروجی طرحواره‌ها به دلیل نبود داده‌های مشاهداتی قابل قبول، به مقایسه آن‌ها با خروجی مدل WRF-Chem پس از ۷۲ ساعت پرداخته و از کمیت‌های آماری جذر میانگین مجذور خطا، مقدار بهنجارشده آن و ضریب همبستگی استفاده شده است:

طرحواره گسیل GOCART نیز برای محاسبه شار قائم گردوخاک از سطح استفاده شده است. این طرحواره، چشمه‌های بالقوه گردوخاک را بر پایه کسر فرسایش‌پذیر در نظر می‌گیرد (کاوازوس گویرا، ۲۰۱۱). شار قائم گردوخاک از سطح به صورت زیر محاسبه می‌شود (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۴):

$$F = c_v S_p u_{10}^2 (u_{10} - u_{th}) \quad u_{10} > u_{th} \quad (8)$$

که c_v ثابتی تجربی است که برابر با $1/9 \mu\text{gs}^2 \text{m}^{-5}$ در نظر گرفته شده است؛ u_{10} سرعت باد در تراز ۱۰ متر و u_{tp} سرعت آستانه برای فرسایش بادی ذره به اندازه p است که در سرعت‌های کمتر از آن هیچ گسیلی صورت نمی‌گیرد. S_p کسر هر دسته اندازه گردوخاک و S کسر نهشت تجمعی در مناطقی است که سطوح فرسایش‌پذیر کمی دارند (چین و همکاران، ۲۰۰۳). در این طرحواره پنج اندازه مختلف برای ذرات خاک به شکل آرمانی کروی با شعاع‌های ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شعاع‌های مؤثر ذرات عبارتند از: ۰/۷۳، ۱/۴، ۲/۴، ۴/۵ و ۸ میکرومتر که همه محاسبات برای هرکدام از آن‌ها انجام می‌گیرد. از آنجایی که در مطالعه حاضر تنها یک اندازه برای ذرات گردوخاک در نظر گرفته شده است، شار مورد نیاز را از مجموع شارهای سطحی به اندازه‌های مختلف به دست آورده‌ایم.

به‌منظور در نظر گرفتن جملات مربوط به پخش افقی و قائم، علاوه بر محاسبه شار پخش، باید ضرایب پخش قائم و افقی نیز در نظر گرفته شود؛ بنابراین در اجرای مدل

مقدار کمیت مورد نظر روی مرز $i + \frac{1}{2}$ یاخته (سلول) برابر با مقدار یاخته واقع در پادجریانسوی مرز است؛ بنابراین بسته به علامت سرعت روی مرز ممکن است مقدار آن در نقطه i یا $i+1$ باشد:

$$F_{i+\frac{1}{2}} = u_{i+\frac{1}{2}} \phi_i \quad \text{If } u_{i+\frac{1}{2}} > 0, \\ F_{i+\frac{1}{2}} = u_{i+\frac{1}{2}} \phi_{i+1} \quad \text{If } u_{i+\frac{1}{2}} < 0 \quad (10)$$

۲-۱-۲. طرحواره UNO

اگر نوع نوشتار را مشابه ارائه‌دهنده این روش (لئونارد، ۱۹۹۱) در نظر بگیریم، برای مرز یک یاخته داده شده $j+1/2$ که دارای سرعت فرضی $u_{j+\frac{1}{2}}$ است، یک یاخته مرکزی C به‌عنوان یاخته‌ای که شار عبوری از مرز از آنجا می‌آید (یاخته z وقتی $u_{j+\frac{1}{2}} > 0$) شناخته می‌شود. یاخته جریانسو (D) یاخته‌ای است که شار به آن می‌رسد (یاخته $z+1$ وقتی $u_{j+\frac{1}{2}} > 0$) و یاخته پادجریانسو (U) یاخته بعد از یاخته مرکزی در جهت مخالف است (یاخته $z-1$ وقتی $u_{j+\frac{1}{2}} > 0$). اگر سرعت منفی باشد برای مرز $j+1/2$ یاخته $z+1$ یاخته مرکزی، یاخته z ، یاخته جریانسو و یاخته $z+2$ یاخته پادجریانسو است. در این بخش تمام فرمول‌ها به‌صورت پادجریانسو-مرکزی-جریانسو (UCD) نوشته خواهد شد. گرادیان بین هر دو یاخته A و B به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_{AB} = (\psi_A - \psi_B) / (X_A - X_B) \quad (11)$$

که برای همه یاخته‌ها متقارن است، یعنی $G_{AB} = G_{BA}$. با این نوع نوشتار، شار برای روش پادجریانسو به‌صورت:

$$F_{j+\frac{1}{2}} = u_{j+\frac{1}{2}} \psi_C \quad (12)$$

و برای دو روش UNO به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}, \\ \text{Normalized RMSE} = \frac{RMSE}{\max(O_i) - \min(O_i)}, \\ r = \frac{\sum (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2}} \quad (9)$$

در همه معادلات، F_i خروجی طرحواره مورد نظر در هر نقطه شبکه، O_i خروجی مدل WRF-Chem همان نقطه شبکه، N تعداد کل نقاط شبکه و علامت بار نیز نشان‌دهنده میانگین مکانی بر روی همه نقاط است.

از آنجایی که خروجی مدل WRF-Chem را مرجع در نظر گرفته‌ایم، به منظور تشابه بیشتر در شرایط اجرا، همه الگوریتم‌های مورد استفاده را مشابه مدل WRF که در جدول ۱ ارائه شده است، در نظر گرفته‌ایم و از طرحواره گسیل GOCART که به صورت برخط در حین اجرای مدل شارها را محاسبه می‌کند، استفاده کرده‌ایم. البته از آنجایی که طرحواره‌های مورد بررسی برون‌خط هستند و به این دلیل داده‌ها در زمان درونیابی می‌شوند و همچنین به دلیل تفاوت در شرایط مرزی، وجود اندکی اختلاف گریزناپذیر است.

۲-۱-۱. الگوریتم‌ها

تفاوت طرحواره‌های مختلف روش حجم متناهی در نحوه محاسبه شارها است. در این بخش به‌طور خلاصه به چگونگی محاسبه شارها در طرحواره‌های مورد بررسی می‌پردازیم. برای کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با هر یک از طرحواره‌ها می‌توان به مقالات مرجع آن‌ها که در مقدمه ذکر شده است، مراجعه کرد.

۲-۱-۱-۲. طرحواره پادجریانسو

چنانچه بخواهیم به صورت ساده بیان کنیم در این روش

UNO2:

$$F_{j+\frac{1}{2}} = u_{j+\frac{1}{2}} \left[\psi_C + 0.5 \operatorname{sgn}(\psi_D - \psi_C) \left(\Delta x_C - \left| u_{j+\frac{1}{2}} \right| \Delta t \right) \min(|G_{DC}|, |G_{CU}|) \right] \quad (13)$$

UNO3:

$$F_{j+\frac{1}{2}} = u_{j+\frac{1}{2}} \left[\psi_C + 0.5 \operatorname{sgn} \left(u_{j+\frac{1}{2}} \right) \left(\Delta x_C - \left| u_{j+\frac{1}{2}} \right| \Delta t \right) G_C \right] \quad (14)$$

$$G_C = G_{DC} - \frac{\left(\Delta x_D + \left| u_{j+\frac{1}{2}} \right| \Delta t \right) \left(G_{DC} - G_{CU} \right)}{1.5 \operatorname{sgn} \left(u_{j+\frac{1}{2}} \right) \left(x_D - x_U \right)} \quad \text{for } |G_{DC} - G_{CU}| < 1.2 |G_{DU}|$$

$$G_C = 2 \operatorname{sgn}(G_{DC}) \min(|G_{DC}|, |G_{CU}|) \quad \text{for } G_{DC} G_{CU} > 0 \quad (15)$$

$$G_C = \operatorname{sgn}(G_{DC}) \min(|G_{DC}|, |G_{CU}|) \quad \text{otherwise}$$

۳-۱-۲. الگوریتم بوت

در این روش شار با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{j+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \sum_{k=0}^l \frac{a_{j,k}}{(k+1)2^{k+1}} \left[1 - \left(1 - 2c_{j+\frac{1}{2}} \right)^{k+1} \right] \quad (16)$$

در هر یک از آن‌ها محدودیت‌هایی برای شار در نظر گرفته شده است. از آنجایی که در اینجا تنها از مرتبه‌های دوم و چهارم این روش استفاده شده است، ضرایب به صورت زیر ارائه می‌شود:

که در آن l مرتبه روش و $c_{j+\frac{1}{2}} = u_{j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta x}$ عدد کورانت است. این الگوریتم به دو صورت مثبت معین (*positive definite*) و یکنوا (*monotone*) ارائه شده که

$$l=2 \quad a_{j,0} = -\frac{1}{24}(\psi_{j+1} - 26\psi_j + \psi_{j-1}), \quad a_{j,1} = \frac{1}{2}(\psi_{j+1} - \psi_{j-1}), \quad a_{j,2} = \frac{1}{2}(\psi_{j+1} - 2\psi_j + \psi_{j-1}) \quad (17)$$

$$l=4 \quad a_{j,0} = \frac{1}{1920}(9\psi_{j+2} - 116\psi_{j+1} + 21346\psi_j - 116\psi_{j-1} + 9\psi_{j-2}),$$

$$a_{j,1} = \frac{1}{48}(-5\psi_{j+2} + 34\psi_{j+1} - 34\psi_{j-1} + 5\psi_{j-2}),$$

$$a_{j,2} = \frac{1}{48}(-3\psi_{j+2} + 36\psi_{j+1} - 66\psi_j + 36\psi_{j-1} - 3\psi_{j-2}),$$

$$a_{j,3} = \frac{1}{12}(\psi_{j+2} - 2\psi_{j+1} + 2\psi_{j-1} - \psi_{j-2}),$$

$$a_{j,4} = \frac{1}{48}(\psi_{j+2} - 4\psi_{j+1} + 6\psi_j - 4\psi_{j-1} + \psi_{j-2}). \quad (18)$$

