شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده ازصحرای ترکمنستان به کرانههای جنوبی دریای خزر

دريافت مقاله:۹۴/۳/۲۵ پذيرش نهايي: ۹۴/۱۰/۱۲

صفحات:۱۶۴-۱۴۱

پروین غفاریان: استادیار هواشناسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی^۱ Email: p.ghafarian@inio.ac.ir **سمانه نگاه**: دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

Email: samaneh_negah@yahoo.com

نیما فرید مجتهدی: کارشناس ارشد آب و هواشناسی، بخش تحقیقات کاربردی اداره کل هواشناسی گیلان Email: nima.mojtahedi@gmail.com **حسین عابد**: کارشناس ارشد آب و هواشناسی، رییس گروه تحقیقات اداره کل هواشناسی گیلان Email: kamranabed@yahoo.com

چکیدہ

سواحل جنوبی دریای خزر، به ویژه در دههی اخیر، به دفعات توسط ریزگردها به مخاطره افتاده است. در این پژوهش تلاش شده است تا کانون اصلی و ساختار گردشهای جوی تولید ریزگردهایی که طی روزهای ۱۹ و ۲۰ سپتامبر۲۰۱۴ موجب غبارآلودگی سواحل جنوبی دریای خزر شد، مورد واکاوی قرار گیرد. مدل لاگرانژی پسگرد HYSPLIT برای تعیین منشأ و مسیر شارش ریزگردها و نیز مدل عددی شیمیایی جو (WRF-Chem) برای تعیین تمرکز و توزیع ریزگردها و شبیهسازی پیکرد سامانه مورد نظر، مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج این پژوهش، یک پهنههای بیابانی صحرای ترکمنستان و قره قوم شناسایی شد. منشأ اصلی خزر، روی ریزگردها در این سامانه، شکلگیری چرخند حرارتی در مقیاس محلی روی هستهی دمایی گرم در شرق خزر است. همگرایی سطحی ناشی از گردش چرخندی این مرکز شده است. شرایط پایداری نسبی جوی در ترازهای میانی و فوقانی موجب شده، شده است. شرایط پایداری نسبی جوی در ترازهای میانی و فوقانی موجب شده، ریزگردها نفوذ و گسترش قائم چندانی در عمق تروپوسفر نداشته و به زیر ۲۰۰

^۱. **نویسنده مسئول:** تهران- خیابان فاطمی غربی- خیابان شهید اعتمادزاده-شماره ۳-پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی

هکتوپاسکال محدود شوند. مولفهی منفی مداری و نصفالنهاری میدان باد ۱۰ متری و افزایش سرعت باد با توجه به افزایش گرادیان فشار روی بخشهای بیابانی شرق خزر، منجر به شکلگیری جریانهای شمال شرقی و گسیل تودهی ریزگردها به سمت پهنهی خزر جنوبی و کرانههای جنوبی آن شده است. پایش تصاویر باند مرئی سنجنده مودیس و همچنین پهنهبندی مکانی مقادیر ضخامت نوری جو (AOD)، نتایج حاصل از شبیهسازی عددی در نحوهی توزیع ریزگردها و انتقال آن به استانهای مازندران و گیلان را تایید میکنند.

کلیدواژگان: مخاطره غبار، صحرای ترکمنستان، مدل لاگرانژی HYSPLIT، مدل عددی شیمیایی WRF/Chem، چرخند حرارتی، سواحل جنوبی دریای کاسپین.

مقدمه

در مطالعات مربوط به پدیدهی ریزگردها عموماً چند مساله از جمله منشاء یا سرچشمهی تولید، الگوی همدیدی موثر بر برداشت و انتقال آنها، ردیابی مسیر و همچنین پیشبینی این پدیده مورد توجه بوده است. طبق مطالعاتی که صورت پذیرفته، بخش بزرگی از ریزگردهای وارده به ایران از جنوب غربی و غرب ایران و از مناطق خشک و صحراهای کشورهای همجوار منشاء می گیرد که عمده ی سرچشمه آن مناطق بیابانی سوریه، عراق و بیابانهای موجود در شمال شبه جزیره عربستان است (ذولفقاری و عابدزاده،۱۳۸۴؛ طاووسی و همکاران، ۱۳۸۹). علاوه بر این با توجه به وجود صحراهای وسیع در بخشهای بزرگی از فلات ایران، این کشور به طور بالقوه توانایی تولید و یا تقویت چنین توفانهایی را در صورت فراهم بودن شرایط محیطی و جوی نیز دارد (فرحبخشی و همکاران،۱۳۹۴). به عنوان نمونه گردوخاکهای همراه با بادهای صدوبیستروزهی سیستان و یا توفان گردوخاک ۱۲ خرداد ۱۳۹۳ در تهران نمونههای بارز از چشمههای داخل کشور در تولید ریزگردهاست. مطالعه پدیدهی ریزگردها علاوه بر ارزشهای علمي، به دليل آثار زيانبار آن مورد توجه قرار گرفته است. امروزه به دلايل مختلفي چون افزایش فراوانی رخداد، شدت و گسترش مکانی وقوع ریزگرد در فلات ایران، علاقه به پژوهش در این زمینه، افزایش یافته است. گرچه نمیتوان از افزایش آگاهی عمومی و وجود حساسیتهای اجتماعی، سیاسی و زیستمحیطی در این زمینه غافل بود. افزایش دانش پژوهشگران داخلی در استفاده از ابزارهای نوین، به افزایش شناخت از این پدیدهها کمک کرده

شبیه سازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای ترکمنستان به کرانه های جنوبی ... ۱۴۳

