

## شبیه‌سازی واداشت‌های تابشی گردوغبار در غرب ایران

بهروز ساری صراف- استاد اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

علی‌اکبر رسولی- استاد اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

آذر زرین- استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمد سعید نجفی<sup>۱</sup> - دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۷ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۹/۲۳

### چکیده

از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات بودجه تابشی جو، هواویزها هستند که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم سامانه اقلیم و چرخه هیدرولوژی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این مطالعه به شبیه‌سازی اثرات تابشی و مستقیم گردوغبار بر سامانه اقلیم در منطقه خاورمیانه و با تأکید بر غرب ایران پرداخته شده است. بدین منظور از مدل WRF-CHEM و طرحواره هواویز GOCART استفاده شده است. مدل تحت دو شرایط فعال و غیر فعال بودن اثرات تابشی هواویز و برای رخدادهای ۱۲ تا ۱۵ آوریل ۲۰۱۱ اجرا شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این طرح‌واره در شبیه‌سازی طوفان‌های گردوغبار در منطقه خاورمیانه دارای عملکرد قابل قبولی است. اثرات تابشی گردوغبار در منطقه خاورمیانه نشان می‌دهد که وجود این ذرات باعث کاهش تابش موج کوتاه به میزان  $(Wm^{-2})$  ۵۰- و افزایش تابش موج بلند به میزان  $(Wm^{-2})$  ۵ و همچنین کاهش تابش خالص  $(Wm^{-2})$  ۴۶- در سطح زمین در متوسط منطقه می‌شود. چنین شرایطی منجر به کاهش دما در بخش زیرین جو، و کاهش شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان در سطح زمین در مناطق تحت تأثیر گردوغبار می‌شود. از دیگر اثرات وجود این ذرات، افزایش فشار سطحی و همچنین کاهش تابش زمینتاب در بخش فوقانی جو است که افزایش دما را در بخش میانی جو نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** گردوغبار، واداشت تابشی، گرمایش و سرمایش، WRF-CHEM.

## ۱. مقدمه

مطالعات زیادی در ارتباط با بررسی اثرات مستقیم<sup>۱</sup> گونه‌های مختلف هواویز (هواویزهای معدنی حاصل از طوفان‌های گردوغبار نواحی بیابانی، احتراق بیوماس، آلودگی‌های بیوژنیک و حاصل از فعالیت‌های انسان) و واداشت‌های تابشی<sup>۲</sup> حاصل از وجود ذرات معلق در جو در مناطق مختلف دنیا انجام شده است (مالت<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹: ۷۱۶۱). به‌طور کلی یک سوم سطح خشکی‌های سیاره زمین را نواحی خشک و نیمه‌خشک در بر گرفته است که این مناطق به عنوان مهم‌ترین منابع گردوغبارهای معدنی شناخته می‌شوند (هوانگ<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۱). سالانه در حدود ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ تریلیون گرم ذرات معلق معدنی از نواحی خشک و نیمه‌خشک کره زمین وارد جو می‌شود (پنر<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۱: ۲۹۲)؛ بنابراین در بین ۴ دسته مذکور، گردوغبارهای معدنی حاصل از طوفان‌های گردوغبار در نواحی خشک و نیمه‌خشک کره زمین، دارای بیشترین واداشت‌های اقلیمی و اثرات مستقیم در بودجه تابشی و توازن انرژی در سطح کره زمین هستند (شی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۵: ۳۳۵؛ لی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۴: ۵۰۲) و به‌طور غیر مستقیم با تغییر در میکروفیزیک ابر، باعث تغییر در بارش و چرخه هیدرولوژی می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۸۶۷). مهم‌ترین منابع انتشار گردوغبار در سطح کره زمین صحرای آفریقا و بیابان‌های آسیای شرقی و جنوب غربی است (تِجن و شپانسکی<sup>۸</sup>، ۲۰۰۹).

به‌طور کلی تعیین بازخوردهای هواویز در جو مسئله پیچیده‌ای است، زیرا این ذرات تابش موج کوتاه و بلند را تحت تأثیر قرا می‌دهند و در بخش‌های زیرین و فوقانی جو دارای اثرات متفاوت و متضاد هستند (مالت و همکاران، ۲۰۰۹: ۷۱۴۴). مطالعات زیادی در ارتباط موضوع گردوغبار در سطح کشور انجام شده است که می‌توان به مطالعات مفیدی و جعفری (۱۳۹۰)، خوش اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) و بابائی و همکاران (۱۳۹۵) اشاره کرد که با رویکرد همدید به بررسی عوامل مقیاس همدید مؤثر در شکل‌گیری گردوغبار در غرب ایران پرداخته‌اند. همچنین باعقیده و احمدی (۱۳۹۳) به بررسی آماری روند گردوغبار در غرب کشور پرداخته و نشان می‌دهند که روند این پدیده در غرب کشور، به‌ویژه در دوره گرم سال افزایشی است. اصغری و زینالی (۱۳۹۳) با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی، ایران را از نظر فراوانی توفان‌های گردوغباری در هر یک از فصول سال به پنج ناحیه متفاوت طبقه‌بندی نمودند و نتایج نشان می‌دهد که منطقه سیستان و بلوچستان از نظر

1 Direct Effect

2 Radiative Forcing

3 Malet

4 Huang

5 Pener

6 Shi

7 Li

8 Tegen and Shepanski

رخداد گردوغبار، یک منطقه بحرانی در کشور محسوب می‌شود. در ارتباط با موضوع مورد مطالعه و اهداف این مطالعه، در منابع داخل کشور تنها می‌توان به مطالعه مشایخی و همکاران (۱۳۸۹) اشاره کرد که با استفاده از مدل جفت شده هواویز HAM با مدل میان مقیاس WRF به شبیه‌سازی هواویزها و واداشت‌های تابشی ناشی از آن در تهران پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طرحواره HAM دارای عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی هواویزهای جو و تخمین عمق نوری است. همچنین گسیل ذرات گردوغبار منجر به ایجاد واداشت تابشی منفی و ایجاد سرمایش، به‌ویژه در مناطق با مقادیر بزرگ شار گسیل هواویز و همچنین واداشت تابشی مثبت و تولید گرمایش در سطح زمین در مناطق دارای هواویزهای کربن سیاه، در قلمرو مورد می‌شود. عزیزاده و همکاران (۲۰۱۵) نشان می‌دهد که در مقیاس جهانی، گردوغبارهای معدنی باعث کاهش انرژی تابشی خالص در سطح می‌شود و از اثرات گردوغبار کاهش دمای سطحی است. در مطالعات دیگری (سولمون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۴) نشان می‌دهند که وجود گردوغبار در جو باعث افزایش دمای بخش میانی و فوقانی جو می‌شود. در این مطالعه به بررسی اثرات مستقیم طوفان‌های گردوغبار در منطقه خاورمیانه و اثرات آن بر تابش و گرمایش سطحی و بخش‌های فوقانی جو و با تأکید بر غرب ایران پرداخته می‌شود.