۲-۱-۴. طرحواره با محدود کننده شار

این طرحواره برخلاف طرحواره‌های قبلی که یک بُعدی هستند و کاربرد آن‌ها در سه بعد، تنها با جداسازی عملگر (operator splitting) میسر است، دارای ساخت دو بُعدی است و تنها در بعد سوم باید روش دیگری استفاده شود. در این روش نخست برای در نظر گرفتن شارش دو بُعدی، جمله‌ای به شار روش پادجریانسو افزوده می‌شود:

$$F_{i+\frac{1}{2},j}^{ctu} = F_{i+\frac{1}{2},j}^{up} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} uv (\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}), \quad (19)$$

که F^{up} و G^{up} شارهای به دست آمده با استفاده از روش پادجریانسو است. روش بالا مرتبه اول است، زیرا یک طرحواره خطی است (گدونو، ۱۹۵۹)؛ بنابراین لوک (۱۹۹۶) با افزودن شارهای تصحیح کننده به آن یک طرحواره مرتبه دوم مشابه روش لکس-وندروف به دست آورد:

$$F_{i+\frac{1}{2},j} = F_{i+\frac{1}{2},j}^{ctu} + \frac{|u|}{2} \left(I - |u| \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \left(\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} \right) c \left(r_{i+\frac{1}{2},j} \right) \quad (20)$$

$$r_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}} \quad (21)$$

از آنجایی که این طرحواره مرتبه دوم است و کاهنده وردش کل (TVD: Total Variation Diminishing) نیست، باید از محدود کننده شار استفاده کرد. در رابطه بالا $c(r)$ محدود کننده شار بوده و دارای مقداری بین ۰ و ۱

است که می‌توان آن را با روش‌های مختلف به دست آورد.

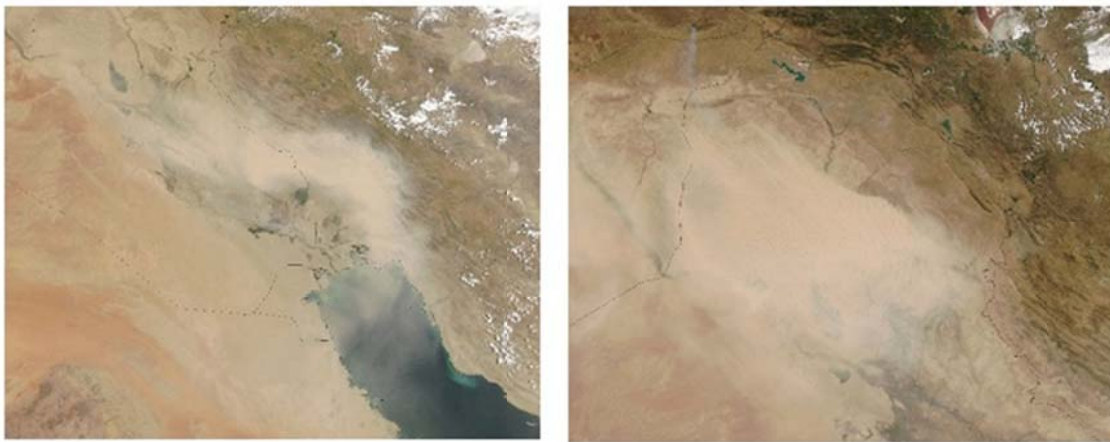
۳. نتایج و بحث

۳-۱. نمونه اول

در روز ۲۸ خرداد ۱۳۹۱ یک توده گردو خاک از نواحی شرقی سوریه و شمالی عراق گسیل می‌شود که به دلیل وزش بادهای شمال غربی در این منطقه وارد کشور عراق شده و از آنجا نیز وارد مناطق غربی و جنوب غربی ایران می‌شود. در روز ۲۹ خرداد علاوه بر انتقال توده گردو خاک تولید شده در روز قبل، توده گردو خاکی از نواحی مرکز و جنوب عراق گسیل می‌شود که آن نیز تحت تأثیر وزش بادهای غرب و شمال غربی بوده و وارد مناطق جنوب غربی ایران می‌شود، به گونه‌ای که در روز ۳۰ خرداد دید افقی در شهرهای واقع در جنوب غربی ایران به شدت کاهش می‌یابد. شکل ۱ تصاویر سنجنده مودیس ماهواره آکوا (<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards>) را در روزهای ۲۹ و ۳۰ خرداد سال ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. طبق تصاویر، گسیل گردو خاک در روز ۲۸ خرداد از شرق کشور سوریه آغاز شده و در جهت جنوب شرقی منتقل و وارد کشور عراق می‌گردد و در ادامه به مناطق غربی ایران و خلیج فارس منتقل می‌شود. همچنین در مناطق مرکزی ایران نیز یک توده گردو خاک ضعیف مشاهده می‌گردد که به نظر می‌رسد وجود رشته کوه‌های زاگرس مانع از پیوستن این دو توده گردو خاک به یکدیگر و انتقال گردو خاک گسیل یافته از عراق و سوریه به مناطق مرکزی ایران می‌گردد.

جدول ۲. روابط محدود کننده شار مورد استفاده.

رابطه	محدود کننده شار
$c(r) = \max(0, \min(1, r))$	Minmod
$c(r) = \max(0, \min(1, 2r), \min(2, r))$	Super bee
$c(r) = \frac{r + r }{1 + r }$	Van Leer
$c(r) = \max\left(0, \min\left(2r, \frac{1+r}{2}, 2\right)\right)$	Monotonized Centered (MC)



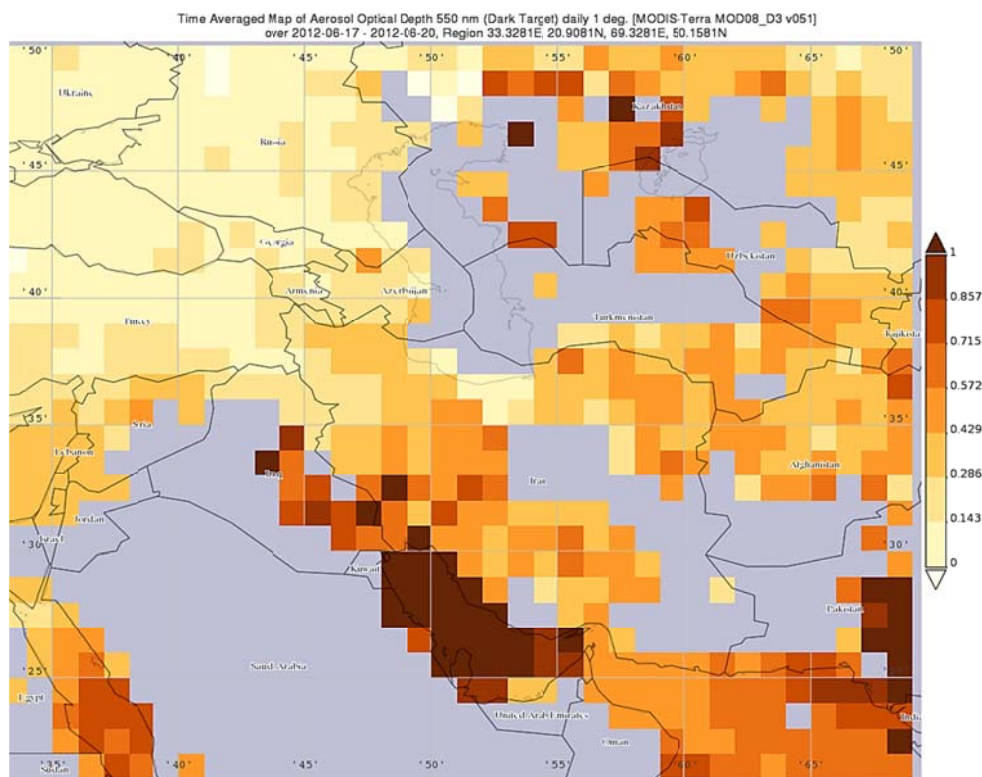
(ب)

(الف)

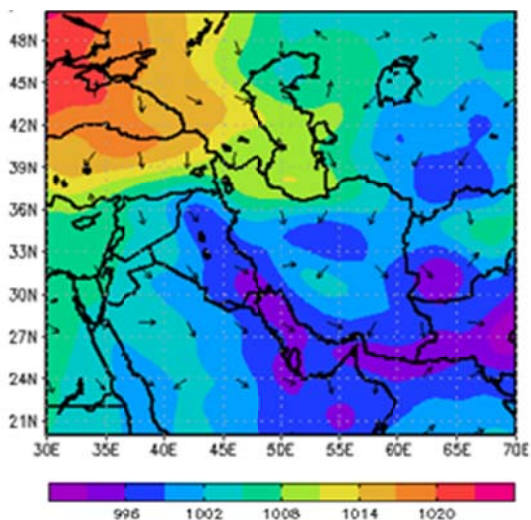
شکل ۱. تصویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس ماهواره آکوا در ساعت ۱۲:۰۰ UTC (الف) روز ۲۹ خرداد و (ب) ۳۰ خرداد ماه سال ۱۳۹۱.

گردو خاک در جو نیز هست، در مناطق شرق و جنوب شرقی کشور عراق، جنوب غربی ایران و خلیج فارس است. همچنین در مناطق شمال شرقی و مرکزی ایران مقادیر عمق نوری نسبتاً زیادی دیده می شود.