است. به ویژه رواج و فراگیری استفاده از ابزارهایی همچون سنجش از دور، امکان شناسائی چشمههای تولید ریزگردها و پیشیابی مسیر انتقال آنها را فراهم کرده است. در ایران بیشینهی رخداد پدیدهی ریزگردها، با توجه به نزدیکی مناطق جنوب غربی و غربی کشور به کانونهای تولید آن و واقع شدن در مسیرهای ورودی، متعلق به مناطق مذکور است. با این حال، برخی از مناطق مرکزی و شمالی کشور نیز برخی اوقات از این پدیده متاثر می شوند. مانند رخداد گرد و خاک ۹ تیرماه ۱۳۹۳، که در تهران موجب کاهش شدید دید افقی شد و منشا آن از دشت کویر بوده است، (غفاریان و همکاران، ۱۳۹۳). دوری از کانونهای تولید ریزگردها، وجود دیوارهی البرز، بارشهای قابل توجه در فصول مختلف سال و همچنین آبوهوای معتدل و مرطوب کرانه جنوبی دریای خزر، شرایط را به گونهای فراهم کرده که انتظار رخداد این پدیده در این منطقه از کشور، کم است. اما دادههای ثبت شده و مطالعههایی که در چند سال اخیر در این زمینه انجام شد، نشان از وجود و روند افزایشی وقوع این پدیده در منطقه رادارد (اسعدی و همکاران، ۱۳۹۲ و مومن پور ۱۳۹۲). رخداد غبار در تاریخ ۲۹ سپتامبر۲۰۱۴، افق جدیدی را در شناسایی منابع تولید و ورود ریزگردها به کرانهی جنوبی دریای خزر و شناخت بیشتر آبوهوای ایران باز کرد که در این مطالعه به معرفی و تحلیل آن پرداخته شده است. در این مطالعه سعی شده با تلفیق نتایج حاصل از اجرای مدلهای عددی، تفسير محصولهاى تصاوير سنجندهى موديس وبررسى كدهاى ديدبانى، كانون تازه يافتهى تولید ریزگردها و انتقال آن به منطقه و همچنین سازوکار همدیدی شکلگیری و نفوذ آن، شناسائی و معرفی شود.

روش تحقيق

منطقه مورد مطالعه

منطقهی کرانه جنوبی دریای کاسپین به دلیل شرایط آبوهوایی و بومشناختی فاقد کانونهای تامین غبار در داخل مرزهای طبیعی خود است. وجود خاک، رطوبت فراوان و به تبع آن گسترش پوشش گیاهی مناسب به عنوان یک پوشش مانع در فرسایش بادی سبب حفاظت از پوشش سطحی شده است. علاوه بر این، رشته کوه البرز به عنوان سدی نسبی در مقابل عبور بسیاری از غبارهای رسیده به مناطق جنوبی البرز، تا حدودی مناطق شمالی را از گزند وقوع پیاپی پدیده غبار محفوظ میدارد. با این حال، وجود تنگهی منجیل و همچنین فراهم بودن شرایط همدیدی مناسب، در مواردی زمینه را برای نفوذ غبار به کرانههای جنوبی دریای

کاسپین میسر کرده است و شاهد افزایش فراوانی رخداد پدیده غبار در منطقه طی یک دهه اخیرهستیم.



شکل(۱). موقعیت کرانه های جنوبی دریای کاسپین به همراه سه ایستگاه مورد مطالعه.

به منظور واکاوی کانون تولید تودهی غبار و سازوکار گسیل آن به سواحل جنوبی دریای کاسپین به ترتیب مراحل زیر و دادههای ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته شده است: ۱. به منظور تعیین منابع تولید غبار گسترش یافته طی دو روز یاد شده به حاشیهی جنوبی دریای کاسپین از دادههای موجود فراسنجهای هواشناسی سه ایستگاه همدیدی منطقه شامل رشت، نوشهر، بندرترکمن که دارای توزیع و پراکندگی جغرافیایی مناسب از شرق تا غرب سواحل جنوبی کاسپین میباشند، استفاده شده است.

۲. برای تایید وقوع پدیده گردوغبار و به منظور پایش نحوه یگسیل و حرکت غبار به منطقه (دامنههای شمالی البرز)، با توجه به کاربرد تصاویر سنجنده مودیس در پایش غبار تصاویر روزانه سنجنده مودیس ماهوارههای ترا (TERRA)و آکوا (AQUA) در باندهای مرئی و ۲-۲-۱، مورد استفاده قرار گرفت. شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای ترکمنستان به کرانههای جنوبی ... ۱۴۵

۳. در گام بعد، برای شناسایی منابع اصلی تولید گرد و غبار و تعیین مسیر شارشهای جوی برای انتقال غبار به سواحل جنوبی دریای کاسپین، از نسخه ۴٫۹ مدل لاگرانژی ۱ HYSPLIT (Draxler and Rolph, مختلف جو استفاده شد , Rolph, ای امکان ردیابی پسگرد۲ ذرهها در ترازهای مختلف جو استفاده شد , Corale and Rolph) با امکان ردیابی پسگرد۲ ذرهها در ترازهای مختلف جو استفاده شد , Rolph (Draxler and Rolph) دادههای HNL است. این دادهها در واقع دادههای (Tor. دادههای وروی مدل (HYSPLIT)) دادههای HNL است. این دادهها در واقع دادههای (Draxler and Rolph) دادههای HNL است. این دادهها در واقع دادههای (Tor. دادههای وروی مدل (HYSPLIT)) دادههای HNL است. این دادهها در واقع دادههای NCEP
۱۰۰۰ ستند که توسط لابراتوار منابع وابسته به NOAA مورد پردازش مجدد قرار گرفته است. این دادهها با تفکیک افقی ۱۵ درجه، برای ۲۶ تراز فشاری (۲۰۰- ۲۰۰۰ محتویاسکال) و با گام زمانی ۲۲ ساعته در دسترس میباشند. دادههای تحلیل شدهی عملیاتی مقیاس جهانی یا به طور مختصر INL از جمعآوری سامانهی یک پارچهسازی جهانی (GDAST) میز وظیفهی دادههای مشاهداتی از سراسر جهان را با استفاده می کند. سامانهی از راه دور (GDAST) و سایر منابع به صورت بیوقفه و پیوسته بر عهده دارد. در نهایت دادههای از راه دور (GTSF) و سایر منابع به صورت بیوقفه و پیوسته بر عهده دارد. در نهایت دادههای سامانه پیش بینی مدلی مشابه مدلی که در مرکز ملی پیش بینی محیطی برای تولید دادههای سامانه پیش بینی مدلی مشابه مدلی که در مرکز ملی پیش بینی محیطی برای تولید دادههای سامانه پیش بینی (GTSF) جهانی (GTSF) استفاده می کند تولید می گردد (۲۹۹۲).

۴. در نهایت، به منظور بررسی چگونگی عملکرد میدان باد در گسیل غبار تولید شده توسط چشمه ی شناسایی شده، الگوی میانگین روزانه ی مربوط به فراسنجهای هواشناسی از قبیل میادین فشار سطح دریا، مولفه های مداری و نصف النهاری میدان باد و غلظت غبار در سطح زمین و همچنین میدان ژئوپتانسیلی، میدان دما و تاوایی نسبی ترازهای میانی و فوقانی استاندارد جو با استفاده از اجرای مدل عددی شیمیاییWRF-Chem مورد مطالعه قرار گرفت. داده های وروی مدل هایی (WRF-Chem) که در این تحقیق استفاده شده اند، نیز با فرمت است.

