نشریه پژوهشهای اقلیم شناسی سال یازدهم | شماره چهل و سوم | پاییز ۱۳۹۹ وصول: ۹۹/۰۶/۱۲ پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۵ صص ۹۸–۸۷

مطالعه و ارزیابی طرحواره های گسیل گرد و خاک در مدل WRF-Chem توفان شرق و جنوب شرق کشور (مطالعه موردی ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸)

محمد اصغری'، امیرحسین مشکوتی*^{*}، عباس رنجبر سعادت آبادی^۴، محمد مرادی^۵ ۱ و ۲– دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه علوم زمین ۳ و ۴– پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوّ، گروه آلودگی هوا و شیمی جوّ

چکیدہ

در شرق و جنوب شرق ایران وقوع پدیده گردوخاک هرساله موجب بروز خسارات شدید مالی، جانی و زیست محیطی فراوانی می شود که پیش بینی دقیق آن به منظور ارائه هشدارهای لازم می تواند خسارات وارده را تا حد امکان کاهش دهد. گزارش کد هوای حاضر ۲۰، ۳۰، ۳۱ و ۲۳ در ایستگاههای همدیدی جنوب شرق ایران از جمله زابل، زاهدان، نهبندان و ایرانشهر بیانگر وقوع توفان است و دید افقی منطقه در مدت زمان وقوع توفان به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسید. در این پژوهش با استفاده از دادههای بازتحلیل (ERA5)، برای توفان گردوخاک (۱۱تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸) تحلیل همدیدی و با استفاده از مدل WRF-Chem، و طرحوارههای مختلف گسیل، شبیه سازی انجام شده است. تحلیل الگوی جوی نشان می دهد، در مدت زمان وقوع توفان (حاکمیت بادهای ۲۱ روزه)، با استقرار پرفشار حوالی دریای خزر و ترکمنستان و از موی دیگر تقویت کم فشار می دهد، در مدت زمان وقوع توفان (حاکمیت بادهای ۱۰۲ روزه)، با استقرار پرفشار حوالی دریای خزر و ترکمنستان و از موی دیگر تقویت کم فشار می دهد، در مدت زمان وقوع توفان (حاکمیت بادهای ۱۲۰ روزه)، خا استقرار پرفشار حوالی دریای خزر و ترکمنستان و از موی دیگر تقویت کم فشار می دهد، در مدت زمان وقوع توفان (حاکمیت بادهای ۱۴ روزه)، خا استقرار پرفشار حوالی دریای خزر و ترکمنستان و از مرای و فشاری منظر به وزش بادهای شدید می شوند. شبیه سازی توفان نشان داد اجرای مدل، آغاز گردوخاک از جنوب شرق و گسیل آن به مناطق شرق را به خوبی مشخص کرد. نتایج نشان می دهند طرحوارههای گسیل داد اجرای مدل، آغاز گردوخاک از جنوب شرق و گسیل آن به سازگاری بیشتری با مشاهدات (تصاویر GDB) دارند؛ اما طرحوارههای گسیل AFWA و GOCART و در شبیه سازی گرد و خاک، سازگاری بیشتری با مشاهدات (تصاویر GBR) دارند؛ اما طرحوارههای گسیل AFWA، خطای قابل مار حظامی دارند. طرحواره AFWA، غلظت را سرت اما مقادیر پیشرینی شده توسط مدل عموما کمتر از مقادیر دیدبانی می باید. طرحواره GOCART، از نظر کمیت، به مشاهدات نزدیک

كليد واژهها: توفان گرد و خاك، مدل WRF-Chem، طرحواره گسيل ، جنوب شرق ايران، زابل.

مقدمه

ذرات گردوخاک معدنی موجود در هوا نقش اساسی در سیستم آب و هوایی کره زمین دارند و بر فعالیتهای انسان در سراسر جهان تأثير مي گذارد. وقوع توفانهاي شديد گرد و خاک در شرق و جنوبشرق بهویژه در سالهای اخیر که با شدت و بسامد بیشتر اتفاق میافتد، خسارات زیادی را وارد میکند. اگر چه منشأ و سرچشمه تولید گرد و خاک معمولاً مناطق خشک، نیمهخشک و مناطق فاقد پوشش گیاهی مناسب و همچنین مناطق آبرفتی دارای رسوبات ریزدانه است (یروسیرو و همکاران،۲۰۰۲)؛ گرد و خاک معلق در جو، میتواند توسط گردش کلی جو به مناطق بسیار دورتر از منبع تولید خود منتقل شود (تیگن و فانگ، 1994؛ جينوكس و همكاران، 2001). ذرات خاك هنگامي به تحرك درمیآیند که نیروهای بالابری، کششی و نیروهای مؤثر بر نیروهای چسبندگی بین ذرات و گرانشی که آنها را در بستر خاک نگه می دارند غلبه کند (بگنولد، ۱۹۴۱؛ کوک و همکاران، ۲۰۱۲). بهطور کلی برای یدیده گردوخاک سه فاز گسیل'، انتقال یا ترابُرد' و نهشت' در نظر گرفته می شود که در هر یک از این بخشها دادههای مختلفی مورد نیاز است، بنابراین برای پیش بینی پدیده گردوخاک عمدتا چندین مدل با یکدیگر جفت می شوند (شائو و همکاران، ۲۰۰۶). سه فرآیندی که موجب گسیل و ورود ذرات گردوخاک جوی میشوند: (۱) درون آمیختگی آیرودینامیکی، (۲) بمباران جهشی و ۳) وایاشی کلوخهای (شائو، ۲۰۰۸).