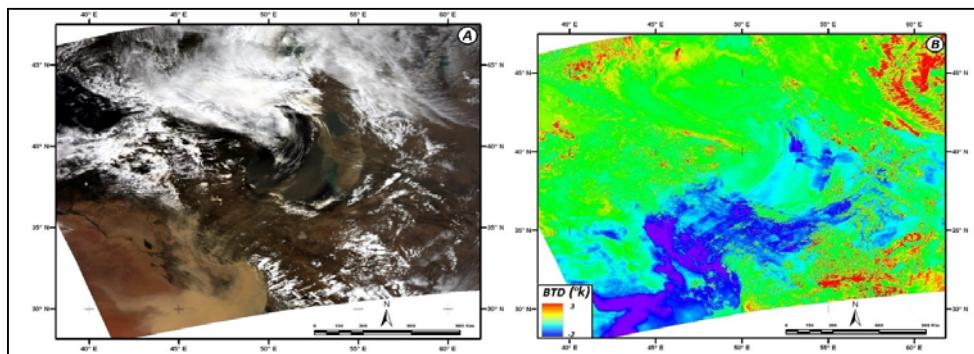
## ۲. منطقه مورد مطالعه

از آنجایی که منشأ گردوغبار در رخداد‌های غرب ایران عمدتاً نواحی بیابانی منطقه خاورمیانه است، لذا منطقه مورد نظر در این مطالعه عبارت است از جنوب غربی آسیا شامل عراق، شمال شرقی عربستان و با تأکید بر اثرات تابشی گردوغبار در غرب ایران است.

## ۳. مواد و روش‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی اثرات مستقیم گردوغبار و واداشت‌های تابشی آن، طوفان گردوغبار ۱۲ تا ۱۵ آوریل ۲۰۱۱ در خاورمیانه و غرب ایران انتخاب (شکل ۱) و از مدل WRF-CHEM استفاده گردید. مدلسازی به مدت ۷۲ ساعت و از ساعت ۰ روز ۱۲ آوریل تا ساعت ۰ روز ۱۵ آوریل انجام شده است. برای ارزیابی و صحت‌سنجی مدل مورد استفاده، از داده‌های اندازه‌گیری شده عمق نوری هواویز توسط سنجنده MODIS و ایستگاه Solar Village مربوط به پروژه AERONET در طول موج ۵۵۰ میکرومتر، استفاده شده است. همچنین داده‌های PM<sub>10</sub> اندازه‌گیری شده توسط سازمان محیط‌زیست در ایستگاه‌های اداره کل، هواشناسی و

میدان دانشگاه در شهر اهواز و همچنین داده‌های دید افقی سازمان هواشناسی کشور در دوره مورد مطالعه، دیگر داده‌های مورد مطالعه در این پژوهش است که برای ارزیابی مدل مورد استفاده، از این داده‌ها استفاده شده است. پیکربندی مدل مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به توضیح است که عملکرد طرحواره‌های مذکور توسط (پراکاش<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۰۹) در شبیه‌سازی طوفان‌های گردوغبار در منطقه خاور میانه ارزیابی گردیده و دارای عملکرد قابل قبولی بوده است.



شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای رخداد گردوغبار در روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۱، تصاویر سنجنده MODIS، (a) تصویر حقیقی (b) تصویر آشکارسازی شده گردوغبار، در این شکل مقادیر منفی گردوغبار موجود در جو است.

جدول ۱ پیکربندی مدل WRF-CHEM در این مطالعه

Model	WRF-Chem (Grell et al., 2005)
Horizontal resolution	30 km
Dimensions (X;Y )	100-102
Vertical levels	30
Boundary conditions	NCEP final analysis-FNL
Time step	Time step 180s
Simulation period	Dust storm case studies in 2004-2013
Physical schemes	Microphysics: Lin et al. Scheme (Lin et al., 1983) Short-wave radiation: Goddard (Wild et al., 2000) Long-wave radiation: RRTM(Wild et al., 2000) PBL: Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) TKE scheme (Janjic, 2001) Surface: unified Noah land-surface model (Chen and Dudhia, 2001) Cumulus convection: new Grell scheme (Grell and Devvenyi, 2002) Boundary layer scheme: YSU (Hong, 2010)
Emission scheme	GOCART simple aerosol scheme (Ginoux et al., 2001)
Direct Effect	Yes/No
Photolysis scheme	Fast-J (Wild et al., 2000)

طرح‌واره‌های متعددی برای برآورد گسیل غبار در مدل طراحی شده است، که در این تحقیق از طرح‌واره-ی GOCART<sup>۱</sup> (گینوکس و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۲۰۰۴) استفاده شده است. در این طرح‌واره برای محاسبه شار قائم گسیل غبار از رابطه (۱) زیر استفاده شده است (گینوکس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۲۰۲۵۷):

رابطه (۱)

$$F = C S s_p u_{10}^2 (u_{10m} - u_{tp}) \text{ for } u_{10m} \geq u_t$$

در رابطه بالا،  $C$  ضریب ثابت تجربی است و برابر  $C = 1 \mu g s^2 m^{-5}$  می‌باشد.  $u_{10}$  سرعت باد افقی در ارتفاع ۱۰ متری،  $u_{tp}$  سرعت آستانه باد است که بیان‌گر آغاز گسیل ذرات غبار می‌باشد و به عواملی مانند اندازه ذرات، چگالی هوا و رطوبت بستگی دارد.  $s_p$  کسر هر دسته اندازه ذرات غبار در گسیل کل می‌باشد، در این طرح‌واره ۴ کلاس برای اندازه ذرات خاک در نظر گرفته شده است و کسر هر کلاس عبارت است از ۰/۷۵، ۰/۱۵، ۲/۵، ۴/۵.  $S$  تابع چشمه که پتانسیل مناطق چشمه غبار را تعریف و شرایط سطح مانند پوشش گیاهی و گستره برف را مشخص می‌کند. به عبارتی  $S$  احتمال داشتن خاک سست تجمع شده در نقطه  $i$  ام در ارتفاع  $z_i$  به صورت زیر محاسبه می‌شود (گینوکس و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۲۰۲۵۷):

رابطه (۲)

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

که  $z_{min}$  و  $z_{max}$  به ترتیب، بیشینه و کمینه ارتفاع در محیط توپوگرافی  $10^3 \times 10^3$  می‌باشند. سرعت آستانه نیز بر اساس روابط زیر محاسبه گردید (گینوکس و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۲۰۲۵۷):

رابطه (۳)

$$u_{tp} = 0.13 \frac{\sqrt{\frac{\rho_p g \phi_p}{\rho_a}} \sqrt{\frac{1+6 \times 10^{-7}}{\rho_p g \phi_p^2}}} {\sqrt{1.7638 (4.6 \times 10^6 (\phi_p^{1.36} + 1))^{0.092} - 1}}$$

که  $\rho_p$  چگالی ذرات (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب)،  $g$  شتاب گرانی (برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)،  $\phi_p$  قطر مؤثر ذره‌ای با اندازه  $P$  (m) و  $\rho_a$  چگالی هوا است. مقادیر  $P_a$  و  $\phi_p$  برای هر چهار کلاس ذرات آورده شده است. معادله (۳)، برای در نظر گرفتن اثر پیوستگی رطوبت خاک توسط (گینوکس و همکاران، ۲۰۰۴) به صورت زیر تغییر کرد:

رابطه (۴)

$$u_{twp} = \begin{cases} u_{tp} \times (1.2 + 0.2 \log_{10} w) & w < 0.5 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases}$$

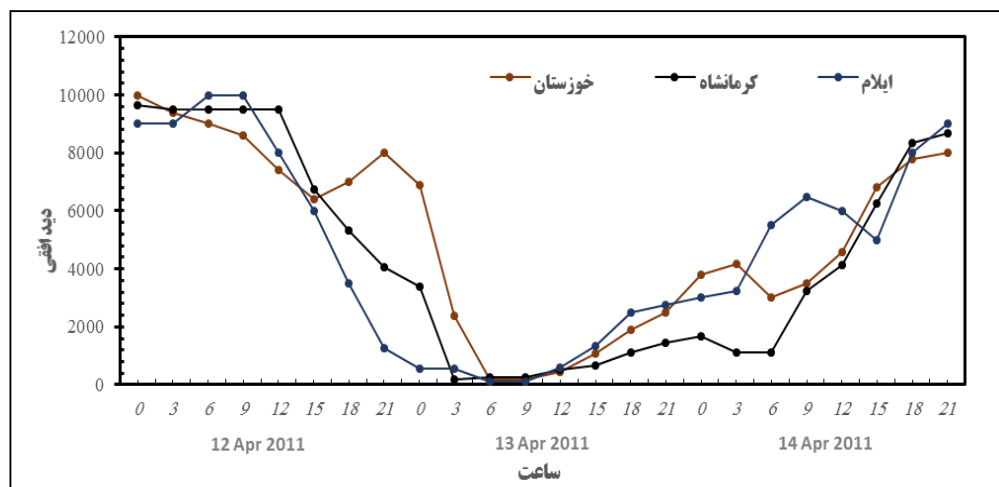
در رابطه بالا،  $w$  رطوبت خاک است.

غلظت گرد و غبار در ابتدای شبیه‌سازی توسط مدل به صورت مقدار بسیار جزئی (تقریباً صفر) در نظر گرفته می‌شود و هیچ‌گونه شارش جانبی گرد و غبار به داخل آشیانه وجود ندارد، به گونه‌ای که مدل فرض می‌کند که تمام گرد و غبارها از داخل آشیانه شبیه‌سازی ایجاد شده‌اند، اما گرد و غبارها می‌توانند زمانی که به مرزها می‌رسند، آزادانه به سمت خارج فرارفت یابند.

#### ۴. بحث و نتایج

ارزیابی مدل

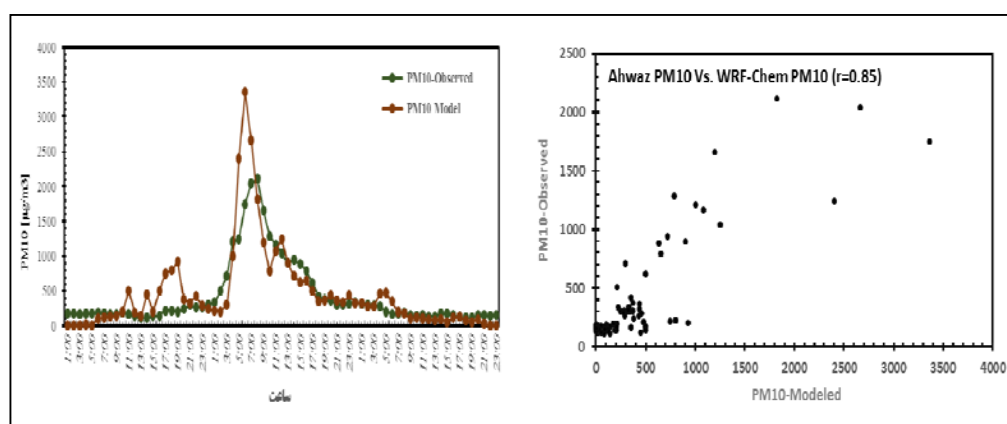
بر اساس شکل ۲، در دوره ۱۲ تا ۱۵ آوریل، بیشترین میزان کاهش دید افقی در غرب ایران روز ۱۳ آوریل و از ساعت ۳ تا ۱۵ اتفاق افتاده است، بطوریکه در هر سه استان کرمانشاه، خوزستان و ایلام، در ساعت ۶ تا ۹ روز ۱۳ آوریل دید افقی به‌طور متوسط به کمتر از ۵۰۰ متر (در برخی ایستگاه‌ها به ۵۰ متر) کاهش یافته است.



شکل ۲ چرخه روزانه دید افقی (متر) در ۱۲ تا ۱۵ آوریل ۲۰۱۱ در غرب ایران (مآخذ: نگارنده)

در ساعات مذکور همانطور که مقادیر  $PM_{10}$  در اهواز نشان می‌دهد، متوسط  $PM_{10}$  مشاهداتی در دوره مورد مطالعه  $368 \mu g/m^3$  بوده است و مقادیر مدل‌سازی  $444$  میکروگرم در متر مکعب بوده است.

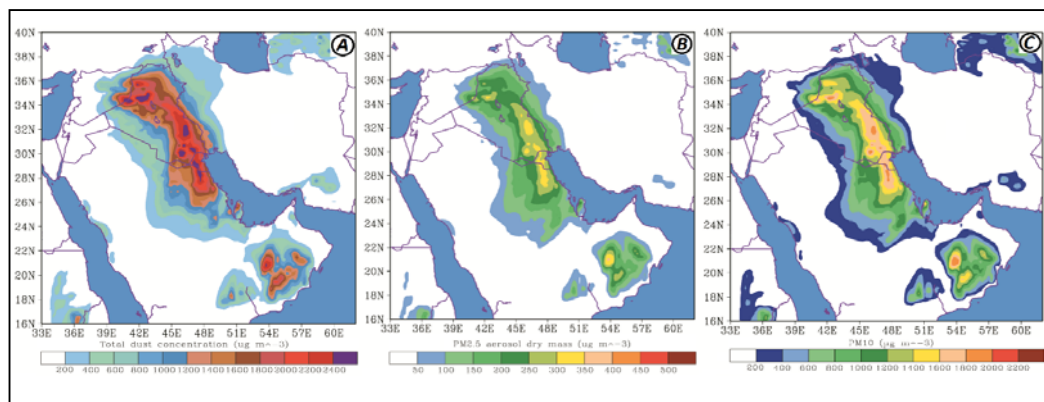
بیشترین و (کمترین) مقدار ذرات معلق در داده‌های تجربی (۱۱۲)  $2100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  و در داده‌های مدل‌سازی (۰)  $3360 \mu\text{g}/\text{m}^3$  است و همانطور که دیده می‌شود اختلاف زیادی بین مقادیر بیشینه و کمینه  $\text{PM}_{10}$  در چرخه شبانه روزی ذرات معلق در دوره مورد مطالعه وجود دارد. بطوریکه میزان انحراف معیار مقادیر مدل‌سازی و شبیه‌سازی نیز ۶۱۱ و ۴۸۳ است که اختلاف زیادی است و نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌های مدل‌سازی بیش از داده‌های شبیه‌سازی شده است (جدول ۲). اما نباید در توانمندی مدل در شبیه‌سازی زمان بیشینه ذرات معلق چشم پوشی کرد که مدل به‌طور صحیح ساعات اوج طوفان گردوغبار را مدل‌سازی کرده است (شکل ۳).