۵. به منظورتعیین مقادیر AOD، با استفاده از بانک دادههای کمیتهای مختلف اندازه گیری شده حسگر مادیس ماهوارههای ترآ و آکوا، تصاویر پهنهبندی مکانی میانگین روزانه عمق نوری هواویزهها (MOD۰۴_L۲, MYD۰۴_L۲) در باند ۵۵۰ نانومتر (دیپ بلو)و تفکیک مکانی °۱×°۱ برای بازه زمانی مورد بررسی، دریافت و مورد استفاده قرار گرفت.

- Global Telecommunication System
- a. Global Forecast system

^{1.} Lagrangian

۲. Backward

^{٣. Global Data Assimilation system}

۶. مدل لاگرانژی HYSPLIT

در علم دینامیک و مکانیک سیالات دو رهیافت اصلی، در مطالعه ی حرکت سیالات وجود دارد، رهیافت اویلری و رهیافت لاگرانژی. رهیافت لاگرانژی در مطالعه موارد مربوط به آلودگی هوا و تعیین میسر حرکت تودههای هوا، کاربردهای گستردهای دارد. از آنجایی که در رهیافت لاگرانژی هر ذره در زمانهای مختلف، موقعیتهای متفاوتی خواهد داشت، بنابراین رهیافت لاگرانژی این امکان را فراهم میآورد که مدلهای پایه یلاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی و زمانی خاص، حرکت آن را در گامهای زمانی دلخواه به سمت زمانهای آینده (پیشیابی) و یا به سمت زمانهای گذشته (پسگرد) ردیابی کنند.



شکل(۲). دیدگاه لاگرانژی مدل (سمت راست) و دیدگاه اویلری مدل (سمت چپ) (www.arl.noaa.govl)

مدل HYSPLIT دارای گستره و قابلیت فراوانی است که در ذیل به بخشی از آنها اشاره شده است:

 ۱. قابلیت اجرا در محیط ویندوز، لینوکس و مک، ۲.قابلیت تبدیل فایلهای خروجی مدلهای هواشناسی پرکاربرد (MM۵, WRF) به فرمت(ARL) ، ۳. تحلیل و درونیابی زمانی و مکانی دادههای هواشناسی به صورت خطی، ۴. مدلسازی در مناطق صنعتی از لحاظ غلظت و نشست، ۵. مدلسازی در مناطقی با عوارض پیچیده مانند مناطق ساحلی، ۶. مدلسازی خط سیر رو به عقب و رو به جلو در ارتفاعهای متفاوت، ۷. مدلسازی پیچیده خط سیر (ماتریکس، شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای تر کمنستان به کرانههای جنوبی ... ۱۴۷

پذیرنده و …)، ۸. مدلسازی توفانهای گرد و غبار، ۹. مدلسازی غبار آتشفشانی، ۱۰. مدل-سازی شرایط اضطرار و نیاز به پاسخ سریع. ۲. مدل WRF-Chem

در این تحقیق از مدل WRF-Chem نسخه ۳/۶ برای شبیه سازی توفان گرد و غبار استفاده شده است. تعداد آشیانه انتخابی" دو " بوده است. نسبت تفکیک افقی آشیانه ها ۱ به ۳ است. این مدل با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر برای آشیانه ی اول و ۱۰ کیلومتر برای آشیانه ی دوم تنظیم شده است. تفکیک افقی داده های زمینی برای آشیانه ی اول هر ۱۰ دقیقه (نوزده کیلومتر) و آشیانه ی دوم هر ۵ دقیقه تکرار می شود. از نگاشت لامبرت در این مدل استفاده شده است. از داده های FNL به عنوان ورودی مدل استفاده شده است. طرحواره های متعددی برای برآورد گسیل غبار در مدل طراحی شده است، که در این تحقیق از طرحواره ی GOCART(Chin et al., ۲۰۰۰; Ginoux et al., ۲۰۰۱; Chin et al., ۲۰۰۲; Grell et al., ۲۰۰۵ میکرومتر دارند به چهار کلاس مطابق جدول (۱) طبقه بندی شده است:

جدول(۱). خصوصیات فیزیکی چهار کلاس خاک استفاده شده در طرحوارهی گرد و غبار (گینوکس و همکاران، ۲۰۰۴)

چگالی ذرهها (کیلوگرم بر متر	کسر هر دسته از	شعاع موثر (ميكرومتر)	كلاس
مكعب)	ذرەھا		
75	٠/٧۵	• / 1	١
75	١/۵	۰/۲۵	٢
75	۲/۵	۰/۲۵	٣
75	۴/۵	۰/۲۵	۴

در این شبیه سازی نهشت خشک، شامل پخش مولکولی و تلاطمی بعلاوه ی گرانش است، (Binkowski and Shankar, ۱۹۹۵). برای محاسبه ی شار قائم گسیل غبار از رابطه ی زیر استفاده شده است، (Gillette and Passi, ۱۹۸۸):

$$F \cong CSs_p u_{10}^2 (u_{10m} \ 0 \ u_{tp}) \quad \text{For} \quad u_{10m} \propto u_t \tag{1}$$

1. Global Ozone Chemistry Aerosol radiation and Transport

141

که C ضریب ثابت تجربی است و برابر $C \cong 1\pi g s^2 m^{05}$ است. u_{10} سرعت باد افقی در ارتفاع ۱۰ متری، u_{1p} سرعت آستانهی باد است که بیان گر آغاز گسیل ذرهها غبار است و به عواملی مانند اندازهی ذرات، چگالی هوا و رطوبت بستگی دارد. s_p کسر هر دسته اندازهی ذرات غبار در گسیل کل میباشد، (به جدول ۲-۱ مراجعه شود). S ، تابع چشمه که پتانسیل مناطق چشمهی غبار را تعریف و شرایط سطح مانند پوشش گیاهی و گسترهی برف را مشخص میکند. به عبارتی S، احتمال داشتن خاک سست تجمع شده در نقطهی i ام در ارتفاع z_i و محورت زیر محاسبه می شود(۲۰۰۱).

