

مطالعه عددی شکل‌گیری و تکامل یک توفان گردوغبار سنگین در منطقه خاورمیانه

حسین ملکوتی^۱ - استادیار هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

سمیرا باباحسینی - کارشناس ارشد هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۱۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۲۴

چکیده

فرآیندهای جوی خاص و برهمکنش آن‌ها با سطح زمین، عامل شکل‌گیری و تکامل یک توفان گردوغبار سنگین بشمار می‌آیند و در شناسایی مسیرهای انتقال توفان حائز اهمیت هستند. توزیع زمانی و مکانی غبار، در یک رخداد گردوغباری شدید در طول روزهای ۴ تا ۸ جولای ۲۰۰۹، با استفاده از شبیه‌سازی، به‌وسیله مدل WRF/Chem²، مشاهدات ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آنالیز وضعیت جوی شبیه‌سازی شده نشان داد، در صورتی بیشینه غلظت گردوغبار در تراز پایین اتفاق می‌افتد که در ناحیه منشأ غبار، گرادیان فشاری افقی قابل قبول با همرفت قوی در توده هوای مستقر در سامانه‌های چرخندی همراه باشد. در مورد انتخابی وضعیت جوی باعث ایجاد یک برش باد سطحی قوی روی مناطق انتشار غبار شناخته شده روی عراق شده بود. چرخند جبهه‌ای در مورد مطالعه شده، خاک را مجبور به فرسایش و باعث پراکنش و انتقال گردوغبار تا مسافت‌های بسیار حتی تا صدها کیلومتر کرده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌داد که ذرات گردوغبار با شعاع کمتر از یک میکرومتر و با غلظت قابل ملاحظه، از رشته‌کوه‌های زاگرس عبور کرده و در ۶ جولای ۲۰۰۹ ایران مرکزی و حتی کلان‌شهر تهران را تحت تأثیر قرار داده و دو روز بعد ایران را از جهت شمال شرق ترک کرده است. غلظت‌های شبیه‌سازی شده، اعتبار خوبی را از توزیع زمانی و مکانی غلظت گردوغبار با توجه به تصاویر مرئی ماهواره‌ای از سنجنده مودیس^۳ و گزارش‌های ساعتی دید افقی در شبکه ایستگاه‌های همدیدی نشان داده بود. با توجه به اعتبارسنجی‌های انجام شده، کارایی مدل برای شبیه‌سازی توزیع زمانی و مکانی توفان گردوغبار در طول منطقه تحت تأثیر در دوره شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گرفت. مدل عددی WRF/Chem می‌تواند جهت پیش‌بینی شکل‌گیری و تکامل این پدیده عملیاتی شود.

کلیدواژه‌ها: توفان گردوغبار، دید افقی، اعتبارسنجی، مدل WRF/Chem.

۱. مقدمه

بررسی وضعیت غبار در منطقه خاورمیانه به دلیل فرسایش قابل ملاحظه خاک در این منطقه حائز اهمیت است. اهمیت این موضوع از آن جهت است که بخش وسیعی از خاورمیانه طی چندین ماه از سال به طور مداوم تحت تأثیر غبار قرار دارد که اثرات مهمی بر اقلیم و محیط زیست منطقه برجای خواهد گذاشت. توفان‌های گردوغبار تابش خورشیدی و زمینی را نیز تحت تأثیر قرار داده و باعث تغییراتی در خواص فیزیکی و طیفی ابرها نیز می‌شوند (لائو^۱ و همکاران، ۲۰۰۲: ۴۰۲). پدیده غبار سبب بروز مشکلات جدی در این منطقه شده است که از این بین می‌توان به کاهش دید و محدود کردن بسیاری از فعالیت‌ها، اثرات آن بر سلامتی، مخاطرات محیطی به دلیل حمل سایر ذرات از قبیل باکتری‌ها، قارچ‌ها و آلاینده‌های شیمیایی (بنیون^۲ و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۱۰۵) و اثراتی بر چرخه بیوژئوشیمیایی اقیانوس (اوزر^۳ و همکاران، ۲۰۰۶: ۸۰) اشاره کرد. کاهش حاصلخیزی خاک در مناطق چشمه و آسیب به محصولات کشاورزی (فریریر^۴، ۱۹۸۱: ۲۵۳)، کاهش بازده تجهیزات خورشیدی، کاهش کیفیت هوا (کوتیل و فورمن^۵، ۲۰۰۳: ۴۱۹) و غیره نیز از اثرات منفی این توفان‌ها به‌شمار می‌آیند. بر این اساس توفان‌های شدید گردوغبار را می‌توان در ردیف یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در این منطقه طبقه‌بندی کرد.