شکل ۳ مقایسه مقادیر  $\text{PM}_{10}$  اندازه‌گیری شده در اهواز و مدل‌سازی شده در دوره مورد مطالعه، واحد به  $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$

مقادیر همبستگی و متوسط مربع خطاها<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که به‌طور کلی مدل در شبیه‌سازی مقادیر ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون دارای عملکرد قابل قبولی بوده است، هرچند در برخی ساعات، مقادیر مدل‌سازی و شبیه‌سازی دارای اختلاف قابل توجه و بیش از  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  است، اما در برخی ساعات دیگر اختلاف بسیار کمی بین داده‌های شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد و ضریب تعیین مدل نیز ۰/۷۳ است که نشان می‌دهد به‌طور کلی مدل عملکرد مناسبی برای شبیه‌سازی ذرات معلق جو داشته است (جدول ۲). شکل ۴، پراکندگی افقی گردوغبار،  $\text{PM}_{2.5}$  و  $\text{PM}_{10}$  در متوسط دوره مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بیشترین میزان گردوغبار،  $\text{PM}_{2.5}$  و  $\text{PM}_{10}$  به ترتیب به میزان ۲۵۰۰، ۳۷۰، ۱۹۰۰ میکروگرم در مترمکعب مربوط به نواحی جنوب شرقی عراق و شمال شرقی عربستان است. متوسط گردوغبار،  $\text{PM}_{2.5}$  و  $\text{PM}_{10}$  در غرب ایران به ترتیب ۸۸۰، ۱۲۵ و ۷۳۰ میکروگرم در مترمکعب است.

1 Root-mean-square error



شکل ۴ شبیه‌سازی (A) گردوغبار، (B)  $PM_{2.5}$  و (C)  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ )

در مدل WRF-CHEM

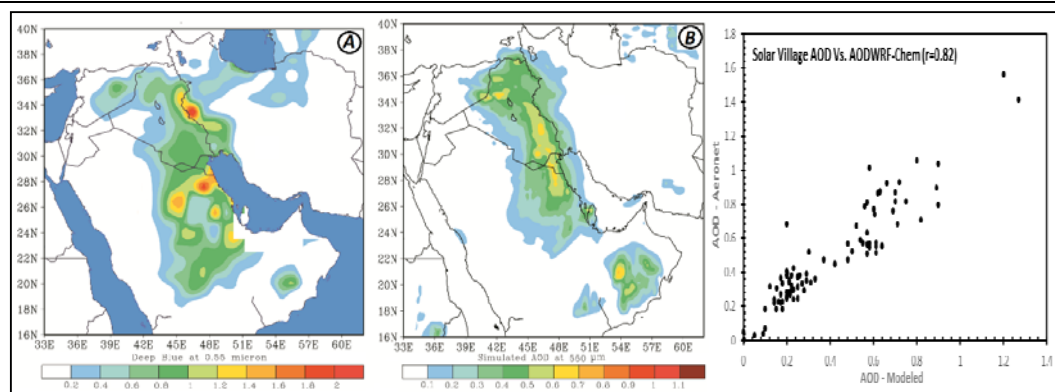
در این بخش برای ارزیابی دقت عمق نوری شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-CHEM از داده‌های شبکه جهانی Aeronet در ایستگاه Solar Village، به عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شده است. مقایسه عمق نوری شبیه‌سازی شده با مشاهداتی نشان می‌دهد که میزان همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده  $0/82$  و میزان ضریب تعیین  $0/67$  است. میزان انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی تاحدودی مشابه هم و متوسط مربعات خطا  $0/093$  است که نشان می‌دهد مدل در برآورد عمق نوری هواویز (AOD) دارای خطای قابل توجهی نیست (جدول ۲). همچنین مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده عمق نوری هواویز توسط سنجنده MODIS و شبیه‌سازی شده در شکل ۵ (a - b) نشان داده شده است. بطورکلی مقایسه این دو تصویر نشان می‌دهد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی گردوغبار در منطقه خاورمیانه مناسب است.

جدول ۲ ارزیابی عملکرد طرح‌واره GOCART در شبیه‌سازی ذرات معلق کوچک‌تر

از ۱۰ میکرون و  $AOD^1$

	Mean	STDV	r	r <sup>2</sup>	RMSE
PM10-Model	۴۸۲	۶۱۱	۰/۸۵	۰/۷۳	۱۹۹
PM10-Observed	۴۳۰	۴۷۱			
AOD-Model	۰/۳۹	۰/۲۶	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۰۹۳
AOD-Observed	۰/۴۹	۰/۲۹			





شکل ۵ عمق نوری هواویز اندازه گیری شده (A) توسط سنجنده مادیس، (B) مدل‌سازی شده توسط مدل WRF-CHEM. پراش‌نگار مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه Solar Village و مدل‌سازی شده.

#### واداشت‌های تابشی گردوغبار

گردوغبار به‌طور مستقیم بودجه تابشی کره زمین را بوسیله جذب، پخش و یا حذف تابش طول موج کوتاه و همچنین پخش و جذب طول موج بلند، و در نتیجه به‌طور مستقیم اقلیم کره زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد (اکرمن و چونگ<sup>۱</sup>، ۱۹۹۲: ۲۲۶) و به‌طور غیر مستقیم نیز با ایجاد تغییرات در میکروفیزیک ابر و بارش، اقلیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با کاهش تابش طول موج کوتاه، شار گرمای نهان در بخش زیرین تروپوسفر دچار تغییر می‌شود و این شرایط باعث کاهش ناهمگونی انرژی در سطح زمین می‌شود که باعث کاهش سرعت باد و همچنین کاهش ایجاد گردوغبار در مناطق منشأ گردوغبار می‌شود (میلر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۵). وابسته به خصوصیات فیزیکی و نوری ذرات معلق، ترکیبات شیمیایی و توزیع قائم ذرات معلق موجود در جو، اثرات مستقیم و غیرمستقیم هواویز متفاوت خواهد بود و ممکن است باعث ایجاد سرمایش و یا گرمایش در بخش‌های زیرین و فوقانی تروپوسفر گردد (بالکانسکی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۷: ۸۴). مطالعات زیادی در ارتباط با تعیین عدم قطعیت اثرات مستقیم و غیر مستقیم گردوغبار در نواحی بیابانی انجام شده است که در این مطالعات دامنه تأثیر این ذرات و میزان اثرپذیری سامانه اقلیم از هواویزها مورد توجه بوده است، اما هنوز هم میزان اثرپذیری اقلیم از هواویزها و گردوغبارهای معدنی دارای ابهاماتی است (استیر<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). در این مطالعه اثرات مستقیم و واداشت‌های تابشی هواویزها بر اساس خروجی‌های مدل WRF-CHEM ارزیابی شده است. عمده تمرکز این مطالعه بر