$$S \cong \left(\frac{z_{\max} 0 \, z_i}{z_{\max} 0 \, z_{\min}}\right)^5$$
 که $S \cong \left(\frac{z_{\max} 0 \, z_i}{z_{\max} 0 \, z_{\min}}\right)^5$ که Z_{\max} و z_{\min} و z_{\min} به ترتیب، بیشینه و کمینهی ارتفاع در محیط توپوگرافی $0^* \overline{010}$ می-
اشند.
سرعت آستانه نیز توسط (Iversen and White, ۱۸۸۲)تعریف شد و سپس توسط (Marticorena and Bergametti , ۱۹۹۵)

$$u_{tp} \approx 0.13 \frac{\sqrt{\frac{\nu_{g}g\iota_{p}}{\nu_{a}}} \sqrt{\frac{1.6\partial 10^{07}}{\nu_{p}g\iota_{p}^{2.5}}}}{\sqrt{1.7638(4.6\partial 10^{6}(\iota_{p}^{1.56}.1)^{0.092} 0 1)}}$$
(7)

که v_p چگالی ذرهها (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب)، g شتاب گرانی (برابر ۹/۸۱ متر بر v_p متر بر v_p مجذور ثانیه)، I_p قطر موثر ذرهای با اندازهی (m) و P (m) و چگالی هوا است. مقادیر v_a و I_p برای هر چهار کلاس ذرهها در جدول (۱) آورده شده است. معادلهی (۳)، برای در نظر گرفتن اثر پیوستگی رطوبت خاک توسط (۲۰۰۴) (Ginoux et al., ۲۰۰۴)

به صورت زیر تغییر کرد: $u = \partial(1, 2, 0, 2\log_{10}W)$ $W^{2} = 0.5$

$$u_{twp} \cong \begin{cases} u_{tp} O(1.2.0.2\log_{10}W) & W10.3 \\ & Otherwise \end{cases}$$
(f)

شبیه سازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای تر کمنستان به کرانه های جنوبی ... ۱۴۹

که W رطوبت خاک است. غلظت گرد و غبار در ابتدای شبیهسازی توسط مدل به صورت مقدار بسیار جزئی(تقریبا صفر) در نظر گرفته می شود و هیچ گونه شارش جانبی گرد و غبار به داخل آشیانه وجود ندارد، به گونهای که مدل فرض می کند که تمام گرد و غبارها از داخل آشیانه شبیه سازی ایجاد شدهاند، اما گرد و غبارها می توانند زمانی که به مرزها می رسند، آزادانه به سمت خارج فرارفت یابند. این فرضیات به این معنی است که مدل از توزیع چشمههای خارجی گرد و غبار و هواویزهای زمینه صرفنظر می کند. فیزیک اصلی استفاده شده در شبیه-سازی مدل WRF/CHEM در جدول شمارهی (۲) آورده شده است.

Physical Process	WRF-Chem Option	
Microphysics	Lin (Lin et al., $rq_{A}r$)	
Short-wave radiation	Goddard (Wild et al., $\gamma \cdots$)	
Long-wave radiation	RRTM(Wild et al., $r \cdots$)	
Surface layer	Monin-Obukhov (Obukhov, 1971)	
Land-surface model	NOAH (Chen and Dudhia, $r \cdot \cdot r$; Ek et al., $r \cdot \cdot r$)	
Cumulus parameterization	ation Grell ^r D (Grell, ^{rqq})	
Dust module	GOCART (Ginoux et al., ۲۰۰)	
Boundary layer scheme	YSU (Hong et al., ^{r777} ; Hong, ^r · ¹ ·)	

جدول(۲). پیکربندی مدل WRF-Chem

نتايج

الف. مسیریابی ذرمهای غبارگسیل شده با استفاده از نتایج حاصل اجرای مدل HYSPLIT مسیریابی پسگرد ذرمها در ۳ ایستگاه همدیدی منتخب منطقه، بندرترکمن، بابلسر و رشت به ترتیب در جنوب شرق، مرکز و جنوب غرب سواحل، برای روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴ با استفاده از اجرای مدل HYSPLIT انجام شد. ذرمها در سه سطح ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین و در حد فاصل زمانی ۶ ساعته تا ۴۸ ساعت قبل ردیابی شدند. مدل امکان نمایش مسیر ردیابی شده را در دو نمای افقی (بخش بالا در هر شکل) و قائم (بخش بالا در هر شکل) فراهم می کند. علامت ستاره در تمامی شکلها، موقعیت ایستگاهها را نشان می دهد.





شکل(۴). ردیابی برای ایستگاه رشت روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴. الف: ساعت ۰۰ UTC و ب: ساعت ۱۲ UTC.

شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای تر کمنستان به کرانههای جنوبی ... ۱۵۱

بررسی پسگرد مسیر ذرهها در ترازهای هدف و همچنین نیمرخ قائم مسیر ذرهها نشان می-دهد که منشأ ریزگردهای رسیده به ایستگاه بندرترکمن در هر سه تراز مورد بررسی طی روز ۲۰ سپتامبر، عمدتاً بخشهایی از صحرای قرمقوم در شمال ترکمنستان و جنوب قزاقستان و در نزدیکی سطح زمین است. ریزگردهای برخواسته از سطوح پوشیده از شن و ماسه در این مناطق، همراه با جریانهای غربسو تا روی پهنهی آبی خزر و پس از آن با انحراف به سمت عرضهای پایین تا سواحل جنوبی خزر انتقال مییابد. نتایج به دست آمده برای ساعت ۱۲ ظهر روز ۲۰ سپتامبر ایستگاه رشت و ایستگاه نوشهر (شکل ۳ و۴) نشان میدهد که ذرههای واقع شده در ارتفاع ۱۰۰۰ متری (درسطوح بالاتر)، ۴۸ ساعت قبل روی بخش هایی از دشت کویر و در ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متری قرار داشتند که در نتیجه جریانهای غربسو از سمت استانهای سمنان، تهران و قزوین و پس از آن جریانهای شمال سو (جریانهای جنوبی) از مسیر درهی منجیل به بخشهای شمالی البرز انتقال یافته است، درحالی که ذرمهای موجود در تراز ۵۰۰ و ۱۰۰ متری در این ایستگاهها، مشابه ایستگاه بندرترکمن در سواحل جنوب شرقی با سرعت بیشتر و از سمت پهنههای بیابانی ترکمنستان و توسط جریانهای شمالی به منطقه منتقل شدهاند. در واقع این دو ایستگاه متاثر از دو کانون شکل گیری ریزگردها، یکی روی دشت کویر ایران و دیگری صحرای قرهقوم ترکمنستان قرار دارند. شایان ذکر است در ایستگاه رشت، ریزگردها در ترازهای زیرین (زیر ۵۰۰ متر) از سمت شمال شرق و در بالاتر از این تراز از سمت جنوب رشته کوههای البرز، منتقل شده است.