اولین مطالعه و استفاده از یک مدل عددی انتقال گرد و خاک چند بعدی با فیزیک کامل و در نظر گرفتن اندازه ذرات، مدل وستفال و همکاران (۱۹۸۷، ۱۹۸۸) است که شبیهسازی کاربردی توفانهای خاک را ارائه دادند. از افرادی که برای گرد و خاک مدلسازی تحقیقاتی و عملیاتی انجام دادهاند، میتوان به زاکی و همکاران (۲۰۰۶) و کلارکو و همکاران (۲۰۰۹)، اشاره کرد. در بخش گسیل، برای محاسبه شار سطحی گردوخاک، دادههای اقلیمی ازجمله جنس خاک و پوشش گیاهی مورد نیاز است. در بیشتر مدلها مانند

2. Transport

COAMPS (ليو و همكاران، ۲۰۰۳؛ ليو و وستفال، ۲۰۰۱) و DREAM (نیکوویچ و همکاران، ۲۰۰۱)از دادههای سازمان زمینشناسی کشور آمریکا (USGS) استفاده میکنند. جزئیات برخی از طرحوارههای گسیل را که در مدلهای مختلف بهکار میروند میتوان در مراجع شائو و همکاران (۱۹۹۳)، مارتیکورنا و برگامتی (۱۹۹۵)، گوئل و همکاران (۲۰۰۰)، شولز (۲۰۰۷)، مورکرت و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۰۹)، وودفورد (۲۰۰۱ و ۲۰۱۱) یافت. علاوه بر آن دادههای هواشناسی همچون سرعت باد یا سرعت اصطکاکی، رطوبت خاک و میزان بارش نیز مورد نیاز است که به این منظور از خروجی یک مدل پیش بینی هوا در مقیاس جهانی یا منطقهای استفاده می شود، به عنوان مثال CEMSYS5 (شائو و همکاران، ۲۰۰۷) از مدل منطقهایHIRES (لسلی و وايتويك، ۱۹۹۵)، DREAM از مدل منطقهای NCEP-Eta (بلک، ۱۹۹۴؛ مسینگر، ۲۰۰۰) و GOCART (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱) از مدل جهانی ناسا GEOS-DAS (شوبرت و همکاران، ۱۹۹۳) برای مدل جوی استفاده مي كنند كه مي تواند به صورت برخط ٌ يا برون خط ٌ باشد.

در مطالعات داخلی، پژوهش حمیدیان و همکاران (۱۳۹۵) نقش برجسته کمفشار سیستان و پرفشارهای کوههای خراسان را به عنوان سامانههای محلی در تشکیل و تکوین ویژگیهای محلی باد سیستان آشکار کرد. بررسی ساختار باد شرق ایران بر اساس خروجیهای مدل بیانگر آن است که باد سیستان دارای دو هسته بیشینه در حوالی خواف (دشت آتیشان) و حوالی دریاچه هامون (شهر زابل) است که هسته دوم از شدت بیشتری برخوردار است. یافتههای آنها نشان داد که باد سیستان در ارتفاع تقریبی ۵۰۰ متر از سطح زمین به بیشینه سرعت خود رسیده و سرعتی بالغ بر ۱۷ متر بر بیشینه شدت باد در ساعات شب در مجاورت سطح زمین بیشینه شدت باد در ساعات شب در مجاورت سطح زمین موجنین چینش قائم بسیار شدید باد، حکایت از حضور یک جریان جتی تراز زیرین شبانه در قلمرو اصلی وزش باد

^{1.} Emission

^{3.} Deposition

^{5.} Online

^{4.} Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport

^{6.} Offline

علیجانی و رئیس پور (۱۳۹۰)، به تفکیک دوره سرد و گرم سال، شرایط همدیدی وقوع گردوخاک در منطقه سیستان را بررسی کردهاند. پژوهش آنها نشان داد هنگام شروع توفان در دوره گرم، مراکز کمفشار بر روی هندوستان و پاکستان تشکیل گردید و یک مرکز کمفشار فرعی تر نیز در منطقه سیستان مستقر شده است. در همین زمان مرکز پرفشار بر روی دریای خزر تا شمال غرب افغانستان استقرار می یابد. بدین ترتیب گرادیان فشار بین نواحی شمالی و جنوب شرقی ایران افزایش یافته که منجر به رخداد توفان گردوخاک در منطقه سیستان می شود. در فصل سرد سال با استقرار پرفشار سیبری، منطقه سیستان نسبت به پرفشار مذکور از شرایط کمفشارتری برخوردار است و بنابراین اختلاف فشار بین