1 Ackerman and Chung

2 Miller

3 Balkanski

4 Stier

تغییرات مربوط به فراسنج‌های سطحی است. بدین منظور مدل‌سازی تحت دو شرایط فعال بود اثرات مستقیم گردوغبار (Dust) و غیرفعال بودن اثرات مستقیم (Dust\_None) انجام شده است (رابطه ۵) و تغییرات ( $\Delta_i$ )، که (i) متغیر مورد نظر است، شامل تابش طول موج کوتاه (SW) و بلند (LW) در سطح زمین<sup>۱</sup>، تابش خالص (Net RAD)<sup>۲</sup> در سطح زمین، تابش طول موج بلند خروجی از بخش فوقانی جو (OLR)<sup>۳</sup>، دمای سطح زمین، شار گرمای نهان<sup>۴</sup> و محسوس<sup>۵</sup> و در نهایت فشار سطحی، بر اساس رابطه ۵ محاسبه شده است:

$$\Delta_{SW\ Flux} = SW^{Dust\_none} - SW^{Dust}$$

مقادیر منفی حاصل از رابطه بالا در سطح زمین، سرمایه‌های سطحی و مقادیر مثبت گرمایش سطحی را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۶-ا) وجود گردوغبار در منطقه در طول دوره مورد مطالعه باعث کاهش تابش طول موج کوتاه پایین سو در سطح زمین در مناطق تحت تأثیر گردوغبار می‌شود، که حاصل آن سرمایه‌های سطحی خواهد بود. کمترین میزان کاهش طول موج کوتاه بر اثر گردوغبار، مربوط به غرب ایران و بیشترین آن در شمال شرقی شبه جزیره عربستان به میزان  $(Wm^{-2}) -70$  است. متوسط کاهش تابش طول موج کوتاه در غرب ایران  $(Wm^{-2}) -36/8$  و در مناطق تحت تأثیر گردوغبار  $(Wm^{-2}) -50$  است که سرمایه‌های سطحی را در این منطقه در پی خواهد داشت. متوسط کاهش تابش طول موج کوتاه بر اثر وجود گردوغبار در منطقه مدیترانه  $(Wm^{-2}) -21/1$  بوده است (پرز و همکاران، ۲۰۰۶: ۴). همچنین متوسط کاهش تابش طول موج کوتاه در عربستان در یک دوره ۸ ساله به میزان  $(Wm^{-2}) -51$  (ساتش و همکاران، ۲۰۰۶: ۵۷) و در بیابان آفریقا  $(Wm^{-2}) -130$  بوده است (های‌وود<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۴).

تابش طول موج بلند در سطح زمین، یک افزایش را در منطقه نشان می‌دهد (شکل ۶-ب). این افزایش می‌تواند ناشی از محصور شدن تابش موج بلند در بخش زیرین جو در اثر وجود گردوغبار و جلوگیری از خروج و انتقال آن به بخش‌های بالاتر جو باشد، که چنین شرایطی افزایش تابش موج بلند را در سطح زمین منجر شده است. بیشترین میزان افزایش تابش طول موج بلند تحت تأثیر گردوغبار، در نواحی غربی ایران و نواحی مرکزی شبه جزیره عربستان به میزان  $(Wm^{-2}) 12$  دیده می‌شود. در خوزستان متوسط

1 Surface Shortwave and Longwave Flux

2 Net Radiation

3 Outgoing Longwave Radiation

4 Latent Heat Flux

5 Sensible Heat Flux

6 Hywood

افزایش موج بلند ( $Wm^{-2}$ ) ۲ است و در غرب ایران ( $Wm^{-2}$ ) ۳/۷ است. این میزان در عراق ( $Wm^{-2}$ ) ۴/۲ و شرق شبه جزیره عربستان ( $Wm^{-2}$ ) ۸/۹ است. متوسط اثر گردوغبار در تغییرات تابش موج بلند در بیابان آفریقا را ( $Wm^{-2}$ ) ۷ گزارش شده است (ژانگ و کریستوفر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳: ۸). (پراکاش و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۱۵) اثرات گردوغبار بر تابش موج بلند در سطح زمین را بین ( $Wm^{-2}$ ) ۵۰ تا ( $Wm^{-2}$ ) ۸۰ شبیه‌سازی نموده‌اند که این افزایش در اثر جذب و پخش تابش موج بلند توسط هواویز اتفاق می‌افتد.

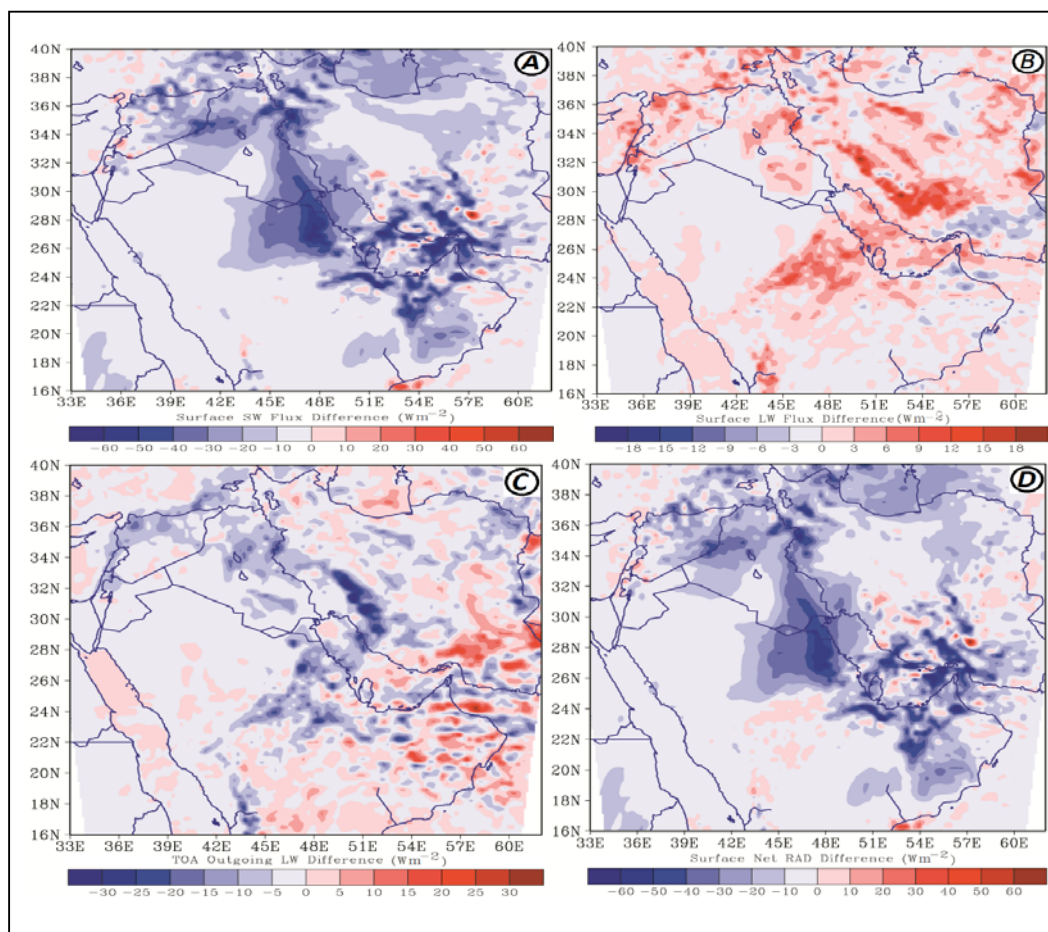
در طول این رخداد، تابش موج بلند خروجی از بخش فوقانی جو (OLR) در مناطق تحت تأثیر گردوغبار کاهش یافته است (شکل ۶-۵). متوسط کاهش OLR در غرب ایران ( $Wm^{-2}$ ) ۱/۷- است که بین ۰/۳- و ( $Wm^{-2}$ ) ۴/۳- متغیر است که اثرات محدود گردوغبار بر این فراسنج را در طول دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. کاهش انرژی خروجی از بخش فوقانی جو تحت تأثیر وجود گردوغبار، منجر به گرمایش بخش فوقانی جو می‌شود. (اسلام و المزروعی، ۲۰۱۲: ۲۲۳۹) نیز کاهش تابش زمین تاب در بخش فوقانی جو در اثر وجود گردوغبار در جنوب غربی آسیا را گزارش داده که میزان متوسط آن در این منطقه ( $Wm^{-2}$ ) ۱۵- است. (یوشیکا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۴۷۷) نیز گردوغبار را به عنوان عاملی برای کاهش تابش زمین تاب معرفی نموده‌اند که این شرایط باعث تغییر در بودجه انرژی تابشی سطح زمین و بخش فوقانی جو، کاهش آلبدو و به‌طور کلی گرمایش در بخش میانی و فوقانی جو می‌شود. (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۴) نیز وجود گردوغبار را عاملی برای گرمایش در بخش میانی و فوقانی جو و اثر سرمایشی در سطح زمین معرفی کرده است.