ب. مسیریابی ریزگردها با استفاده از روش سنجش از دور

با توجه به کمبود دادهها و ایستگاههای زمینی و دریایی، پراکنش و توزیع نامناسب جغرافیایی ایستگاههای زمینی و هزینههای بالای داده برداری جو بالا، استفاده از روش سنجش از دور طی دهههای اخیر توسعه زیادی یافته و کاربست آن به ویژه در مقوله پایش پدیدههای جوی حائز اهمیت است (ناصرپور و همکاران، ۱۳۹۴). یکی از مهم ترین کاربردهای آن در مطالعات مربوط به آلودگی هوا، نحوهی گسترش و توزیع ریزگردها و همچنین شناسایی منابع تولید آن است. در این بخش از تصاویر باند مرئی سنجنده مودیس ماهواره ترآ و آکوا به منظور پایش چگونگی گسیل ریزگردها به منطقه استفاده شده است. در این تصاویر شارش غرب سوی ریزگردها از سوی بیابانهای واقع در شرق دریای خزر به سمت سواحل جنوبی خزر به خوبی مشهود است. علاوه بر این یکی از روشهای بررسی هواویزهها و آلایندههای جوی بهویژه ذرههای معلق

نوری (AOD) کمیتی بی بعد است و بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از هواویزهها در مسیر عبوری نور است (سازمان هواشناسی جهانی، ۱۹۹۵). به عبارت دیگر، AOD مجموع ضرایب خاموشی جو برای یک طول موج خاص در هر لایه از جو و معیاری از غلظت هواویزهها درون ستون هواست و تا حدود زیادی مشخص کننده ی کیفیت و سلامتی هواست. یکی از راههای تعیین عمق نوری هواویزهها، استفاده از روشهای سنجش از دور است. مقادیر بیشتر AOD مبین غلظت بیشتر ذرههای معلق شامل ذرههای درشتتر مانند ریزگردها (آلایندههای اولیه) و ذرههای ریزتر (آلایندههای ثانویه) درون ستون هوا است (Wang and Christopher, ۲۰۰۳). استفاده از بازتاب تابش سطحی دریافتی با حسگرهای ماهوارهای مانند سنجندهی مودیس یکی از متداول ترین روش های سنجش AOD است که با توجه به پراکندگی و توزیع نامناسب شبکه پایش دادههای زمینی و ایستگاههای اندازهگیری کیفیت هوا، میتواند به عنوان ابزاری کارآمد با یوشش یکپارچه و در دسترس به ویژه در مکانهایی که فقدان دادههای زمینی وجود دارد، مورد استفاده باشد و تطبیق آن با تصاویر مرئی، برای پایش چگونگی توزیع و گسیل ریزگردها موثر است. بدین منظور با استفاده از بانک دادهای، کمیتهای مختلف اندازهگیری شدهی حسگر مادیس ماهوارههای تراً و آکوا، تصاویر پهنهبندی مکانی میانگین روزانه عمقنوری هواویزهها (MOD·٤_L۲, MYD·٤_L۲) در باند ۵۵۰ نانومتر (دیپ بلو) و تفکیک مکانی ا المی روزهای مورد مطالعه، دریافت و مورد استفاده قرار گرفت (شکل $^{
m o}$). در این تصاویر $^{
m o}$ نیز پهنههای مکانی AOD، با مقادیر کمی بیش از ۰/۹ روی بخشهای بیابانی شرق خزر به عنوان کانون تولید و تجمع ریزگردها مشاهده می شود که با تصاویر باند مرئی که از طریق لینک زیر در دسترس کاربران است(شکل ۵) همخوانی مناسبی دارد.

شبیه سازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای ترکمنستان به کرانه های جنوبی ... ۱۵۳



شکل (۵). تصاویر باند مرئی سنجنده مودیس ماهواره تر آ، الف: روز ۱۹ سپتامبر ۲۰۱۴، ب: روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴ (^۵۰۰_۲۰۱۴). http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/subsets/?subset=Europe



شکل(۶). پهنه بندی روزانه مقادیر عمق نوری ذرات، سمت راست: روز ۱۹ سپتامبر ۲۰۱۴، ب: روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴



شکل(۷). تل ماسههای صحرای شرق ترکمنستان، به عنوان یکی از کانونهای تامین کنندهی گردوغبار ورودی به مناطق کرانهی جنوبی دریای خزر.

ج. تعیین کانون تولید ریز گردها با تحلیل خروجی مدل WRF_Chem نتایج حاصل از شبیه سازی عددی الگوی جوی با تفکیک ۳۰ کیلومتر، طی روز مذکور، توده ای از ریز گردها را روی پهنه های بیابانی کشور ترکمنستان در شرق دریای خزر و صحرای قرمقوم در جنوب قزاقستان نشان میدهد (شکل ۸ و ۹). تمرکز غلظت ریز گردها طی روزهای ۱۹ و ۲۰ سپتامبر، روی بخشهای شرقی سواحل خزر و جنوب غربی صحرای ترکمنستان است. شرایط گردش میان مقیاس نشان میدهد که در الگوی فشار سطح دریا، استقرار توده هوای پرفشار با واچرخند موجب تسلط جریانهای شمال دریای خزر و گردش ساعت گرد ناشی از تاوایی منفی این جنوبی آن می شود. از سوی دیگر واقع شدن منطقه ی کم فشار روی مرکز ایران و حضور مرکز پرفشار روی شمال خزر موجب تقویت شارشهای جوی جنوب سو در لایه های زیرین ورد سپهر می شود. الگوی میدان باد ۱۰ متری، مولفه منفی مداری و نصف النهاری میدان باد و افزایش

154

شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای تر کمنستان به کرانههای جنوبی ... ۱۵۵

سرعت وزش باد (افزایش اندازه بردار باد سطحی به ویژه روز ۲۰ سپتامبر) روی بخشهای بیابانی صحرای ترکمنستان و قرهقوم، با توجه به پوشش بیابانی مناطق یاد شده با انتقال تودهی ریزگردها از این مناطق به استانهای گیلان، مازندران و گلستان همراه است. این شرایط همخوانی مناسبی با الگوی حرکت و مسیر ذرههای گسیل شده که با استفاده از اجرای مدل HYSPLIT به دست آمده است، دارد.