مناطق یاد شده منجر به رخداد توفان گردوخاک می شود. مطالعات علیزاده و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که در زمان استقرار سامانه پرفشار بر فراز کوههای هندوکوش شمال افغانستان و ترکیب آن با کمفشار حراراتی تابستانه بر فراز صحراهای شرق ایران و غرب افغانستان شدت گرفته و گرادیان فشاری شدیدی تولید میکنند، به این ترتیب شدت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان از نیمه ماه می (اواخر اردیبهشت) تا نيمه سپتامبر (اواخر شهريور) به اوج ميرسند. تحليل همدیدی آن را میتوان اینگونه بیان کرد، که جت سطح پایین شمالسو (LLJ) در امتداد مرز افغانستان دارای بیشینه ارتفاع بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر بوده که قویترین حالتش در ژوئن در میانگین ماهانه شب هنگام به میزان ۲۰ متر بر ثانیه بوده و گسترش آن در سراسر مرز ایران و افغانستان میباشد که وجود آن برای گسیل گرد و خاک در این منطقه ضروری است. بادهای شدید سطح زمین به همراه این جت سطح پایین منجر به گسیل گرد و خاک از دشت سیستان و انتقال بلندبرد آن مي شود.

رضازاده و همکاران(۱۳۹۱)، شبیهسازی گسیل گرد و خاک با مدل WRF-Chem را با استفاده از دادههای سطحی جدید در منطقه خاورمیانه انجام دادند و این افزایش تفکیک دادههای سطحی، نتایج شبیهسازی را به میزان قابل توجهی بهبود داد. همچنین خسروسرشکی و همکاران (۱۳۹۲) دو طرحواره گسیل گرد و خاک مارتیکورونا- برگامتی- آلفارو و شائو ۲۰۱۲ را با یکدیگر مقایسه کردهاند. کرمی و همکاران

در جنوبغرب کشور را بررسی و شبیهسازی کردهاند. حمیدی و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقات خود نشان دادند که توفان های گرد و خاک مقیاس همدیدی در خاورمیانه در دو دسته اصلی قرار می گیرند: شمال (پدیدههای گرد و خاک شمال تابستانی)، توفانهای گرد و خاک جبههای. توفان گرد و خاک شمال نوع اصلی گرد و خاک در این منطقه هستند که بیشترین فراوانی آنها در ماههای جون و جولای رخ میدهد.

دادهها و روش تحقیق

در این مطالعه، توفان گرد و خاک ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸ در شرق کشور با استفاده از طرحواره های مختلف گسیل (SHAO3 و SHAO2 SHAO1 GOCART (AFWA) مدل WRF-Chem، شبیه سازی شده است. به این منظور، از آخرين ويرايش مدل جفت شده پيش بيني عددي وضع هوا-شیمی WRF-Chem استفاده شده است. برای شرایط اولیه و مرزی مدل از دادههای تحلیل GFS با تفکیک افقی نیم درجه استفاده شد. این مدل قابلیت مدلسازی شیمی هوا (مربوط به هواشناسی فیزیکی و آلودگی هوا) را داراست، بنابراین از این مدل می توان برای شبیه سازی و پیش بینی غلظت ذرات معلق موجود در جو ناشی از مکانیسمهای طبیعی، فعالیتهای بشری (آلایندهها) و گرد و خاک در اندازههای مختلف، نحوه انتشار و نهشت آنها استفاده کرد (گرل و همکاران ۲۰۰۵ و ۲۰۱۱). مدل بر روی سه دامنه با تفکیکهای افقی ۵، ۱۵ و ۴۵ کیلومتر اجرا شده است. پیکربندی اجرای مدل WRF_Chem مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. برای تحلیل غلظت گرد و خاک پیش بینی مدل نقشههای خروجی مدل برای دامنه سوم رسم شدهاند. در نهایت صحت خروجیهای مدل برای گسیل گردوخاک، توسط تصاویر ماهوارهای RGB بطوركيفي بررسي شد. همچنين خروجي غلظت PM10 مدل WRF-Chemبا دادههای سنجش PM10 مرکز هواشناسی زابل مقایسه و ارزیابی شد. مناطق و ایستگاههایی که بیشینه غلظت PM10 را نشان دادند در جدول ۲ ارائه شده است.