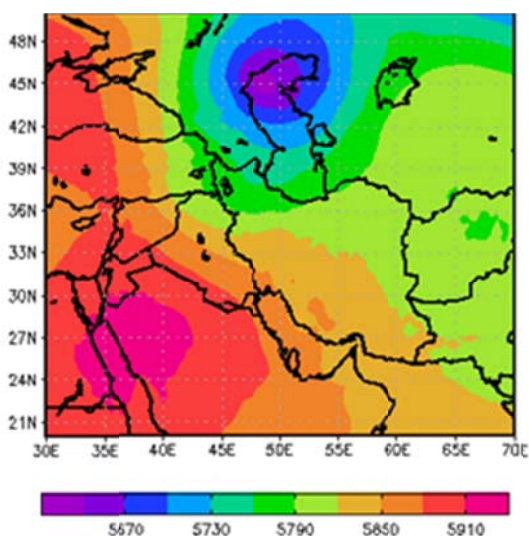
شکل ۲ میانگین عمق نوری کانال ۵۵۰ nm مودیس ماهواره ترا را در روزهای ۲۸ تا ۳۱ خرداد نشان می دهد که با الگوریتم Dark Target به دست آمده است (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>). بیشترین عمق نوری که در واقع نشان دهنده بیشترین مقدار



شکل ۲. میانگین عمق نوری کانال ۵۵۰ nm مودیس ماهواره ترا با الگوریتم Dark Target در روزهای ۲۸ تا ۳۱ خرداد سال ۱۳۹۱.



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) فشار سطح دریا و باد سطحی، ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۲۹ خرداد سال ۱۳۹۲.

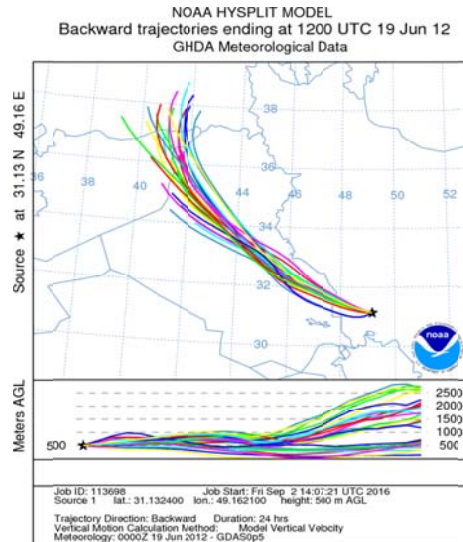
خروجی مدل Hysplit (درکسلر و رولف، ۲۰۰۳) که با استفاده از داده‌های GDAS با تفکیک ۰/۵ درجه به صورت پس سو (backward) برای ۲۴ ساعت به صورت همادی اجرا شده، در شکل ۴ الف ارائه شده است. نقطه تعیین شده برای مقصد گردو خاک در ۳۱ درجه شمالی و

شکل ۳ الف نقشه فشار سطح دریا و باد تراز ۱۰ متر از سطح زمین را در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۲۹ خرداد ۱۳۹۲ نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های تحلیل GFS با تفکیک ۰/۵ درجه به دست آمده است. یک مرکز پرفشار بر روی دریای سیاه واقع شده که زبان‌های آن تا جنوب کشور ترکیه را در بر گرفته و از شمال غربی ایران به داخل کشور نفوذ کرده است. همچنین زبان‌های یک سامانه کم‌فشار گرمایی از سمت جنوب شرقی وارد ایران شده و تا کشور عراق را در بر گرفته است؛ بنابراین شیو (گرادیان) فشار بزرگی در مناطق شرقی شکل گرفته است که سبب وزش باد به نسبت شدید در این مناطق مستعد گسیل گردو خاک می‌شود. جهت باد سطحی نیز در این مناطق شمال غربی است که موجب انتقال گردو خاک به کشور عراق می‌شود. در شکل ۳ ب ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa نمایش داده شده است. یک مرکز کم‌ارتفاع بر روی شمال دریای خزر واقع شده که زبان‌های آن تا شمال کشور عراق و شمال شرقی سوریه کشیده شده است، به گونه‌ای که این مناطق در جلوی محور ناوه واقع شده و تحت تأثیر حرکات صعودی هستند؛ بنابراین گردو خاک گسیل شده تا ارتفاعات بیشتری در جو نفوذ کرده و به دلیل سرعت باد بیشتر در این ترازها ذرات گردو خاک تا مسافت بیشتری منتقل می‌شوند. از طرف دیگر یک مرکز پر ارتفاع بر روی عربستان واقع شده که زبان‌های آن تا شمال شرقی ایران کشیده شده است؛ در نتیجه آن مناطق جنوب غربی ایران، سواحل خلیج فارس و بخش‌های مرکزی کشور تحت تأثیر حرکات نزولی جلوی محور پشته واقع شده‌اند که می‌تواند سبب نهشت گردو خاک در این مناطق گردد.

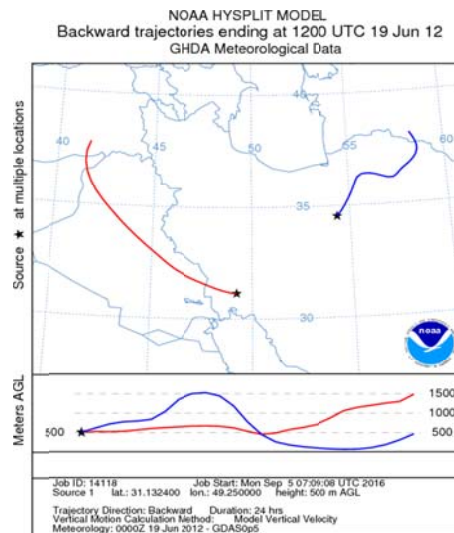
۴۹ درجه شرقی قرار دارد. در اجرای همادی مدل از آنجایی که یکی از منابع خطای مسیر، جایی است که مسیرها حول نقطه مورد نظر آغاز می‌شوند و واگرایی مسیرها برآوردی عددی از عدم قطعیت مربوط به مکان نقطه مرکزی ارائه می‌دهد، در مدل HYSPLIT این روش مستقیم در کد وارد شده است؛ بنابراین مسیرها به صورت خودکار حول یک مکعب که مرکز آن در نقطه آغازین قرار دارد، محاسبه می‌شوند؛ البته مکان‌های اولیه جابه‌جا نمی‌شوند، بلکه فقط نقطه داده هواشناسی وابسته به هر مسیر مشخص تغییر می‌کند؛ بنابراین همه مسیرها از نقطه‌ای مشابه آغاز می‌شوند. مطابق با تصاویر ماهواره، خروجی مدل چشمه گسیل گردوخاک جنوب غربی ایران را در بیشتر اجراها در شرق سوریه نشان داده و مسیر انتقال گردوخاک را از شرق سوریه به سمت مناطق مرکزی عراق و از آنجا به غرب و جنوب غربی ایران نمایش می‌دهد. همچنین خروجی این مدل (شکل ۴.ب) چشمه گسیل گردوخاک واقع در مناطق مرکزی ایران را در شمال شرقی ایران، مرز ترکمنستان نشان می‌دهد.

خروجی طرحواره UNO مرتبه دوم پس از گذشت ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ۷۲ ساعت از شروع اجرا در ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز ۲۹ خرداد سال ۱۳۹۱ در شکل ۵ نشان داده شده است. در روز ۲۹ خرداد ساعت ۰۶:۰۰ UTC (شکل ۵.الف) در مناطق مرکزی سوریه، جنوب شرقی عراق، شمال شرقی عربستان، شمال شرقی ایران در مرز ترکمنستان و جنوب غربی پاکستان مقادیر زیاد غلظت گردوخاک مشاهده می‌شود. در ساعت ۱۲ همین روز (شکل ۵.ب) از غلظت گردوخاک کاسته شده ولی توزیع آن تغییر چندانی نداشته است که به دلیل افزایش ارتفاع لایه مرزی در این ساعت از روز قابل قبول است و به نوعی نشان‌دهنده چرخه روزانه گردوخاک می‌باشد. در روز ۳۰ خرداد ساعت ۰۰:۰۰ UTC (شکل ۵.ج) غلظت

گردوخاک در همه مناطق به‌ویژه مرز سوریه و عراق افزایش شایان توجهی داشته و در ساعت ۱۲ (شکل ۵.د) توده گردوخاک واقع بر روی عراق به سمت شرق جابه‌جا شده، گستردگی بیشتری یافته و بخش‌هایی از جنوب غربی ایران و شمال خلیج فارس را نیز در بر گرفته است. در روز ۳۱ خرداد ساعت ۰۰:۰۰ UTC (شکل ۵.ه) غلظت توده گردوخاک واقع در شمال شرقی ایران افزایش یافته و به سمت مناطق مرکزی کشور گسترش می‌یابد، همچنین غلظت گردوخاک در شمال عربستان نیز افزایش یافته است. در ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز ۱ تیرماه (شکل ۵.و) گردوخاک مناطق بیشتری از ایران را تحت پوشش قرار داده و در مناطق شرقی ایران نیز غلظت آن قابل توجه است. توده گردوخاک واقع در جنوب غربی ایران به سمت شرق منتقل شده و بخش وسیع‌تری از خلیج فارس تحت تأثیر آن قرار گرفته است. به نظر می‌رسد وجود رشته‌کوه زاگرس مانع از اتصال دو توده گردوخاک واقع در مناطق مرکزی و جنوب غربی ایران می‌شود. به‌طور کلی مقایسه الگوی به‌دست‌آمده از مدل با تصاویر ماهواره، تشابه خوبی را نشان می‌دهد. همچنین چشمه گسیل گردوخاک جنوب غربی ایران در شرق سوریه و گردوخاک واقع در مناطق مرکزی ایران در شمال شرقی کشور و در کشور ترکمنستان با خروجی مدل Hysplit در توافق است. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد، الگوی به‌دست‌آمده از همه طرحواره‌ها شباهت شایان توجهی دارند و تنها تفاوت‌های جزئی در پیوستگی دو توده و مقادیر بیشینه آن‌ها مشاهده می‌شود. بنابراین برای مقایسه خروجی طرحواره‌ها، مقادیر بیشینه غلظت گردوخاک به‌دست‌آمده از هر یک از الگوریتم‌ها در همه ترازهای مدل و زمان لازم برای اجرای آن‌ها که نشان‌دهنده حجم محاسبات است، مقایسه می‌شود.