شکل (۸). الگوی فشارسطحی(خطوط هم مقدار بر حسب هکتوپاسکال)، میدان باد ۱۰ متری و غلظت تجمع ریز گردها (پهنههای رنگی با واحد میکرو گرم برمترمکعب) روز ۱۹ سپتامبر ۲۰۱۴ با تفکیک ۳۰ کیلومتر.



128

شکل (۹). الگوی فشارسطحی(خطوط هم مقدار بر حسب هکتوپاسکال)، میدان باد ۱۰ متری و غلظت تجمع ریزگردها (پهنههای رنگی با واحد میکرو گرم برمترمکعب) روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴ با تفکیک ۳۰ کیلومتر.

واکاوی علت شکل گیری کانون تولید ریزگردها با استفاده از اجرای مدل شیمیایی WRF_Chem در مقیاس ۱۰ کیلومتر (شکل ۱۰) نشان می دهد که در بخشهای شرقی دریای خزر، چرخند حرارتی با فشار مرکزی ۱۰۱۷ هکتوپاسکال روی پهنهی گرم با دمای سطحی (دمای ۲ متری) بیش از ۳۵ درجه سلسیوس و در مقیاس محلی شکل می گیرد که طی ۱۲ ساعت بعد تقویت شده و فشارمرکزی آن تا ۱۰۱۵ هکتوپاسکال کاهش می یابد. گردش چرخندی این مرکز کم فشار با ماهیت همگرایی توده هوا در لایههای زیرین جو، موجب زایش چرخندی این مرکز کم فشار با ماهیت همگرایی توده هوا در لایههای زیرین جو، موجب زایش می محلی شکل می گیرد که طی ۱۲ ساعت بعد تقویت شده و فشارمرکزی آن تا ۱۰۱۵ هکتوپاسکال کاهش می یابد. گردش چرخندی این مرکز کم فشار با ماهیت همگرایی توده هوا در لایههای زیرین جو، موجب زایش می شود. چرمهای معلق بلند شده از سطح با شارشهای جنوبغرب سو به سواحل جنوبی خزر منتقل می شوند. الگوی باد ۱۰ الف)، حضور تاوایی نسبی مثبت را روی بخشهایی از پهنهی بیابانی صحرای می شود. الگوی الفای زیرین وردسپهر و انتقال (شکل ۱۱ الف)، حضور تاوایی نسبی مثبت را روی بخشهایی از پهنهی بیابانی صحرای می شکل ۱۱ الف)، حضور تاوایی نسبی مثبت را روی بخشهایی از پهنهی بیابانی صحرای می شود. الگوی باد ۱۰ متری موید این شرایط است. الگوی تاوایی نسبی تراز ۲۰۸۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۱ الف)، حضور تاوایی نسبی مثبت را روی بخشهایی از پهنهی بیابانی صحرای می شود. الگوی باد ۱۰ متری مود که با تقویت حرکتهای بالاسو در ترازهای زیرین وردسپهر و انتقال ریزگردهای موجود در نزدیکی سطح به درون ستون هوا می شود. علاوه بر این استقرار تاوایی منبی روی شمال دریای خزر موجب گردش می منهی ناشی از حضور واچرخند در وردسپهر زیرین، روی شمال دریای کنر موجب گردش

شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای تر کمنستان به کرانههای جنوبی ... ۱۵۷

شرق ایران، اطراف دریاچه آرال و خلیج قره بغاز می شود. تشدید گردش چرخندی این تراز که در مقیاس کوچک روی منطقه مستقر است موجب تقویت ناپایداری در مقیاس محلی و تداوم فرآیند انتقال ریزگردها از کانونهای تولید آن، روی پهنههای بیابانی منطقه می شود. الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۱ ب)، نشان می دهد که بخشهای شمال شرقی ایران و شرق دریای خزر متاثر از گسترش شمال سوی پشتهی ارتفاعی، پشتهی دمایی و تاوایی نسبی منفی قرار دارد. به عبارت دیگر گسترش قائم چرخند حرارتی شکل گرفته در منطقه، به وردسپهر زیرین و زیر تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال محدود شده است. این شرایط در نیمرخ قائم حرکت ذرههای مربوط به خروجی مدل HYSPLIT نیز، به وضوح دیده می شود.



شکل(۱۰). الگوی فشارسطحی (خطوط هم مقدار برحسب هکتوپاسکال)، میدان باد ۱۰ متری و میدان دما (پهنه های رنگی شده برحسب درجه سلسیوس) با تفکیک ۱۰ کیلومتر روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴.





۱۵۸

شکل(۱۱). الف: الگوی تاوایی نسبی (پهنه های رنگی شده) و جریان تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، ب: الگوی تاوایی نسبی (پهنه های رنگی شده)، دما(خطوط قرمز) و ژئوپتانسیل (خطوط هم مقدار مشکی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، روز ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴

15

10

0

- 10

1.0

-8 -3

شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده ازصحرای ترکمنستان به کرانههای جنوبی ...



شکل(۱۲). شمایی از سازوکار همدیدی منجر به گسیل ریزگرد به کرانهی جنوبی خزر در این سامانه (تهیه نگارندگان).