RRTM (Mlawer, 1997)	تابش طولموج بلند	
Goddard Shortwave (Chou, 1994)	تابش طولموج كوتاه	
WRF Single-Moment 5-class	فيزيك خرد مقياس	
Monin-Obukov	فيزيک لايه سطحي	
Noh Land Surface Model (Noh et al., 2003)	سطح زمين	
YSU (Hong et al., 2006)	فیزیک لایه مرزی سیارهای	
Grell 3D	همرفت كومهاي	
RADM2	شیمی گازها	
MADE/SORGAM	طرحواره هواويزها	
AFWA,GOCART,SHAO1,SHAO2,SHAO3	طرحواره گسيل	

جدول ۱- پیکربندی اجرای مدل WRF-Chem

جدول ۲- ایستگاهها و مناطق جنوب شرق کشور با بیشینه غلظت ذرات PM10

ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافيايي	عرض جغرافيايي	ايستگاه
474/2	۶۱-۵۴	31/19	زابل
۱۳۷۰	۶۰/٩۰	79/FV	زاهدان
499	۵۷/۷۱	४४/१९	كهنوج
۵۱۰	۶۰/۲	78/73	نيکشهر
494	۶۰/۴۱	78/17	قصرقند
۵/۲	۵V/VV	70/84	جاسک
۲٩/۶	۵V/ • ۹	۲۷/۱۱	ميناب

دو بخشی انجام می شود، که در آن جهش ذرات بزرگ توسط چینش باد آغاز شده و با بمباران جهشی منجر به گسیل ذرات ریز می شود. طرحواره AFWA بر حسب سرعت اصطکاک *u، بدست آمده، و شامل سرعت اصطکاک آستانه ایستایی مورد نیاز برای درون آمیزی ذرات (t*u)، شار جهش افقی، شار قائم گردوخاک توده ای حاصله، توزیع اندازه ذرات گردوخاک گسیل شده و شار گردوخاک گسیل شده می باشد (لی گرند و همکاران، ۲۰۱۹). شار جهش ^۱ ذرات گردوخاک به صورت زیر محاسبه می شود (کاو امورا، ۱۹۵۱): (۲)

 $\begin{aligned} H(D_{s,p}) &= \\ & \left\{ C_{mb} \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 + \frac{u_{*t,s,p}}{u_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*t,s,p}}{u_*^2} \right) \text{ , } u_* > u_{*,t,s,p} \\ & 0 \qquad \text{ , } u_* \leq u_{*,t,s,p} \end{aligned} \right. \end{aligned}$

1. Saltation

طرحوارەھاي گسيل

طرحواره گسیل GOCART چشمههای بالقوه گردوخاک را بر پایه کسر فرسایشپذیر در نظر میگیرد (کاوزوس گوئروا، ۲۰۱۱). شار قائم گردوخاک از سطح بهصورت زیر محاسبه میشود (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۴). $F = cSs_p u_{10}^2 (u_{10} - u_{tp}), \quad u_{10} > u_{tp}$ (۱) که C ثابتی تجربی است و برابر $\frac{\mu gs^2}{m^5}$ در نظر گرفته شده، ۵۱ سرعت باد تراز ۱۰ متر، u_{tp} سرعت آستانه برای فرسایش بادی ذره به اندازه P است. Sp کسر هر دسته فرسایش پذیر کمی دارند، میباشد (چین و همکاران، ۲۰۰۳). در طرحواره AFWA از سرعت اصطکاکی استفاده میشود طرحواره AFWA، گسیل گردوخاک بهصورت یک فرآیند

که در این رابطه Cmb یک ثابت تناسب تجربی و برابر با ۱، g شتاب گرانش، pa چگالی هوا است؛ سپس برای بدست آوردن شار افقی نهایی جهشی از مقادیر (H(Ds,p بر روی اندازه ذرات انتگرالگیری انجام می شود.

طرحواره های شائو، سومین طرحواره گسیل گردوخاک استاندارد WRF-Chem هستند، که معمولاً از آن به عنوان دانشگاه کلن (UoC) یاد می شود. زیرگزینه های طرحواره UoC از پیچیدهترین تا سادهترین نحوه ارائه فرآیندهای گسیل گردوخاک، به ترتیب با علائم اختصاری SO1، SO4 و S11 نشان داده میشود. در این طرحواره آهنگ گسیل گردوخاک براساس رهیافت برداشت حجمی برآورد میشود. کمیّت مهم در رهیافت برداشت حجمی، فشار مومسانی خاک است که اندازهگیری آن ساده است. فشار مومسانی بر خاکهای سفت زیاد و بر خاکهای نرم کم است (شائو، ۲۰۰۸). در این رهیافت شار قائم گردوخاک بر اساس حجم حفره ایجاد شده در اثر برخورد ذرات جهش یافته به سطح برآورد میشود (لو و شائو، ۱۹۹۹). هنگامی که یک دانه ماسه جهش یافته به سطح برخورد میکند، چاله کوچکی حفر می کند و ذرات خاک را به هوا پرتاب می کند. ماسه دانه جهش یافته در خاک هدف پیش میرود تا سرانجام آن را ترک کرده یا تا عمقی در خاک فرو رفته و با اتلاف انرژی جنبشیاش متوقف شود (شائو، ۲۰۰۱). در این طرحواره سرعت اصطکاک آستانه (u*t) با رابطه زیر بدست می آید:

 $u_{*t}(d) = \sqrt{A_N\left(\sigma_p g d + \frac{\gamma_c}{\rho_p d}\right)} \tag{(7)}$

ס نسبت چگالی ذره به هواست، g ثابت گرانش، d قطر $\sigma_{N} = 0.0123$ و ذره، $\rho_{N} = 0.0123$ و $\gamma_{c} = 1.65 \times 10^{-4} \ {\rm kg \ s^{-2}}$ شوابت هستند. معادله شار جهش مورد استفاده در طرحواره UoC بصورت زیر نمایش داده می شود:

(۴)

$$q(d) = \begin{cases} (1 - c_f) 2.3 \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}(d, \theta_v, r)}{u_*} \right) \\ \left(1 + \frac{u_{*t}(d, \theta_v, r)}{u_*} \right)^2, u_* \ge u_{*t}(d, \theta_v, r) \\ 0, & u_* < u_{*t}(d, \theta_v, r) \end{cases}$$

در این معادله cf کسر پوشش گیاهی، θv رطوبت حجمی خاک و r فاکتور تصحیح زبری هستند.

در نهایت شائو (۲۰۰۴) یک طرحواره گسیل گرد و خاک با در نظر گرفتن اندازه ذرات ارائه کرد: (۵)

 $F(d_i d_s) = C_y \eta_f [(1 - \gamma) + \gamma \sigma_p] (1 + \sigma_m) g \frac{Q_{ds}}{u_*^2}$

 d_i که در آن $(F(d_id_s)$ ، آهنگ گسیل گرد و خاک با اندازه ، که توسط جهش ذره با اندازه d_s ایجاد میشود؛ که توسط جهش ذره با اندازه η کسر گردوخاک آزاد شده در هر گروه ذرات، σ نسبت گردوخاک آزاد به کلوخهای، σ m، بازده بمباران یا نسبت جرم ذره پرتاب شده به بیرون با بمباران به جرم ذره برخورد کننده، m جرم ذره و g ثابت گرانش بر حسب 2-ms شار جهشی و γ تابعی است که چگونگی راحتی آزاد شدن ذرات کلوخهای را توصیف میکند.

تحلیل همدیدی و ارزیابی طرحواره های گسیل گردوخاک شکل ۱– الف، ب و ج، فشار تراز دریا در روزهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ام آگوست ۲۰۱۸ را نشان میدهد. بر اساس این شکل، کمفشار حرارتی قوی با فشار مرکزی کمتر از ۹۹۰ هکتویاسکال در یاکستان و افغانستان تشکیل شده است. یک کمفشار حرارتی نیز با فشار مرکزی کمتر از ۹۹۲/۵ هکتوپاسکال در شرق ایران و سیستم پرفشاری با فشار مرکزی بیشتر از ۱۰۱۷/۵ هکتوپاسکال بر روی شمال دریای خزر مستقر شده است که زبانههای آن از سمت ترکمنستان و مرزهای شمالشرقی وارد ایران شده است؛ و در مدت سه روز وقوع توفان، تقويت شدهاند. با گسترش پرفشار و نفوذ زبانه آن به نوار شمالی گرادیان شدید فشاری ایجاد شده است. شکل ۱– د–و، ارتفاع ژئوپتانسیلی و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی را، نمایش میدهد. مرکز کمارتفاع در مرز افغانستان و پاکستان در شرق ایران و با مرکز بسته کمتر از ۱۳۴۰ ژئوپتانسیلمتر و مرکز پرارتفاع نیز بر فراز دریای سیاه شکل گرفته است. در تراز میانی جو، پرارتفاع جنبحارهای همراه با تاوایی نسبی منفی و قابلتوجه نیمه شمالی و غربی کشور را فراگرفته است (شکل ۱– ز–ط). زبانه کمارتفاع و تاوایی نسبی مثبت مستقر بر روی پاکستان نیز به نواحی کشور نفوذ کرده است؛ با نفوذ تاوایینسبی مثبت تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی با مقادیر بیش از (s-1) ۵–۱۰×۱۰ به شرق

کشور، گرد و خاک اوج گرفته است. شکل ۱-ی-ل، نمایه قائم باد و سرعت قائم را در مدت زمان وقوع توفان نشان می دهد. بر اساس این شکل ها، بیشینه سرعت باد با جهت شمالی (جت تراز پایین حوالی ۹۵۰ تا ۸۰۰ هکتوپاسکالی سطح زمین) در محدود طول جغرافیایی ۶۱ درجه شرقی که همان منطقه زابل می باشد، همراه با جریانات بالاسو مشاهده می شود. در این شکل ها، جریانات بالا و پایین سو به تناوب از مرکز به سمت شرق کشور وجود دارد.