میزان تغییرات تابش خالص (SW+LW) در سطح زمین نشان می‌دهد که به‌طور کلی وجود گردوغبار باعث کاهش تابش خالص در سطح زمین می‌شود. علی‌رغم مثبت بودن تابش موج بلند در سطح زمین که به‌طور متوسط در منطقه حدود ( $Wm^{-2}$ ) ۱۰ است، اما میزان کاهش تابش موج کوتاه به‌طور متوسط در منطقه حدود ( $Wm^{-2}$ ) ۴۶- است. لذا میزان کاهش تابش موج کوتاه در سطح زمین بیش از افزایش تابش موج بلند است و چنین شرایطی سرمایش سطحی را در پی خواهد داشت (شکل ۶-۵). بیشترین میزان کاهش خالص تابشی مربوط به شمال شبه جزیره عربستان، است و در غرب ایران نیز این فراسنج به‌طور متوسط ۳۰- وات بر مترمربع کاهش داشته است. مشابه چنین نتایجی توسط (یو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۰) گزارش شده است که وجود گردوغبار را عاملی برای کاهش تابش خالص دریافتی و سرمایش سطحی معرفی کرده‌اند.

1 Zhang and Christopher

2 Yoshioka

3 Yue



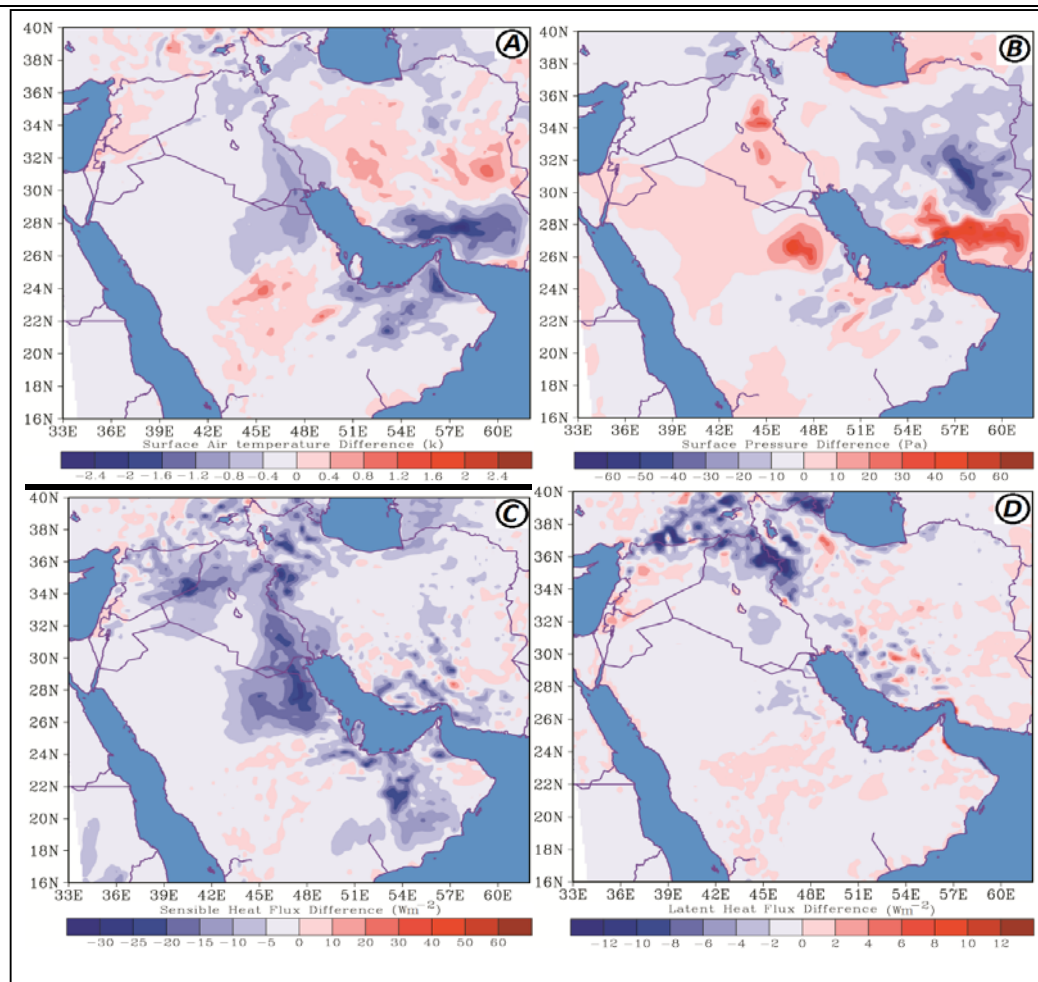
شکل ۶ تغییرات تابش موج کوتاه (a) و بلند (b) در سطح زمین، تابش زمین تاب در بخش فوقانی جو (c) و تابش خالص در سطح زمین (d)