نتيجه گيرى

گسیل ریزگردها یکی از پدیدههای مخاطره آمیز آبوهوایی است که به ویژه در دهدی اخیر، در کرانههای جنوبی دریای خزر، تعدد وقوع آن افزایش یافته است. شناسایی چشمههای تولید ریزگردها و بررسی شرایط گسیل آن به منطقه، با توجه به تاثیرگذاری متقابل آن روی کمیتهای هواشناختی، کاهش شرایط کیفی هوای تنفسی و برهمکنش با سایر مولفههای آبهوایی به خصوص زیست کره، توجه بسیاری از پژوهشگران را در این زمینه به خود جلب کرده است. در این پژوهش، ضمن معرفی چشمه تولید ریزگرد و شناسایی شرایط شکل گیری آن در منطقه، سازوکار حاکم بر الگوی شارشهای جوی برای گسیل ریزگردها به کرانههای جنوبی دریای خزر طی روزهای ۱۹ و ۲۰ سپتامبر ۲۰۱۴ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده عبارتند از:

۱- ظرف یک دههی اخیر، مطالعههای فراوانی در زمینه کانون، نحوهی گسترش و نفوذ سامانههای منجر به وقوع پدیدهی ریزگردها به کشور ایران انجام شده است. طیف وسیع این مطالعهها متوجه سامانههایی بوده که از کانونهای موجود در مناطق همجوار در جنوب، جنوبغرب و غرب کشور وارد میشدند. تا کنون تحقیقی در زمینهی ریزگردهای فراگیر ورودی

109

به کشور ایران از بیابان های همجوار واقع در شمال شرقی کشور، شامل صحرای قرمقوم و مناطق بیابانی ترکمنستان (در کرانههای جنوب شرقی دریای خزر)، در داخل کشور انجام نشده است. مطالعه حاضر نشان دهنده ی شکل گیری کانونی جدید جهت گسیل ریز گردها به کشور است، که می تواند استان های واقع در کرانه ی جنوبی دریای خزر را متاثر کند. گرمایش جهانی و اثرات آن، می تواند منشاء ایجاد مخاطرات جدیدی در زمینه ی آب و هوایی برای استان های شمالی کشور به ویژه، مازندران و گیلان باشد. با توجه به اینکه سامانه ی جوی که منجر به رخداد این پدیده شده است، گسترش قائم چندانی درون جو نداشته و به ترازهای زیرین جو محدود بوده و همچنین با توجه به وجود رشته کوه البرز در کرانه های جنوبی خزر، امکان نفوذ این پدیده به دیگر مناطق شمال کشور در آینده بعید به نظر می رسد.

۲- اجرای مدل لاگرانژی پسگردHYSPLIT، برای شناسایی کانونهای تولید ریزگردها و مسیر گسیل آنها به منطقه نشان میدهد که سواحل جنوبی دریای خزر طی روزهای مذکور، متاثر از شارش ذرههای معلق از جانب پهنههای بیابانی کشورهای شمال شرق ایران مانند صحرای ترکمنستان، صحرای قرهقوم و مناطق خشک اطراف دریاچه آرال هستند که با جریانهای شمال شرقی به منطقه گسیل یافته است.

۳- ذرههای موجود در سه تراز ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری ناشی از اجرای مدل HYSPLIT، طی ۴۸ ساعت قبل، از لایههای مجاور سطح به منطقه گسیل یافته و نفوذ قائم چندانی به درون ستون هوا ندارند.

۴- الگوی تجمع غلظت ریز گردها طی روزهای مذکور، با استفاده از شبیه سازی سامانه به کمک اجرای مدل عددی WRF_Chem با تفکیک ۳۰ و ۱۰ کیلومتر تایید میکند که کانون شکل گیری ریز گردها، بخش های بیابانی ترکمنستان و صحرای قرمقوم در شرق دریای خزر است. منشأ خیزش ریز گردها، شکل گیری چرخند حرارتی (چرخند حرارتی ترکمنستان) در مقیاس محلی در منطقه و همگرایی سطحی ناشی از گردش چرخندی این مرکز کم فشار است که با توجه به پوشش بیابانی منطقه، موجب انتقال ریز گردها به درون ستون جو می شود.

۵- با توجه به پوشش بیبای شنست، موجب اعمال زیر ترکه به داروی شنوی جو می سود.
 ۵- الگوی دمای ۲ متری، شکل گیری این مرکز کم فشار حرارتی را منطبق با پهنه دمایی گرم با دمای سطحی بیش از ۳۵ درجه سلسیوس روی بخش های شرقی دریای خزر نشان می دهد.

۶- واقع شدن توده هوای پرفشار با مرکز ۱۰۳۰ هکتوپاسکال روی شمال دریای خزر و گردش واچرخندی ناشی از تاوایی منفی آن با شکل گیری جریانهای شمال شرقی از سوی بخشهای شرقی خزر به سمت سواحل جنوبی آن همراه است. الگوی میدان باد ۱۰ متری، مولفهی منفی

شبیه سازی ریزگردهای گسیل شده از صحرای تر کمنستان به کرانه های جنوبی ... ۱۶۱

مداری و نصفالنهاری میدان باد و افزایش سرعت وزش باد (افزایش اندازه بردار باد سطحی به ویژه روز ۲۰ سپتامبر) روی بخشهای بیابانی شرق خزر، منجر به گسیل ریزگردها به سمت پهنهی خزر جنوبی و کرانههای جنوبی آن میشود. این شرایط در تصاویر باند مرئی سنجنده مودیس ماهوارههای ترآ و آکوا مشهود است. ۷- توزیع فضاییAOD، نیز بیشینه مقادیر این کمیت که منطبق با منطقهی تجمع ریزگردها

در شرق دریای خزر هستند را تایید میکند.

منابع و ماخذ

 اسعدی اسکوئی، ابراهیم، نگاه، سمانه و فریدمجتهدی، نیما. (۱۳۹۲). سازو کار نفوذ غبار به کرانه جنوب غربی دریای خزر، دومین کنفرانس بین المللی زمین، آب، خاک و هوا، دانشگاه کرمان.

۲. مومن پور، فروغ (۱۳۹۲). مخاطره گردوغبار در نواحی جنوب غربی دریای کاسپین، دومین کنفرانس بین المللی مخاطرات محیطی تهران، دانشگاه خوارزمی، صص ۸.

۳. ذولفقاری، حسن و عابدزاده، حیدر(۱۳۸۴). تحلیل سینوپتیک سیستمهای گردو غبار در غرب ایران.مجله جغرافیا و توسعه، پائیز و زمستان، صص ۱۷۹–۱۸۸.

۴. طاووسی، تقی، خسروی، محمودو رییس پور، کوهزاد (۱۳۸۹). تحلیل همدیدی سامانه های گردوغباری در استان خوزستان، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۰،۱۳۸۹،۹۷–۱۱۸.

۵. غفاریان، پروین، اولاد، الهه و مبارک حسن، الهام(۱۳۹۳). پایش و تحلیل رخداد گرد و خاک ۹ تیرماه ۱۳۹۳ تهران. سومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا. دانشگاه شریف، تهران، ایران.
 ۶. فرحبخشی، ملودی، علیجانی، بهلول و فتاحی، ابراهیم(۱۳۹۴). تحلیل سینوپتیکی مخاطره
 گردوغبار (۱۰ تا ۱۲ مرداد ۱۳۹۲) ایران، دانش مخاطرات، دوره ۲، شماره ۱، ص ۲۰-۵.