(الف)



(ب)

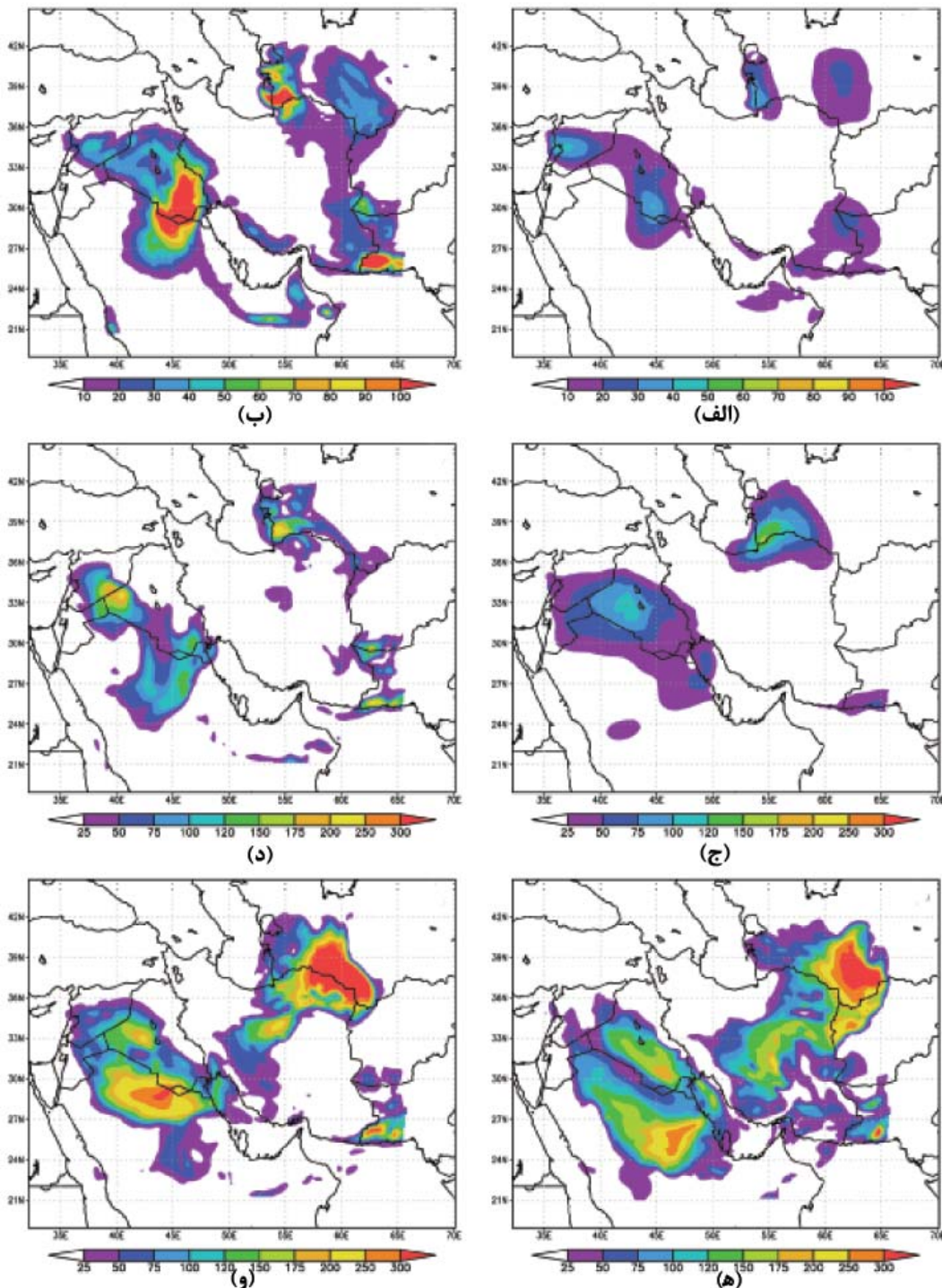
شکل ۴. الف. خروجی مدل Hysplit با استفاده از داده‌های GDAS با تفکیک ۰/۵ درجه با روش پس‌سو از روز ۳۰ خرداد سال ۱۳۹۱ برای ۲۴ ساعت به صورت الف) همادی برای یک نقطه، ب) معمولی برای دو نقطه.

که کمترین مرتبه دقت و بیشترین میرایی را دارد و بیشترین مقدار به دست آمده مربوط به طرحواره مرتبه چهارم بوت است. از آنجایی که همه محاسبات توسط یک رایانه انجام گرفته است، می‌توان زمان لازم برای اجرا را نشان‌دهنده حجم محاسبات دانست. کمترین زمان لازم برای اجرا مربوط به طرحواره پادجریانسو و پس از آن طرحواره مرتبه دوم UNO است و بیشترین زمان اجرا برای الگوریتم مرتبه

مقادیر بیشینه غلظت گردو خاک و زمان لازم برای اجرای همه طرحواره‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. از آنجا که همه الگوریتم‌های مورد استفاده یکنوا (monotone) هستند و مقادیر بیشینه و کمینه مصنوعی تولید نمی‌کنند، می‌توان با مقایسه مقادیر بیشینه به اندازه میرایی الگوریتم‌ها پی برد. مقایسه مقادیر بیشینه به دست آمده نشان می‌دهد، مطابق انتظار، کمترین مقدار مربوط به طرحواره پادجریانسو است

الگوریتم UNO مرتبه سوم و پس از آن بوت مرتبه چهارم و با فاصله کمی از آن مرتبه دوم مربوط است.

چهارم بوت است که دارای بیشترین مرتبه درون‌یابی است. همچنین در مقایسه با خروجی مدل WRF_Chem کمترین مقدار جذر میانگین مجذور خطا به



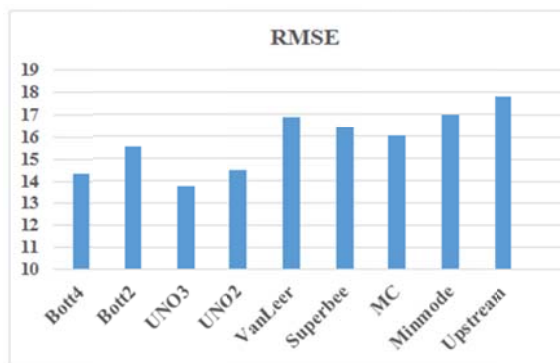
شکل ۵. خروجی طرحواره UNO مرتبه دوم در الف) ساعت UTC ۰۶:۰۰؛ ب) ساعت UTC ۱۲:۰۰ روز ۲۹ خرداد؛ ج) ساعت UTC ۰۰:۰۰؛ د) ساعت UTC ۱۲:۰۰ روز ۳۰ خرداد؛ ه) ساعت UTC ۱۲:۰۰ روز ۳۱ خرداد؛ و) ساعت UTC ۱۲:۰۰ روز ۱ تیر ماه سال ۱۳۹۱.

نیز شرط CFL، $|\mu| < 1$ برآورده می‌شود، طرحواره UNO2 تنها این نقطه را برای یک شارش ناواگرا هموار می‌کند و بنابراین ضمن اینکه شرط غیرنوسانی طرحواره minmod حفظ می‌شود، میرایی در مقایسه با آن کمتر است. برای سهولت مقایسه نتایج، در شکل ۶ الف، زمان اجرا و مقادیر بیشینه و در شکل ۶ ب جذر میانگین مجذور خطای همه الگوریتم‌های مورد بررسی به صورت نمودار میله‌ای ارائه شده است.

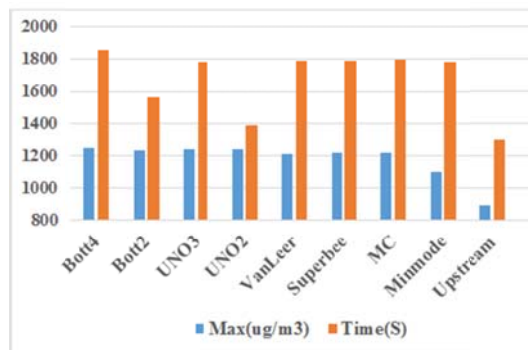
از نظر حجم محاسبات، الگوی به‌دست‌آمده، اندازه میرایی و همچنین سایر کمیت‌های مورد بررسی از جمله ضریب همبستگی و RMSE، در این مطالعه موردی طرحواره مرتبه دوم UNO را می‌توان بهترین روش دانست. تفاوت طرحواره UNO2 با طرحواره minmod در زمانی است که یاخته مرکزی در یک نقطه، بیشینه $\Psi_c > \max(\Psi_U, \Psi_D)$ یا کمینه $\Psi_c < \min(\Psi_U, \Psi_D)$ باشد. از آنجایی که در اینجا

جدول ۳. کمیت‌های آماری برای مقایسه کمی هریک از طرحواره‌های مورد استفاده.