شکلهای ۲-الف- ج، ۲-د- ه، ۲-ز- ط، به ترتیب خروجی مدل WRF-Chem، برای طرحوارههای AFWA، GOCART و SHAO1 و SHAO1 برای روزهای ۱۱ تا ۱۳ام آگوست ۲۰۱۸ را برای کمیت بار گرد و خاک نشان میدهد. افزایش مقادير PM10 به عنوان كميّت نمايش دهنده غلظت ذرات گردوخاک مربوط به ایستگاه زابل نیز با خروجیهای مدل سازگاری قابل قبولی دارد، که نشان میدهد طرحوارههای AFWA و GOCART در شبیه سازی روند تغییرات و مقدار بیشینه غلظت گردوخاک عملکرد خوبی دارد. این در حالیست که طرحواره SHAO1 حتی بطور کیفی دارای خطای قابل توجهی است (مدل برای دو طرحواره دیگر SHAO نیز اجرا شده است اما به دلیل تشابه زیاد و خطای قابل توجه در اینجا ارائه نشده است). بررسی تصاویر RGB ماهوارهٔ (Meteosat Second Generation (MSG، در روزهای وقوع توفان مبین گسیل گردوخاک بر روی نواحی شرقی و جنوب شرقی ایران است (شکل۲ ی- ل). نتایج شبیهسازی نشان میدهد از بعدازظهر ۱۲ام مقادیر بار گرد و خاک بر روی سیستان و بلوچستان افزایش قابلتوجه نشان میدهد که میتوان نتیجه گرفت علاوه بر انتقال بخشی از توده گرد و خاک، منطقه زابل نیز بهعنوان کانون عمل کرده و (گزارش کد ۰۷) از داخل منطقه موجب این افزایش شده است.

مقایسه خروجی طرحوارههای گسیل AWFA و مقایسه خروجی طرحوارههای گسیل PM10 در ایستگاه زابل با دادههای دیدبانی بیانگر آن است که روند افزایش غلظت به خوبی شبیهسازی شده است، نتایج نشان میدهند که طرحواره AFWA مقادیر غلظت این ذرات را بیشتر از مقادیر دیدبانی و بر عکس طرحواره GOCART مقادیر غلظت این ذرات را کمتر از مقادیر دیدبانی برآورد

کرده است (شکل ۳). مقایسه غلظت ذرات PM10، سرعت باد و دید افقی در ایستگاه زابل در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار در زمان اوج توفان گردوخاک و بیشینه غلظت ذرات آلاینده، سرعت باد افزایش یافته و به بیش از ۲۵ متر بر ثانیه (۹۰ کیلومتر بر ساعت) رسیده است. در همین زمان دید افقی بشدت کاهش یافته و حتی به حدود ۱۰۰ متر هم کاهش یافته است. محاسبه میانگین مربع خطاها و میانگین خطای مطلق، طرحوارههای گسیل Afwa و نتایج بهتر برای طرحواره است (شکل ۵).



شکل ۱- میدانهای هواشناسی برای روزهای ۱۱–۱۳ آگوست ۲۰۱۸ ساعت ۱۲ گرینویچ. الف-ج: فشار تراز دریا (hPa)، د-و: ارتفاع ژئوپتانسیلی بر حسب ژئوپتانسیل دکامتر و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی بر حسب درجه سلسیوس، ز-ط: ارتفاع ژئوپتانسیلی بر حسب ژئوپتانسیل دکامتر و تاوایی نسبی بر حسب (¹⁻s)⁵⁻10× و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی بر حسب درجه سلسیوس، ی-ل: نمایه قائم باد بر حسب متر بر ثانیه و سرعت قائم بر حسب پاسکال بر ثانیه در عرض ۳۱ درجه شمالی.



شکل ۲- بار گردوخاک بر حسب میکروگرم بر مترمکعب خروجی الف-ج: طرحواره AFWA، د- و: طرحواره GOCART، ز-ط: طرحواره SHAO1، مدل WRF-Chem. ی- ل: تصاویر ماهوارهای RGB روزهای ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸.



شکل ۳- مقایسه غلظت ذرات PM₁₀ بر حسب میکروگرم بر مترمکعب، ایستگاه زابل براساس دادههای دیدبانی و خروجی مدل WRF-Chem



شکل ۴: غلظت ذرات PM10 (میکروگرم بر مترمکعب)، دید افقی (متر) و سرعت باد (متر بر ثانیه)، ایستگاه زابل.