۲. ناصرپور، سمیه، علیجانی، بهلول، ضیائیان، پرویز(۱۳۹۴). منشایابی توفان های گردوغبار در جنوب غرب ایران با استفاده از تصاویر ماهواره ای و نقشه های هوا، فصلنامه پژوهش های جغرافیای طبیعی، سال چهل و هفتم، شماره ۹۱ بهار ۱۳۹۴.

Binkowski, F. S., & Shankar, U. (1990). The regional particulate matter model 1. Model description and preliminary results. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ALL SERIES-, 1..., 17-191.

Chen, Y. S., Sheen, P. C., Chen, E. R., Liu, Y. K., Wu, T. N., & Yang, C. Y. $(\uparrow \cdot \cdot \rbrace)$. *Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan*. Environmental research, $\uparrow \circ (\uparrow)$, $\uparrow \circ \uparrow \circ \circ \circ$.

Chen, F., & Dudhia, J. $(\uparrow \cdot \cdot \uparrow)$. Coupling an advanced land surfacehydrology model with the Penn State-NCAR MM \circ modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review, $\uparrow\uparrow\uparrow(\xi)$, $\circ\uparrow\uparrow\circ\land\circ$.

Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B. N., Duncan, B. N., Martin, R. V., Logan, J. A., Higurashi, A., Nakajima, $T.,(7 \cdot \cdot 7)$. *Tropo-spheric aerosol optical thickness from the GOCART model and compar-isons with satellite and sun photometer measurements*. Journal of the At-mospheric Sciences $\circ 9$ (7), $\xi 7 1 - \xi A 7$.

Chin, M., Rood, R. B., Lin, S. J., Müller, J. F., & Thompson, A. M. $(\uparrow \cdot \cdot \cdot)$. Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model **GOCART:** Model description and global properties. Journal of Geophysical Research: Atmospheres $(\uparrow \uparrow \land \doteq \uparrow \cdot \uparrow \uparrow)$, $\uparrow \cdot \circ (D\uparrow \cdot)$, $\uparrow \notin \uparrow \lor \uparrow \land \uparrow$.

Draxler, R. R., & Rolph, G. D. (۲۰۱۲). *HYSPLIT (hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory) model access via NOAA ARL*. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Springer, MD.

Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G & Tarpley, J. D. $(\uparrow \cdot \cdot \urcorner)$. *Implementation of Noah land* surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres $(\uparrow \uparrow \land \downarrow \uparrow)$, $\uparrow \land (D\uparrow \uparrow)$.

Gillette, D. A., & Passi, R. (19hh). *Modeling dust emission caused by wind erosion*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres ($19h\xi$ - $7\cdot17$), 97(D11), $1\xi777-1\xi7\xi7$. شبیهسازی ریزگردهای گسیل شده ازصحرای ترکمنستان به کرانههای جنوبی ... ۱۶۳

Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O., & Lin, S. J. ($^{(\cdot,\cdot)}$). Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres ($1942-7\cdot17$), 177(D1Y), $7\cdot700-7\cdot7YT$.

Ginoux, P., Prospero, J. M., Torres, O., & Chin, M. $({}^{\tau} \cdot \cdot {}^{t})$. Longterm simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation. Environmental Modelling & Software, ${}^{1}{}^{(\tau)}$, ${}^{\tau}{}^{\tau}{}^{-1}{}^{\tau}{}^{\Lambda}$.

Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O., & Lin, S. J. ($^{(\cdot,\cdot)}$). Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres ($1942-7\cdot17$), 177(D1V), $7\cdot700-7\cdot7VT$.

Grell, G. A. (1997). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. Monthly Weather Review, 171(7), 772-777.

Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. ($^{\gamma}$.). *Fully coupled "online" chemistry within the WRF model*. Atmospheric Environment, $^{\gamma q}(^{\gamma \gamma})$, $^{\gamma q \circ \gamma - \gamma q \circ \gamma}$.

Hong, S. Y. $(\uparrow \cdot \uparrow \cdot)$. A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, $\uparrow \uparrow \uparrow (\uparrow \circ \uparrow)$, $\uparrow \in \Lambda \setminus \downarrow \in \uparrow \uparrow$.

Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (111). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly Weather Review, 114.

Lin, Y. L., Farley, R. D., & Orville, H. D. $(19\Lambda T)$. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. Journal of Climate and Applied Meteorology, 11(1), 1.10-1.97.

Iversen, J. D., & White, B. R. (1947). Saltation threshold on earth, mars and venus. Sedimentology, 79(1), 111-119.

Marticorena, B., & Bergametti, G. (1990). *Modelling the atmospheric dust cycle*. Journal of Geophysical Research, $1 \cdot \cdot (\Lambda)$, $17 \leq 10-17 \leq 7 \cdot$.

Obukhov, A. M. (1971). Turbulence in an atmosphere with a nonuniform temperature. Boundary-layer meteorology, 7(1), 779.

Rolph, G. D. $({}^{\tau} \cdot \cdot {}^{\tau})$. Real-time Environmental Applications and Display system (READY) Website (http://www.arl.noaa. Gov/ready/hysplit^{ϵ}. html). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring. Md.

Stunder, B. J. (1997). *NCEP model output—FNL archive data*. *NOAA-Air resources laboratory*. Document available at http://www. arl. noaa. gov/ss/transport/archives. html.

Wang, J., & Christopher, S. A. $({}^{\vee} \cdot {}^{\vee})$. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM ${}^{\vee}$. ${}^{\circ}$ mass: implications for air quality studies. Geophysical research letters, ${}^{\vee} \cdot ({}^{\vee})$.

Wild, O., Zhu, X., & Prather, M. J. $({}^{\intercal} \cdots {})$. Fast-J: Accurate simulation of in-and below-cloud photolysis in tropospheric chemical models. Journal of Atmospheric Chemistry, ${}^{\intercal}V({}^{\intercal})$, ${}^{\intercal}{}_{2}\circ {}^{\intercal}A{}^{\intercal}$.

World Meteorological Organization (WMO), 1990, Manual on Codes, Suppl. 7(VIII. 7...), WMO, Geneva, Switzerland.

http://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/NAQC^Y··^V/HTML_D ocs/compmeth.html.