Upstream	Minmode	Mc	Superbee	VanLeer	UNO2	UNO3	Bott2	Bott4	طرحواره
۸۹۱/۲۴	۱۰۹۷/۴۹	۱۲۱۹/۱۶	۱۲۱۴/۴۷	۱۲۰۶/۴۹	۱۲۳۵/۹۵	۱۲۴۱/۷۲	۱۲۳۱/۲۱	۱۲۴۷/۷۶	بیشینه ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
۱۲۹۸/۶۲	۱۷۸۵/۴۱	۱۷۹۳/۷۲	۱۷۹۱/۲۳	۱۷۸۹/۰۵	۱۳۸۶/۸۹	۱۷۸۵/۵۳	۱۵۶۴/۱۸	۱۸۵۹/۱۴	زمان (s)
۱۷/۸۱۷	۱۶/۹۵۳	۱۶/۰۲۵	۱۶/۳۹۸	۱۶/۸۹۳	۱۴/۴۶۵	۱۳/۷۲۶	۱۵/۵۰۱	۱۴/۳۵۲	جذر میانگین مربعات خطا
۰/۰۲۸۶	۰/۰۲۷۲	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۶۳	۰/۰۲۷۱	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۴۹	۰/۰۲۳	جذر میانگین مربعات خطای بی‌بعد شده
۰/۷۰۹	۰/۸۵۹	۰/۸۷۴	۰/۸۷۵	۰/۸۷۲	۰/۹۰۸	۰/۹۳۴	۰/۸۹۱	۰/۹۱۴	ضریب همبستگی



(ب)



(الف)

شکل ۶. نمودار میله‌ای الف) بیشترین غلظت گردو خاک به‌دست‌آمده از هریک از الگوریتم‌ها و مدت زمان لازم برای اجرای آنها، ب) جذر میانگین مجذور خطا با مقایسه خروجی هریک از طرحواره‌ها با خروجی مدل WRF-Chem در اولین نمونه توفان گردو خاک.

۳-۲. نمونه دوم

در روز ۹ شهریور سال ۱۳۹۴ در مرز عراق و سوریه گسیل گردوخاک در تصاویر ماهواره دیده شده است که به تدریج در روز بعد بر شدت گردوخاک افزوده شده و به شکل یک چرخند در مناطق شرق و مرکزی عراق مشاهده می‌شود. در روز ۱۱ شهریور گردوخاک وارد مرزهای ایران شده و به خلیج فارس نیز رسیده است؛ به گونه‌ای که در روز ۱۲ شهریور سراسر خلیج فارس را در بر گرفته است.

در شکل ۸ میانگین عمق نوری کانال ۵۵۰ nm مودیس ماهواره Terra در روزهای ۹ تا ۱۲ شهریور سال ۱۳۹۴ نشان داده شده که با الگوریتم Dark Target به دست آمده است (https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni). مقادیر عمق نوری در مناطق مرکز و جنوب شرقی عراق، غرب و جنوب غربی ایران، خلیج فارس و دریای عمان بیشینه است که نمایانگر غلظت زیاد گردوخاک در این مناطق است.

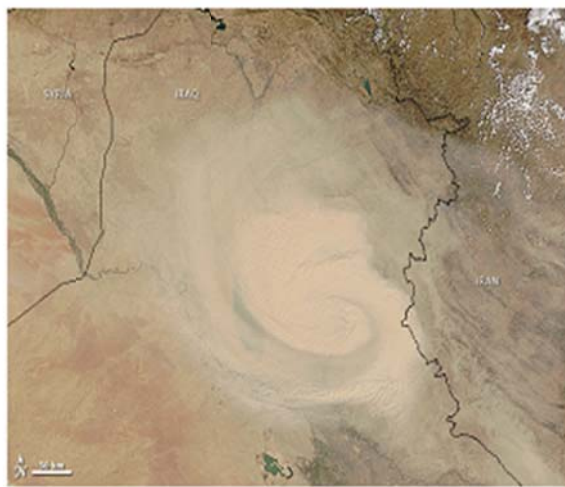
در روز ۹ شهریور ساعت ۱۲ در نقشه فشار سطح دریا یک مرکز کم‌فشار دینامیکی بر روی مناطق شمال و مرکزی

عراق بسته شده که با کم‌فشار گرمایی واقع بر روی مناطق جنوبی ایران ترکیب شده و سبب حرکات صعودی در این منطقه و ایجاد گردوخاک شده است. وزش بادهای غرب و شمال‌غربی ناشی از شاخه برگشت این سامانه سبب ورود گردوخاک به مناطق غربی و جنوب‌غربی ایران و همچنین سواحل غربی خلیج فارس می‌شود (شکل ۹-الف). در نقشه تراز ۵۰۰ hPa ناوهای در نواحی شرقی ترکیه تا جنوب شرقی مدیترانه واقع شده که بخش‌هایی از سوریه و غرب و شمال غربی عراق در بخش شرقی این ناوه قرار گرفته است. پشته ارتفاعی از سمت عربستان به روی ایران گسترده شده است. به علاوه بادهای شمالی در مناطق شرقی ایران می‌تواند سبب ایجاد توفان گردوخاک در شمال سیستان و بلوچستان و جنوب خراسان جنوبی شود.

همچنین خروجی مدل Hysplit در اجرای سی‌ساعته که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، چشمه گسیل گردوخاک را عمدتاً در مناطق مرکز و شمالی عراق نشان می‌دهد و جهت انتقال به سمت مناطق جنوب غربی است. نقطه تعیین شده به عنوان مقصد گردوخاک در ۳۰ درجه شمالی و ۴۹ درجه شرقی قرار دارد.

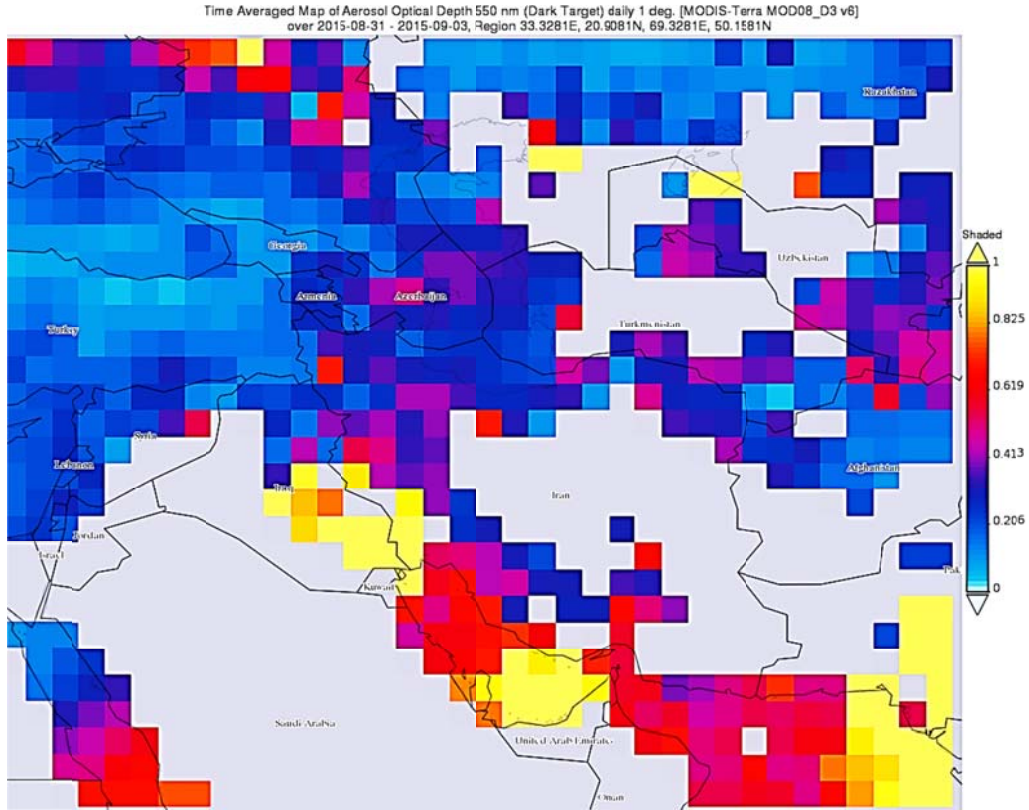


(ب)

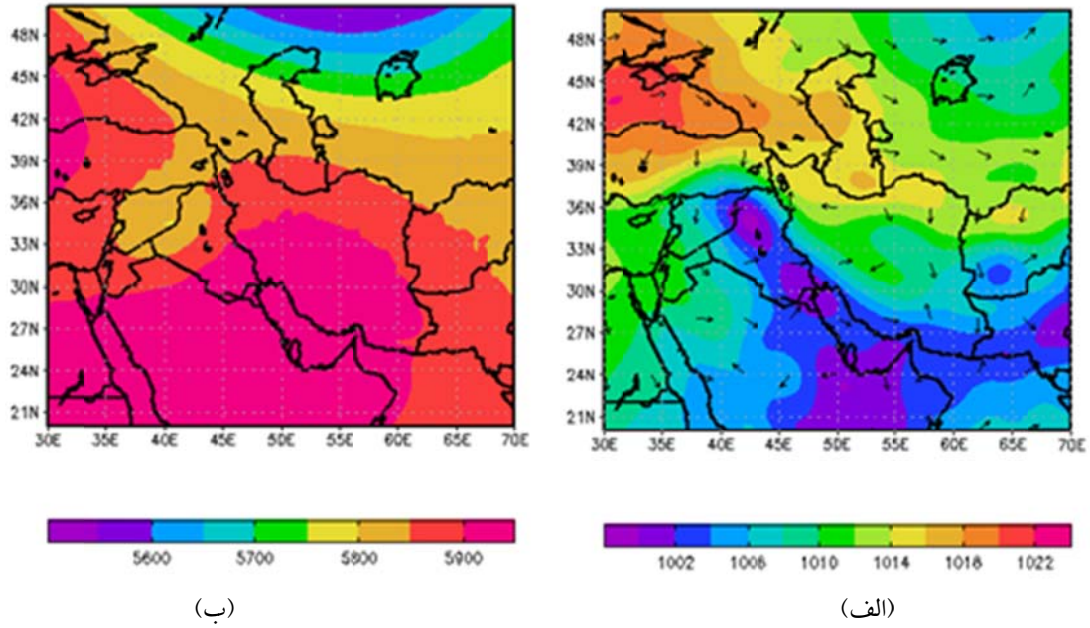


(الف)