اثرات گرمایشی و سرمایشی گردوغبار در منطقه نشان می‌دهد که وجود گردوغبار باعث کاهش دمای سطحی در دوره مورد مطالعه در منطقه شده است (شکل ۷-۱). به‌طور متوسط در منطقه تحت تأثیر گردوغبار دما ۱- درجه کلون کاهش یافته است و این میزان در غرب ایران به‌طور متوسط ۰/۶- درجه است. بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییرات بودجه تابشی بر اثر وجود گردوغبار به‌طور مستقیم دمای سطحی را تحت تأثیر قرار داده و در غرب ایران باعث سرمایش سطحی می‌شود. (پراکاش و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۱۵) میزان کاهش دمای سطحی در شبه جزیره عربستان را تحت تأثیر هواویز ۶/۷- درجه کلون گزارش کرده‌اند

و (هان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۹) متوسط تغییرات دمای سطحی در نواحی بیابانی شرق آسیا را در اثر واداشت‌های تابشی گردوغبار، ۵- درجه کلون تعیین کرده‌اند. بر اساس یافته‌های (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۶) هواویز دارای اثر گرمایشی در بخش میانی و فوقانی جو و اثر سرمایشی در سطح زمین است و نتایج این بخش در این مطالعه، چنین نتایجی را برای گردوغبار در منطقه خاورمیانه تأیید می‌نماید.

مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده فشار سطحی (شکل ۷-b)، نشان می‌دهد که گردوغبار به‌طور غیر مستقیم بر میدان فشار سطحی اثرگذار است. بطوریکه وجود گردوغبار در منطقه باعث افزایش فشار در مناطق متأثر از گردوغبار شده است. این افزایش در نواحی شمال شرقی شبه جزیره عربستان بیش از ۵۰ پاسکال و در عراق به‌طور متوسط ۲۰ پاسکال است. در غرب ایران، تغییرات قابل توجهی در میدان فشار ایجاد نشده است. مشایخی و همکاران (۱۳۸۹: ۱۰۱) افزایش فشار سطحی در بیابان‌های آفریقا و منطقه خاورمیانه را در اثر وجود هواویز بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ پاسکال گزارش کرده است.

تغییرات در شار گرمای محسوس سطحی (شکل ۷-c)، نشان می‌دهد که وجود گردوغبار باعث می‌شود که به‌طور متوسط در مناطق تحت تأثیر گردوغبار، شار گرمای محسوس ( $Wm^{-2}$ ) ۲۱- کاهش یابد که بیشترین میزان کاهش در شمال غربی شبه جزیره عربستان، بیش از ( $Wm^{-2}$ ) ۳۰- و کمترین میزان کاهش در غرب ایران به میزان ( $Wm^{-2}$ ) ۹- بوده است. به‌طور کلی در طول روز با کاهش شار گرمای محسوس سطحی، انتقال بالاسوی گرما از سطح به بخش‌های زیرین جو کاهش پیدا می‌کند و باعث می‌شود بخش زیرین جو که در تماس با سطح زمین است، دما کاهش پیدا کند. مشابه شار گرمای محسوس، وجود گردوغبار باعث کاهش شار گرمای نهان سطحی می‌شود (شکل ۷-d) که متوسط این کاهش ( $Wm^{-2}$ ) ۲- است. این فراسنج در شمال شرقی عراق نواحی غربی کشور (در محدوده استان کردستان و جنوب آذربایجان غربی) با توجه ابرناکی این منطقه، بیش‌تر از دیگر نواحی است و به‌طور متوسط ( $Wm^{-2}$ ) ۱۱/۶- است. کاهش شار دمای محسوس و نهان سطحی در اثر وجود گردوغبار نواحی بیابانی در جو توسط (یو و همکاران، ۲۰۱۰) و گردوغبارهای آتش‌فشانی توسط شل<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۷) گزارش شده است. لازم به توضیح است که کاهش و افزایش دما در دیگر مناطق در قلمرو مورد مطالعه، بر اثر انتشار گونه‌های دیگر گردوغبار و برخی گازها (که مورد تأکید این مطالعه نمی‌باشد) است و در این مطالعه فقط مناطق تحت تأثیر طوفان‌های گردوغبار و هواویزهای معدنی مورد تأکید پژوهشگران است.



شکل ۷ تغییرات دمای سطحی-کلوین (a)، فشار سطحی-پاسکال (b)، شار گرمای محسوس (c) و شار گرمای نهان ( $Wm^{-2}$ )

##### ۵. نتیجه گیری

در این مطالعه قابلیت طرح‌واره GOCART در شبیه‌سازی گردوغبار و ذرات معلق و همچنین اثرات مستقیم اقلیمی طوفان‌های گردوغبار در منطقه خاورمیانه با تأکید بر غرب ایران بررسی شد. نتایج نشان داد که این طرح‌واره در شبیه‌سازی چرخه شبانه‌روزی و زمان اوج رخداد گردوغبار و ذرات معلق در دوره مورد مطالعه، و همچنین گسترش آن در منطقه عراق، شرق عربستان و غرب ایران دارای عملکرد قابل قبولی است. گرچه در تخمین میزان انتشار  $PM_{10}$  در زمان بیشینه و کمینه  $PM_{10}$  در منطقه، دارای اختلاف زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده است. نتایج مدل از جنبه شبیه‌سازی گسترش افقی عمق‌نوری، تقریباً مشابه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنجنده MODIS است و عملکرد مدل قابل قبول بوده است؛ اما مقادیر مدل‌سازی

شده‌ی چرخه شبانه‌روزی عمق نوری، در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه Solar Village، نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه شبیه‌سازی شده در زمان اوج رخداد گردوغبار، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است.

اثرات تابشی گردوغبار در غرب ایران نشان می‌دهد که وجود گردوغبار در منطقه باعث کاهش تابش موج کوتاه پایین سو و در مقابل، افزایش تابش موج بلند در سطح زمین در مناطق تحت تأثیر گردوغبار می‌شود. تابش خالص که مجموع تابش موج کوتاه و بلند در سطح زمین است، نشان می‌دهد که در زمان رخداد گردوغبار، تابش خالص در سطح زمین کاهش یافته است که باعث سرمایش در سطح زمین در منطقه می‌شود. این شرایط باعث کاهش ۰/۶- درجه‌ای دمای سطحی در غرب ایران و ۱- درجه‌ای در متوسط مناطق تحت تأثیر گردوغبار و همچنین افزایش فشار می‌شود. علاوه بر کاهش دما و افزایش فشار سطحی، وجود گردوغبار در منطقه باعث کاهش شار گرمای محسوس و نهان سطحی می‌شود. همچنین مقادیر تابش موج بلند خروجی از بخش فوقانی جو (OLR) در مناطق تحت تأثیر گردوغبار در منطقه خاورمیانه منفی است و نشان می‌دهد که تابش زمین تاب خروجی از بخش فوقانی کاهش یافته است و این شرایط بر اثر جذب تابش موج بلند در لایه غبار است که باعث افزایش دما در بخش میانی جو می‌شود.