در میان چشمه‌های فعال گردوغبار خاورمیانه، می‌توان از حوضه‌های آبرفتی دجله و فرات در عراق، مناطقی از سوریه در غرب، شبه‌جزیره عربستان در جنوب و جنوب غرب، نواحی از ترکمنستان در شمال و ایران (دشت‌های لوت و کویر و هامون جازموریان) در شرق نام برد (شکل ۱). با این اوصاف بیش از ۶۵ درصد خشکی‌های منطقه از پتانسیل بالایی در انتشار غبار برخوردار است (پروسپرو^۶ و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۱). شبیه‌سازی دقیق توفان گردوغبار می‌تواند ابزاری توانمند برای تشخیص مناطق چشمه، مطالعه نحوه شکل‌گیری، انتشار، انتقال و همچنین نشست و رسوب ذرات غبار باشد (رضازاده و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین این ابزار برای کاهش خطرات این پدیده طبیعی و کنترل و مدیریت آن نیز بسیار راهگشا خواهد بود. در این مطالعه به تجزیه و تحلیل جزئی یک رخداد توفان گردوغبار طولانی مدت در منطقه خاورمیانه در طول تابستان پرداخته شده است و وضعیت جوی در طول دوره مورد مطالعه در مرکز خاورمیانه مورد بحث قرار گرفته است. مدل منطقه‌ای WRF/Chem که توانمندی شبیه‌سازی شار، پخش و انتشار غبار را دارد، برای

1 Lau

2 Bennion

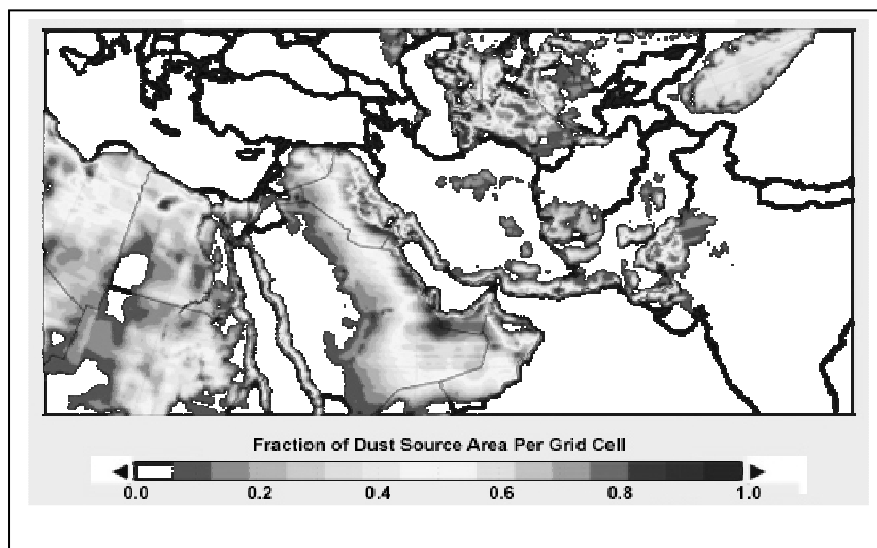
3 Ozer

4 Fryrear

5 Kutiel and Furman

6 Prospro

شبیه‌سازی توفان بکارگرفته شده و نتایج آن با تصاویر مرئی ماهواره و مقادیر دید افقی مشاهده‌شده در ایستگاه‌های همدیدی مسیر توفان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.