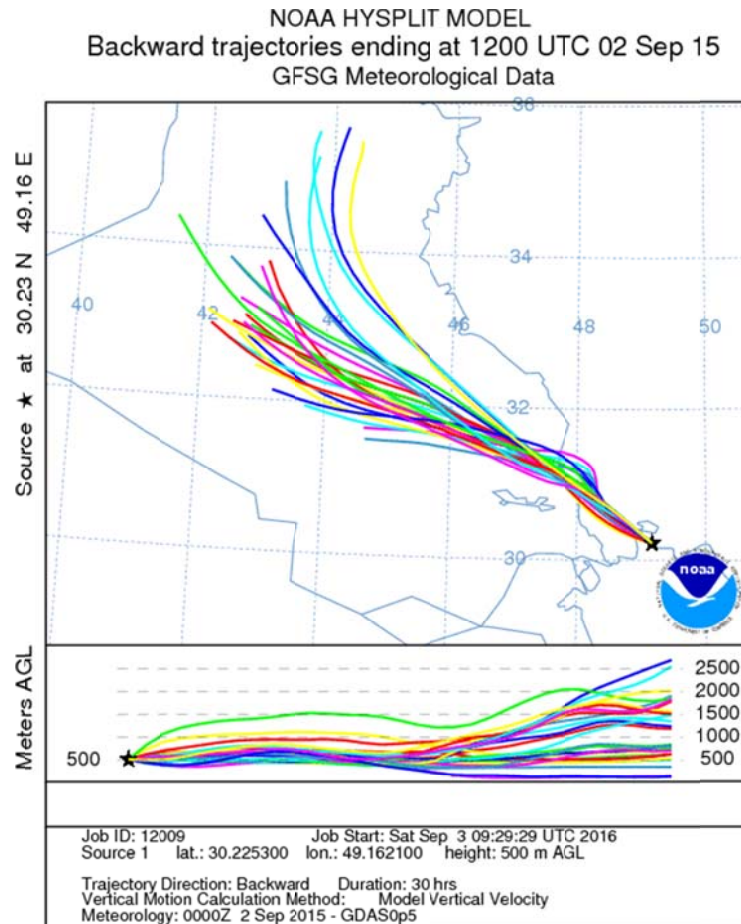
شکل ۷. تصویر سنجنده مودیس ماهواره آکوا در الف) ۱۰ شهریور (ب) ۱۲ شهریور سال ۱۳۹۴.



شکل ۸. میانگین عمق نوری کانال ۵۵۰ nm مودیس ماهواره ترا با الگوریتم Dark Target در روزهای ۹ تا ۱۲ شهریور سال ۱۳۹۴.



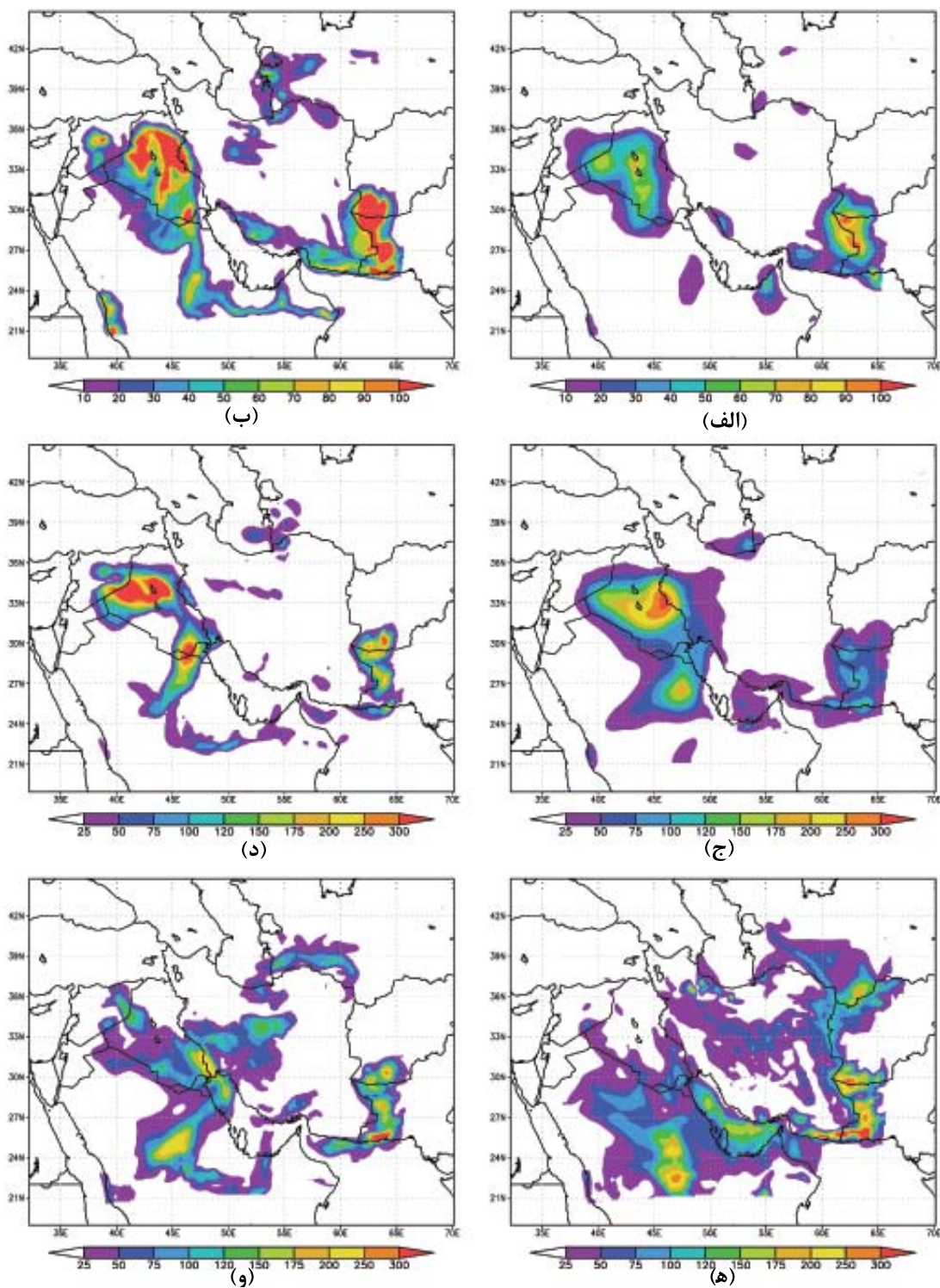
شکل ۹. (الف) نقشه فشار سطح دریا و باد سطحی، (ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۹ شهریور ماه ۱۳۹۴.



شکل ۱۰. خروجی همادی مدل Hysplit با استفاده از داده‌های GDAS با تفکیک ۰/۵ درجه با روش پس‌سو از روز ۱۱ شهریور سال ۱۳۹۱ برای ۳۰ ساعت.

(شکل ۱۱ ج) غلظت گردو خاک به شدت افزایش یافته، به طوری که با گذشت زمان در ساعت ۱۲:۰۰ UTC گسترده‌گی مناطق تحت پوشش گردو خاک نیز افزایش می‌یابد و سراسر عراق، مناطق غرب و جنوب غربی ایران و بخش غربی خلیج فارس را نیز در برمی‌گیرد (شکل ۱۱ د). در روز ۱۱ شهریور ساعت ۰۰:۰۰ UTC توده گردو خاک به سمت شرق جابه‌جا شده و با عبور از مناطق کوهستانی واقع در مسیر، مناطق مرکزی ایران را نیز فرا گرفته است (شکل ۱۱ ه). در روز ۱۲ شهریور ساعت ۰۰:۰۰ UTC جابه‌جایی گردو خاک به سمت شرق به گونه‌ای است که به دو توده گردو خاک واقع در شمال شرقی و جنوب شرقی ایران پیوسته است (شکل ۱۱ و).

خروجی طرحواره UNO مرتبه دوم پس از گذشت ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ۷۲ ساعت از شروع اجرا در ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز ۹ شهریور ۱۳۹۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در روز ۹ شهریور ساعت ۰۶:۰۰ UTC مقادیر بیشینه غلظت گردو خاک در مرکز سوریه، شمال و مرکز عراق، جنوب غربی افغانستان و پاکستان و جنوب شرقی ایران مشاهده می‌شود (شکل ۱۱ الف)، در ساعت ۱۲:۰۰ UTC همان روز (شکل ۱۱ ب) گسترده‌گی مناطق تحت پوشش گردو خاک تغییر چندانی نداشته ولی از مقدار غلظت کاسته شده است که با توجه به افزایش ارتفاع لایه مرزی در این ساعت از روز این روند کاهشی پذیرفتنی است. در ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز ۱۰ شهریور



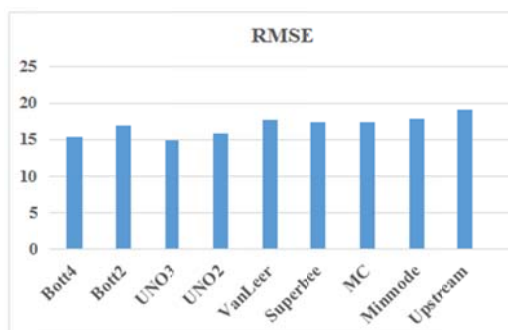
شکل ۱۱. خروجی طرحواره UNO مرتبه دوم در الف) ساعت ۰۶:۰۰ UTC، ب) ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۹ شهریور؛ ج) ساعت ۰۰:۰۰ UTC، د) ساعت ۰۶:۰۰ UTC روز ۱۰ شهریور؛ ه) ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز ۱۱ شهریور؛ و) ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز ۱۲ شهریور ماه سال ۱۳۹۱.