#### کتابنامه

- اصغری سراسکانرود، ص؛ زینالی، ب؛ ۱۳۹۳. تحلیل و پهنه‌بندی فراوانی فصلی توفان‌های گردوغباری ایران به‌منظور کاهش مخاطرات. دانش مخاطرات. شماره ۲. ۲۱۷-۲۳۹.
- بابایی فینی، ا. صفرراد، ط؛ کریمی، م؛ ۱۳۹۵. تحلیل و شناسایی الگوهای همدیدی توفان‌های گردوغبار غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ش ۱۷. صص. ۱۰۵-۱۲۰.
- باعقیده، م؛ احمدی، ح؛ ۱۳۹۳. تحلیل مخاطره گرد و غبار و روند تغییرات آن در غرب و جنوب غرب ایران. فصلنامه امداد و نجات، شماره ۲۲. تابستان ۱۳۹۳. صص ۴۳-۶۰.
- خوش اخلاق، ف؛ نجفی، م. س؛ صمدی، م؛ ۱۳۹۱. واکاوی همدید رخداد گردوغبار بهاره در غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ش ۸۰. ۹۹-۱۲۴.
- مشایخی، ر؛ ایران نژاد، پ؛ علی اکبری بیدختی، ع؛ ۱۳۸۹. شبیه‌سازی هواویزها و واداشت‌های تابشی ناشی از آن‌ها با استفاده از مدل جفت شده هواویز HAM و مدل میان مقیاس پیش بینی وضع هوا WRF. فیزیک زمین و فضا. ۳۶ (۲): ۹۱-۱۰۷.
- مفیدی، ع؛ جعفری، س؛ ۱۳۹۰. بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع توفان‌های گردوغباری تابستانه در جنوب غرب ایران. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. شماره ۵: ۱۷-۴۵.

- Ackerman, S. A., & Chung, H. (1992). Radiative effects of airborne dust on regional energy budgets at the top of the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 223–233.
- Alizadeh-Choobari, O., Sturman, A., & Zawar-Reza, P. (2015). Global distribution of mineral dust and its impact on radiative fluxes as simulated by WRF-Chem. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 127(6), 635–648.
- Balkanski, Y., Schulz, M., Claquin, T., & Guibert, S. (2007). Reevaluation of mineral aerosol radiative forcings suggests a better agreement with satellite and AERONET data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 81–95.
- Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system (Part I: Model description and implementation). *Monthly Weather Review*, 129, 569–585.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., ... & Lin, S. J. (2001). Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research*, 106(D17), 20255–20273.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Torres, O., & Chin, M. (2004). Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation. *Environmental Model Software*, 19(2), 113–128.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., ... & Eder, B. (2005). Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39, 6957–6975.
- Han, Z., Li, J., Guo, W., Xiong, Z., & Zhang, W. (2013). A study of dust radiative feedback on dust cycle and meteorology over East Asia by a coupled regional climate-chemistry-aerosol model. *Atmospheric Environment*, 68, 54–63.
- Haywood, J., Francis, P., Osborne, S., Glew, M., Loeb, N., ... & Hirst, E. (2003). Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D 18), doi:10.1029/2002JD002687.
- Hong, S. Y. (2010). A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(651), 1481–1496.
- Huang, J. P., Minnis, P., Yan, H., Yi, Y., Chen, B., ... & Ayers, J. K. (2010). Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6863–6872.
- Huang, J., Wang, T., Wang, W., Li, Z., & Yan, H. (2014). Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions, semiarid regions. *Journal of Geophysical Research*, 119 (19), 11398–11416.
- Janjic, Z. I. (2001) Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso Model. *NCEP Office Note*, 437: 61 p.
- Li, Z. (2004). Observation, theory and modeling of atmospheric variability. AEROSOLS AND CLIMATE: A PERSPECTIVE OVER EAST ASIA, *World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate*, 3, 501–525.



- Lin, Y. L., Farley, R.D., & Orville H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22, 1065–1092.
- Mallet, M., Tulet, P., Serc, D., Solmon, F., Dubovik, O., ... & Thoueron, O. (2009). Impact of dust aerosols on the radiative budget, surface heat fluxes, heating rate profiles and convective activity over West Africa during March 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 7143–7160.
- Miller, R. L., Perlwitz, J., & Tegen, I. (2004). Feedback upon dust emission by dust radiative forcing through the planetary boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 109 (D24), DOI: 10.1029/2004JD004912.
- Nazrul Islam, M., & Almazroui, M. (2012). Direct effects and feedback of desert dust on the climate of the Arabian Peninsula during the wet season: A regional climate model study. *Climate Dynamics*, 39, 2239–2250.
- Penner, J. E. (2001). Aerosols: Their direct and indirect effects in climate change 2001. The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to IPCC, IPCC, pp. 291–336, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York.
- Perez, C., Nickovic, S., Pejanovic, G., Baldasano, J. M., & Ozsoy, E. (2006). Interactive dust-radiation modeling: A step to improve weather forecasts. *Journal of Geophysical Research*, 111, 16206, doi: 10.1029/2005JD006717.
- Prakash, P. J., Stenchikov, G., Kalenderski, S., Osipov, S., & Bangalath, H. (2015). The impact of dust storms on the Arabian peninsula and the Red Sea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 199–222.
- Satheesh, S. K., Krishna, M. K., Kaufman, Y. J., & Takemura, T. (2006). Aerosol optical depth, physical properties and radiative forcing over the Arabian Sea. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 91, 45–62.
- Shell, K. M., & Somerville, R. C. J. (2007). Direct radiative effect of mineral dust and volcanic aerosols in a simple aerosol climate mode. *Journal of Geophysical Research*, 112, D03206, doi:10.1029/2006JD007197.
- Shi, G., Wang, H., Wang, B., Li, W., Gong, S., & Zhao, T. (2005). Sensitivity experiments on the effects of optical properties of dust aerosols on their radiative forcing under clear sky condition. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83, 333–346.
- Solmon, F., Mallet, M., Elguindi, N., Giorgi, F., Zakey, A., & Konare, A. (2008). Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties. *Geophysical Research Letters*, 35(L24), doi:10.1029/2008GL035900.
- Stier, P., Seinfeld, J. H., Kinne, S., & Boucher, O. (2007). Aerosol absorption and radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5237–5261.
- Tegen, I., & Schepanski, K. (2009). The global distribution of mineral dust. *Earth and Environmental Science*, 7(1), 1–6.
- Wild, O., Zhu, X., & Prather, M. J. (2009). Fast-J: Accurate simulation of in- and below cloud photolysis in tropospheric chemical models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 37, 245–282.

- Yoshioka, M., Mahowald, N. M., Conley, A. J., Collins, W. D., Fillmore, D. W., ... & Coleman, D. B. (2007). Impact of desert dust radiative forcing on Sahel precipitation: Relative importance of dust compared to sea surface temperature variations, vegetation changes, and greenhouse gas warming. *Journal of Climate*, 20, 1445–1467.
- Yue, X., Wang, H., Liao, H., & Fan, K. (2010). Simulation of dust aerosol radiative feedback using the GMOD: 2. Dust-climate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 115, (D04), doi:10.1029/2009JD012063.
- Zhang J., & Christopher, S. A. (2003). Longwave radiative forcing of Saharan dust aerosols estimated from MODIS, MISR, and CERES observations on Terra. *Geophysical Research Letters*, 30 (23), doi:10.1029/2003GL018479.