شکل ۵: میانگین مربع خطاها (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE)، طرحوارههای گسیل Afwa و Gocart مدل WRF-Chem ایستگاه زابل

بحث و نتیجهگیری

بطورکلی خروجی مدل از نظر مقیاس و تغییرات زمانی برآوردی منطقی از هواویزها در محدوده مطالعاتی بدست داد. طرحوارههای گسیل AFWA و GOCART مدل WRF-Chem، چشمه گسیل و تغییرات غلظت گرد و خاک توفان ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸ را تا حد زیادی مشابه شبیهسازی کردهاند. این در حالیست که نتایج شبیهسازی طرحوارههای SHAO بویژه SHAO1 و SHAO2 کاملا متفاوت و دارای خطای قابل توجهی هستند.

مقایسه کمّی خروجی مدل برای طرحوارههای مختلف گسیل با دادههای مشاهداتی ایستگاه زابل در شکل ۳ نشان داده شده است. طرحواره AFWA، غلظت گرد و خاک را بیشتر از مشاهدات شبیهسازی کرده است اما روند تغییرات آن تطابق قابل قبولی دارد. غلظت گردوخاک پیش بینی شده توسط طرحواره GOCART، از نظر کمیّت، کمتر از مشاهدات است. با تولید نقشههای توزیع غلظت ذرات گرد و خاک، مناطقی از حوضه شبیهسازی که دارای حداکثر شناسایی شد. شبیهسازی ذرات گرد و خاک با سه دامنه با قدرتهای تفکیک ۵، ۵۱و ۴۵ کیلومتری، شرق ایران، در منطقه زابل، زاهدان و نواحی جنوب کرمان و سیستان و بلوچستان (کهنوج، ریگان، نیکشهر و قصرقند)، زاهدان،

- منابع
- ۲. حمیدیان پور, م.، مفیدی, ع.، سلیقه، م.، ۱۳۹۵، تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰۹–۱۰۹.
- ۲. خسروسرشکی، ل.، ایراننژاد، پ.، علیاکبری بیدختی، ع.، ۱۳۹۲، مقایسه طرحوارههای گسیل گرد و خاک در برآورد شار قائم آن در نواحی چشمهای ایران، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۰، شماره ۱، ۲۰۱–۲۱۶.
- ۳. رضازاده، م.، ایران نژاد، پ.، و شائو، ی.، ۱۳۹۲شبیه سازی گسیل غبار با مدل پیشبینی عددی وضع هوا WRF-Chem و با استفاده از دادههای جدید سطح در منطقه خاورمیانه :مجله فیزیک زمین و فضا: ۳۹(۱۱) ، ۱۹۱–۱۹۱.

زابل (گزارش متوالی کد ۰۷ از این ایستگاهها) و شرق هرمزگان (جاسک و میناب) را به عنوان چشمه اصلی منطقه نمایش داد. به لحاظ تطابق در زمان وقوع پدیدههای گردوخاک شدید تطابق قابل قبولی با دادههای ایستگاه زابل دارد. غلظتهای شبیهسازی شده، اعتبار خوبی را از توزیع زمانی و مکانی غلظت گردوخاک با توجه به تصاویر RGB ماهوارهای و دادههای دیدبانی نشان داد. افزایش مقادیر PM10 به عنوان کمیّت نمایش دهنده غلظت ذرات گرد و خاک مربوط به ایستگاه زابل نیز با خروجیهای مدل انطباق قابل قبولی دارد.

تحلیل همدیدی در فصل گرم حاکی از حضور و تقویت کمفشار فصلی در پاکستان و پرفشار در ترکمنستان در شمال خزر و در فصل سرد پرفشار سیبری و کمفشار دینامیکی در شرق ایران و ایجاد گرادیان فشاری و تشدید وزش باد و خیزش و گسیل گردوخاک است. فعالیت جت تراز پایین (جریانات شدید شمالی) در حوالی منطقه زابل و حرکات متناوب بالارو و پایینرو از دیگر عوامل مؤثر در ناپایداری منطقه و وقوع توفان گرد و خاک بوده و شرایط مساعدی را برای ایجاد گردوخاک فراهم کرده است. این مطلب با یافتههای علیزاده و همکاران (۲۰۱۴) و حمیدی و همکاران