الگوی گردو خاک به دست آمده از همه الگوریتم‌ها شباهت قابل قبولی با یکدیگر دارند؛ البته الگوی به دست آمده توسط طرحواره‌هایی که دارای دقت مرتبه پایین تری هستند، هموارتر است؛ بنابراین به منظور مقایسه الگوریتم‌ها در این نمونه نیز، مقادیر بیشینه غلظت به دست آمده از هر یک از آن‌ها، مدت زمان لازم برای اجرای شبیه‌سازی تا ۷۲ ساعت و برخی کمیت‌های آماری در مقایسه با خروجی مدل WRF-Chem در جدول ۴ ارائه شده است. در این مورد نیز بیشترین میرایی توسط طرحواره پادجریانسو به دست آمده و کمترین آن مربوط

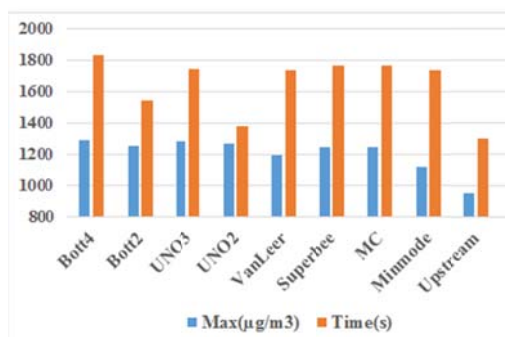
به طرحواره مرتبه چهارم بوت و پس از آن مرتبه سوم UNO است ولی از نظر زمان اجرا این دو طرحواره اختلاف زیادی با طرحواره پادجریانسو دارند. طرحواره UNO مرتبه دوم علاوه بر اینکه در مقایسه با سایر طرحواره‌های مرتبه اول و دوم میرایی کمتری دارد، حجم محاسبات در آن به طور شایان توجهی کمتر است. نتایج مقایسه الگوریتم‌ها در این توفان گردو خاک نیز مشابه مورد اول است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طرحواره UNO مرتبه دوم در شبیه‌سازی این پدیده نیز موفق عمل کرده است.

جدول ۴. کمیت‌های آماری برای مقایسه کمی هر یک از طرحواره‌های مورد استفاده.

Upstream	Minmode	MC	Superbee	VanLeer	UNO2	UNO3	Bott2	Bott4	طرحواره
۹۴۵/۳۸	۱۱۲۳/۴۲	۱۲۴۷/۶۷	۱۲۴۳/۹۷	۱۱۹۵/۵۲	۱۲۶۶/۶۲	۱۲۸۵/۵۷	۱۲۵۱/۲۵	۱۲۹۴/۰۷	بیشینه ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
۱۲۹۵/۵۵	۱۷۳۶/۸۳	۱۷۶۹/۱۶	۱۷۶۴/۸۸	۱۷۴۱/۵۲	۱۳۸۳/۴۳	۱۷۴۳/۶۸	۱۵۴۲/۱۷	۱۸۳۲/۳۹	زمان (s)
۱۹/۱۲۱	۱۷/۸۶۷	۱۷/۵۰۲	۱۷/۴۶۷	۱۷/۷۳۷	۱۵/۸۳۲	۱۵/۰۳۹	۱۶/۹۶۳	۱۵/۴۶۳	جذر میانگین مربعات خطا
۰/۰۲۹۴	۰/۰۲۶۸	۰/۰۲۲۶	۰/۰۶۲۲	۰/۰۲۶۶	۰/۰۲۳۷	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۴	۰/۰۲۳۲	جذر میانگین مربعات خطای بی‌بعد شده
۰/۶۹۷	۰/۸۴۶	۰/۸۸۵	۰/۸۶۳	۰/۸۵۲	۰/۹۲۴	۰/۹۶۵	۰/۸۹۱	۰/۹۴۶	ضریب همبستگی



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. نمودار میله‌ای؛ الف) بیشترین غلظت گردو خاک به دست آمده از هر یک از الگوریتم‌ها و مدت زمان لازم برای اجرای آن‌ها، ب) جذر میانگین مجذور خطا با مقایسه خروجی هر یک از طرحواره‌ها با خروجی مدل WRF-Chem در دومین نمونه توفان گردو خاک.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه دو پدیده توفان گردوخاک که مناطق وسیعی از کشورهای عراق و ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند و فرایند شکل‌گیری متفاوتی دارند، بررسی و شبیه‌سازی شدند. در نمونه اول، گسیل گردوخاک در روز ۲۸ خرداد ۱۳۹۱ از مناطق شرق سوریه آغاز شده است. طبق تصاویر ماهواره، گردوخاک در جهت جنوب شرقی منتقل و وارد کشور عراق شده و از آنجا مناطق غرب و جنوب غربی ایران و خلیج فارس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین در مناطق مرکزی ایران یک توده گردوخاک ضعیف مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد وجود رشته‌کوه‌های زاگرس مانع از پیوستن این دو توده گردوخاک به یکدیگر و انتقال گردوخاک گسیل‌یافته از عراق و سوریه به مناطق مرکزی ایران می‌شود. در بررسی همدیدی، شیو فشار سطحی زیاد در شرق سوریه سبب وزش بادهای شدید و گسیل گردوخاک از این منطقه شده است، همچنین در سطح ۵۰۰ hPa قرار گرفتن مناطق شرقی کشور سوریه در جلوی محور ناوه سبب حرکات صعودی و ورود گردوخاک تا ارتفاعات بالاتر جو و وجود پشته بر روی ایران سبب حرکات نزولی و نهشت گردوخاک در این مناطق می‌شود.

در شبیه‌سازی ۷۲ ساعته این پدیده، در روز ۲۸ خرداد، مناطق شرق سوریه، جنوب شرقی عراق، شمال شرقی عربستان، شمال شرقی ایران در مرز ترکمنستان و جنوب غربی پاکستان تحت تأثیر مقادیر زیاد غلظت گردوخاک قرار دارند. از این زمان به تدریج غلظت گردوخاک در همه مناطق به‌ویژه مرز سوریه و عراق افزایش قابل‌توجهی پیدا می‌کند و بخش‌هایی از جنوب غربی ایران و شمال خلیج فارس را نیز در بر می‌گیرد. همچنین غلظت توده گردوخاک واقع در شمال شرقی ایران افزایش یافته و به سمت مناطق مرکزی کشور گسترش می‌یابد. به نظر می‌رسد در این شبیه‌سازی وجود ارتفاعات زاگرس مانع از اتصال دو توده گردوخاک واقع در مناطق مرکزی و جنوب غربی ایران می‌شود. به‌طور کلی مقایسه الگوی

به‌دست‌آمده از مدل و تصاویر ماهواره‌ای تشابه خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند. همچنین چشمه گسیل گردوخاک جنوب غربی ایران در شرق سوریه و گردوخاک واقع در مناطق مرکزی ایران در شمال شرقی کشور و در کشور ترکمنستان با خروجی مدل Hysplit در توافق است.

نمونه دوم به یک توفان شدید گردوخاک مربوط است که در روز نهم شهریورماه ۱۳۹۴ به دلیل وجود یک سامانه دینامیکی در عراق شکل گرفته است. در این روز گسیل گردوخاک به شکل یک چرخند در مناطق شرق و مرکزی عراق در تصاویر ماهواره مشاهده می‌شود؛ پس از آن گردوخاک وارد مرزهای ایران شده و به خلیج فارس نیز رسیده و سرانجام سراسر خلیج فارس را در بر گرفته است. در بررسی همدیدی این نمونه در نقشه فشار سطح دریا، یک مرکز کم‌فشار دینامیکی بر روی مناطق شمال و مرکزی عراق بسته شده است که سبب حرکات صعودی در این منطقه و گسیل گردوخاک از سطح می‌شود. همچنین وزش بادهای غربی سبب ورود گردوخاک به مناطق غربی ایران می‌شود. در نقشه تراز ۵۰۰ hPa ناوه‌ای بر روی اروپا واقع شده که زبانه‌های آن کشور سوریه و بخش‌هایی از غرب و شمال غربی عراق را در بر گرفته و زبانه‌های یک مرکز پر ارتفاع سراسر ایران و مناطق جنوب و مرکزی عراق را نیز تحت پوشش دارد. خروجی شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در روز نهم شهریور مقادیر بیشینه غلظت گردوخاک در مرکز سوریه، شمال و مرکز عراق، جنوب غربی افغانستان و پاکستان و جنوب شرقی ایران مشاهده می‌شود. با گذشت زمان گستردگی مناطق تحت پوشش گردوخاک نیز افزایش می‌یابد و سراسر عراق، مناطق غرب و جنوب غربی ایران و بخش غربی خلیج فارس را نیز گردوخاک در بر می‌گیرد. سرانجام توده گردوخاک به سمت شرق جابه‌جا شده و با عبور از مناطق کوهستانی واقع در مسیر، مناطق مرکزی ایران را نیز می‌پوشاند و به دو توده گردوخاک واقع در شمال شرقی و جنوب شرقی ایران می‌پیوندد.

به‌طور کلی مقایسه طرحواره‌های پادجریانسو، استفاده از

مرتبه دوم علاوه بر اینکه میرایی کمتری در مقایسه با سایر طرحواره‌های مرتبه اول و دوم دارد، حجم محاسبات در آن به‌طور قابل‌توجهی کمتر است و همبستگی خروجی آن با خروجی مدل WRF_Chem نیز از سایر طرحواره‌ها بهتر است. از آنجا که در این فرایند شبیه‌سازی مدل جوئی و طرحواره گسیل در همه اجزای مشابه هستند، می‌توان نتیجه گرفت که طرحواره مرتبه دوم UNO از سایر روش‌ها در شبیه‌سازی این دو مورد گردو خاک بهتر عمل کرده است.

مراجع

- Black, T. L., 1994, The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Weather and forecasting*, 9(2), 265–278.
- Bott, A., 1989, A positive definite advection scheme obtained by nonlinear renormalization of the advective fluxes. *Monthly Weather Review*, 117(5), 1006–1016.
- Brandt, J., Christensen, J. H. and Frohn, L. M., 2002, Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2(5), 397–417.
- Broxton, P. D., Zeng, X., Sulla-Menashe, D. and Troch, P. A., 2014, A global land cover climatology using MODIS data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 1593–1605.
- Cavazos Guerra, C. D. C., 2011, Modelling the Atmospheric Controls and Climate Impact of Mineral Dust in The Sahara Desert. PhD dissertation, UCL (University College London).
- Chin, M., Ginoux, P., Lucchesi, R., Huebert, B., Weber, R., Anderson, T., Masonis, S., Blomquist, B., Bandy, A. and Thornton, D., 2003, A global aerosol model forecast for the ACE-Asia field experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D23).
- Chou, M. D. and Suarez, M. J., 1994, An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Memo, 104606(3), p. 85.
- Colarco, P., da Silva, A., Chin, M. and Diehl, T., 2009, Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *J. Geophys. Res.*, 115, D14207, doi:10.1029/2009JD012820.
- Draxler, R. R. and Rolph, G. D., 2003, HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Giles, J., 2005, Climate science: the dustiest place on Earth. *Nature*, 434(7035), 816–819.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Torres, O. and Chin, M., 2004, Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation. *Environmental Modelling & Software*, 19(2), 113–128.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O. and Lin, S. J., 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17), 20255–20273.
- Godunov, S. K., 1959, A difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of the equations of hydrodynamics. *Matematicheskii Sbornik*, 89(3), 271–306.
- Guelle, W., Balkanski, Y. J., Schulz, M., Marticorena, B., Bergametti, G., Moulin, C., Arimoto, R. and Perry, K. D., 2000, Modeling the atmospheric distribution of mineral aerosol: Comparison with ground measurements and satellite observations for yearly and synoptic timescales over the North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D2), 1997–2012.
- Janjić, Z. I., 1990, The step-mountain coordinate: Physical package. *Monthly Weather Review*, 118(7), pp.1429-1443.
- محدودکننده‌های شار Van Leer، super bee، mc، minmode، مرتبه‌های دوم و سوم UNO و مرتبه‌های دوم و چهارم بوت نشان می‌دهد که الگوی حاصل از همه آن‌ها در هر دو مورد گردو خاک پس از گذشت ۷۲ ساعت شباهت خوبی با یکدیگر داشته و تفاوت‌ها عمدتاً در مقدار میرایی و حجم محاسبات است. این تفاوت‌ها به‌گونه‌ای است که بیشترین میرایی توسط طرحواره پادجریانسو به‌دست آمده و کمترین آن مربوط به طرحواره بوت مرتبه چهارم و پس از آن UNO مرتبه سوم است، ولی از نظر زمان اجرا این دو طرحواره اختلاف زیادی با طرحواره پادجریانسو دارند. طرحواره UNO

- Janjic, Z. I., 1996, The Mellor–Yamada level 2.5 turbulence closure scheme in the NCEP Eta Model. World Meteorological Organization-Publications-WMO TD., 4–14.
- Janjic, Z. I., 1994, The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927–945.
- Janjic, Z. I. 1994, The step-mountain coordinate: Physical package. *Monthly Weather Review*, 118(7), 1429–1443.
- Jung, E., 2005, Numerical simulation of Asian dust events: The impacts of convective transport and wet deposition. PhD Thesis. The University of New South Wales, Sydney.
- Lauritzen, P. H., Kaas, E. and Machenhauer, B., 2006, A mass-conservative semi-implicit semi-Lagrangian limited-area shallow-water model on the sphere. *Monthly weather review*, 134(4), 1205–1221.
- Leonard, B. P., 1991, The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(1), 17–74.
- Leslie, L. M. and Wightwick, G. R., 1995, A new limited-area numerical weather prediction model for operations and research: Formulation and assessment. *Mon. Weather Rev*, 123, 1759–1775.
- LeVeque, R. J., 1996, High-resolution conservative algorithms for advection in incompressible flow. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 33(2), 627–665.
- Li, J. G., 2008, Upstream nonoscillatory advection schemes. *Monthly Weather Review*, 136(12), 4709–4729.
- Liu, M., Westphal, D. L., Wang, S., Shimizu, A., Sugimoto, N., Zhou, J. and Chen, Y., 2003, A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001: Characterization of Asian aerosols and their radiative impacts on climate. *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), ACE21-1.
- Liu, M. and Westphal, D. L., 2001, A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16), 18099–18112.
- Martcorena, B. and Bergametti, G., 1995, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D8), 16415–16430.
- Mesinger, F., 2000, Numerical methods: The Arakawa approach, horizontal grid, global, and limited-area modeling. *International Geophysics*, 70, 373–419.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663–16682.
- Morcrette, J. J., Boucher, O., Jones, L., Salmond, D., Bechtold, P., Beljaars, A., Benedetti, A., Bonet, A., Kaiser, J. W., Razinger, M. and Schulz, M., 2009, Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-range Weather Forecasts integrated forecast system: Forward modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D6).
- Morcrette, J. J., Beljaars, A., Benedetti, A., Jones, L. and Boucher, O., 2008, Sea-salt and dust aerosols in the ECMWF IFS model. *Geophysical Research Letters*, 35(24).
- Nickovic, S., Kallos, G., Papadopoulos, A. and Kakaliagou, O., 2001, A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16), 18113–18129.
- Noh, Y., Cheon, W. G., Hong, S. Y. and Raasch, S., 2003, Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Boundary-layer meteorology*, 107(2), pp. 401–427.
- Roe, P. L., 1985, Some contributions to the modelling of discontinuous flows. In *Large-scale computations in fluid mechanics*, 163–193.
- Schubert, S. D., Rood, R. B. and Pfafndtner, J., 1993, An assimilated dataset for earth science applications. *Bulletin of the American meteorological Society*, 74(12), 2331–2342.
- Schulz, M., 2007, Constraining model estimates of the aerosol radiative forcing. *Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Paris*.
- Shao, Y., Leys, J. F., McTainsh, G. H. and Tews, K., 2007, Numerical simulation of the October 2002 dust event in Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D8).
- Shao, Y. and Dong, C. H., 2006, A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring. *Global and Planetary Change*, 52(1), 1–22.
- Tegen, I. 2003, Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. *Quaternary Science Reviews*, 22(18), 1821–1834.
- Shao, Y., Raupach, M. R. and Findlater, P. A., 1993, Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D7), 12719–12726.

- Sundram, I., Claiborn, C., Strand, T., Lamb, B., Chandler, D. and Saxton, K., 2004, Numerical modeling of windblown dust in the Pacific Northwest with improved meteorology and dust emission models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D24).
- Uno, I., 2003, Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. *J. Geophys. Res.*, 108, 8668, doi:10.1029/2002JD002845.
- Van Leer, B., 1977, Towards the ultimate conservative difference scheme. IV. A new approach to numerical convection. *Journal of computational physics*, 23(3), 276–299.
- Van Leer, B., 1974, Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second-order scheme. *Journal of computational physics*, 14(4), 361–370.
- Woodward, S., 2011, Mineral dust in HadGEM2, Tech. Note 87, Hadley Cent., Met Office, Exeter, UK.
- Woodward, S., 2001, Modeling the atmospheric life cycle and radiative impact of mineral dust in the Hadley Centre climate model. *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18155–18166.
- Zakey, S., Solmon, F., and Giorgi, F., 2006, Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4687–4704.

A finite-volume numerical model for the simulation of dust transport in the atmosphere

Karami, S.¹, Ranjbar SaadatAbadi, A.², Mohebalhojeh, A. R.^{3*} and Moradi, M.²

1. Ph.D. Student, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

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

(Received: 15 Oct 2016, Accepted: 24 Jan 2017)

Summary

Since dust phenomenon has become one of the major problems in many parts of the world, a large number of models have been developed in order to predict the concentration of dust particles in the atmosphere. The current study is devoted to present a model to simulate transport and deposition of dust particles using several schemes of the finite volume method. The outputs of each of these schemes are compared with each other, both quantitatively and qualitatively in two case studies. The data needed to run the model, including the wind are data derived from the Weather Research and Forecasting (WRF) model output and the GOCART emission scheme is used to calculate the vertical dust flux from surface. Comparing the model outputs with the satellite images available and the HYSPLIT model output show that both the areas covered with dust and the emission of dust are simulated correctly. The dust patterns obtained using the various schemes examined are reasonably similar to each other, considering the fact that the wind field and the emission scheme are similar.

Two cases of the dust storm that affected the extensive regions of Iraq and Iran are studied and simulated in this paper. In the first case, the dust emission starts from the eastern part of Syria on the 18th of June 2012. According to the satellite images, the dust that transported southeastward enters Iraq and subsequently affects the west and southwest regions of Iran, including parts of the Persian Gulf. The second case is related to a strong dust storm which sets up in Iraq, due to a synoptic system active on the 31st of August 2015. Dust emission is seen in the satellite images over Syria–Iraq border on the 31st of August 2015. The dust intensity increased during the next 24 hours, and was observed like a cyclone in the eastern and central parts of Iraq. Afterwards, the dust entered Iran's borders and was extended towards the Persian Gulf, and finally covered all parts of the Persian Gulf.

The performance of the flux limiter, the second- and the third-order UNO, the second- and fourth-order Bott finite volume schemes have been examined in terms of numerical accuracy and computational cost. The numerical accuracy has been determined by comparing the dust concentrations obtained by the model with the corresponding results of the WRF-Chem. The dust concentration patterns obtained by all of the schemes are in overall agreement with each other even after 72 hours of integration, the differences being mainly in the damping caused by the schemes and their computational costs. Whereas the highest damping is observed for the upstream scheme, the fourth-order Bott exhibits the least damping followed by the third-order UNO. The latter two schemes are, however, involved high volumes of computation and may not be cost effective. Considering both numerical accuracy in terms of damping and the computational cost, the second-order UNO scheme offers promising results. With the quantitative comparison carried out, it can be concluded that the second-order UNO scheme shows the most correlation coefficient with the WRF-Chem model output and is the most appropriate scheme, among the schemes examined, for the dust operating model.

Keywords: dust phenomenon, model, simulation, scheme, finite volume, quantitative comparison.

* Corresponding author:

amoheb@ut.ac.ir