- ۲. رنجبرسعادت آبادی، ع.، میهن پرست، م.، نوری، ف.، ۱۳۹۵، بررسی پدیده گرد و غبار در غرب ایران ازدیدگاه هواشناختی(مطالعه بلندمدت وکوتاهمدت)، مجله علمی وترویجی نیوار، شماره ۹۲–۹۳، ۵۳–۶۶.
- ۵. علیجانی، ب.، و رئیس پور، ک.، ۱۳۹۰، تحلیل آماری، همدیدی طوفان های گرد و خاک در جنوب شرق ایران، مطالعه موردی: منطقه سیستان: مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۷(۵)، ۱۳۲–۱۰۷.
- ۶. کارگر، ۱.، بداق جمالی، ج.، رنجبر سعادت آبادی، ع.، معین الدینی، م.، گشتاسب، ح.، ۱۳۹۵، شبیه سازی عددی توفان ماسه و ریز گرد شدید شرق ایران با استفاده از مدل WRF-Chem (مطالعه موردی: ۳۱ می و ۱ ژوئن ۱۰۱۱)، محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۶۹، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۵، ۱۰۷۷–۱۰۸۹.

in WRF-Chem: impact of wildfires on weather forecasts. Atmospheric Chemistry & Physics, 11(11).

- 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.
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R. & Shao, Y. Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. Asia-Pacific J Atmos Sci 49, 279–286 (2013). https://doi.org/10.1007/s13143-013-0027-9.
- Hong, S-Y., and J-O. J.Lim, 2006: The WRF single-moment microphysics scheme (WSM6).J. Korean Meteor. Soc., 42, 129– 151.
- Kawamura, R. (1951), Study on sand movement by wind, Rep. Inst. Sci. Technol. Univ. Tokyo, 5(3), 95-112.
- Kok, J. F., Parteli, E. J., Michaels, T. I., and Karam, D. B.: The physics of wind-blown sand and dust, Rep. Prog. Phys., 75,106901, https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901, 2012.
- LeGrand, S. L., Polashenski, C., Letcher, T. W., Creighton, G. A., Peckham, S. E., and Cetola, J. D.: The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3.8.1, Geosci. Model Dev., 12, 131–166, https://doi.org/10.5194/gmd-12-131-2019, 2019.
- 24. 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.
- 25. 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.
- Lu, H. and Shao, Y.: A new model for dust emission by salta- tion bombardment, J. Geophys. Res.-Atmos., 104, 16827–16842, https://doi.org/10.1029/1999JD900169, 1999.

۷. کرمی، س.، حسین حمزه، ن.، رنجبرسعادتآبادی، ع.، موسوی، م.، ۱۳۹۷، بررسی همدیدی و شبیهسازی توفان خاک استان خوزستان در بهمن ماه سال ۱۳۹۵، نشریه هواشناسی و علوم جو، جلد ۱، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، ۱۷۹۷–۱۸۹۹.

- Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., and Sturman, A., 2014, Mesoscale modelling of the "wind of 120 days" and associated mineral dust distribution over eastern Iran using WRF/Chem: Atmos. Res., 143, 328– 341.
- 9. Bagnold, R. A.: The physics of blown sand and desert dunes, Chap-mann and Hall, Methuen, London, 265 pp., 1941.
- 10. Black, T.L., 1994. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. Weather and Forecasting, 9(2), 265–278.
- 11. 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).
- 13. 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.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S.J., 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. J. Geophys. Res. 106 (D17), 20255– 20273.
- 15. 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.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., Mckeen, S.A., Frast, G., Skamarock, W. C. and Eder, B., 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. Atmospheric Environment, 39(37), pp.6957-6975.
- 17. Grell, G. Freitas, S. R., Stuefer, M., and Fast, J., 2011. Inclusion of biomass burning

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., 2008. Physics and Modelling of Wind Erosion. Springer Science, New York.
- 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).
- 40. Shao, Y., Dong, C.H., 2006. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring. Glob. Planet. Chang. 52 (1), 1–22.
- 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.
- Tegen, I. and Fung, I.: Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness, J. Geophys. Res. -Atmos., 99, 22897–22914, https://doi.org/10.1029/94JD01928,1994.
- Westphal, D.L., Toon, O.B. and Carlson, T.N., 1988. A case study of mobilization and transport of Saharan dust. Journal of the Atmospheric Sciences, 45(15), 2145-2175.
- 44. Westphal, D.L., Toon, O.B. and Carlson, T.N., 1987. A two- dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 92(D3), 3027-3049.
- 45. 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.
- 47. 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.

- Marticorena, B., and Bergametti, G., 1995, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme: Journal of Geophysical Research, 100, 16415–16430, doi: 10.1029/95JD00690.
- 29. 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 correlatedk model for the longwave. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D14), 16663-16682.
- 31. 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).
- 32. 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.
- 34. Noh, Y., Cheon, W.G., Hong, S.Y. et al. 2003. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary later based on Large Eddy Simulation Data. Boundary-Layer Meteorology (2003) 107: 401. https://doi.org/10.1023/A:1022146015946.
- 35. Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., Gill, T.E., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Rev. Geophys. 40 (1), 1002. http://dx.doi.org/10.1029/2000RG000095.
- 36. Schubert, S. D., Rood, R. B. and Pfaendtner, J., 1993. An assimilated dataset for earth