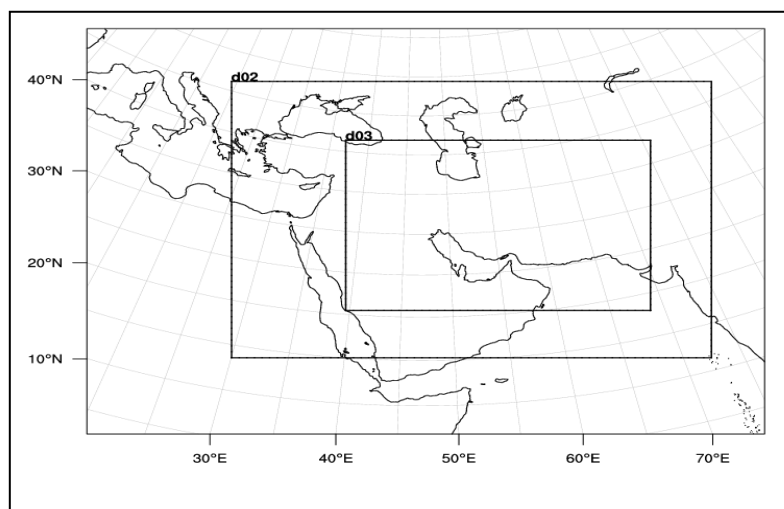
شکل ۱ موقعیت چشمه‌های فعال غبار در خاورمیانه^۱

۲. مواد و روش‌ها

در این مطالعه، یک توفان گردوغبار شدید که در اوایل جولای ۲۰۰۹ روی عراق شکل گرفته، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این توفان پس از شکل‌گیری، از روی ایران، ترکمنستان و همچنین شمال افغانستان عبور کرده است. زمانی که توفان به تهران رسیده است دید افقی به کمتر از ۱۰۰ متر و غلظت غبار ذرات معلق کمتر از $10 \mu\text{m}$ تا بالای $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ گزارش شده و در تمام مدتی که وضعیت غباری حاکم بوده، خدمات اداری در تعداد زیادی از شهرهای ایران تعطیل و بسیاری از فعالیت‌های انسانی به حالت تعلیق درآمد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق برای انجام شبیه‌سازی‌ها، اطلاعات باز تحلیل شده مدل جهانی مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی^۲ با تفکیک یک درجه طول و عرض جغرافیایی، به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی هواشناسی بوده و شرایط مرزی حین شبیه‌سازی هر ۶ ساعت بروز رسانی شده‌اند. در این شبیه‌سازی سه آشیانه تلسکوپی با تفکیک‌های افقی ۸۱، ۲۷ و ۹ کیلومتر (شکل ۲) و مش‌بندی مربعی، همراه با ۴۱ تراز ارتفاعی تا تراز ۵۰۰ پاسکال برای تفکیک عمودی پیکربندی شده است که داخلی‌ترین آشیانه با تفکیک افقی ۹ کیلومتر، منطقه تحت تأثیر توفان انتخابی را به‌طور کامل پوشش می‌دهد.

1 http://www.goes-r.gov/users/comet/mesoprim/dust/print.htm#page_9.0.0

2 The National Center for Environmental Prediction(NCEP) Final Analysis(FNL)



شکل ۲ آشیانه‌های طراحی شده برای شبیه‌سازی حاضر

جدول ۱ طرحواره‌های فیزیکی انتخاب شده برای شبیه‌سازی حاضر

فرآیندهای فیزیکی	طرحواره‌های فیزیکی مدل WRF/Chem
میکروفیزیک ابر	Lin [Lin et al., 1983]
تابش طول موج کوتاه	Goddard [Grell, 1993]
تابش طول موج بلند	RRTM [Wild et al., 2000]
مدل سطحی خاک	NOAH [Chen and Dudhia, 2001; Ek et al., 2003]
لایه مرزی	YSU [Hong et al., 2006; Hong, 2010]
گرد و غبار	GOCART [Grell et al., 2005]

توزیع مکانی کاربری اراضی و توپوگرافی سطح زمین برای آشیانه ۳ (داخلی‌ترین آشیانه) در شکل ۳ نمایش داده شده است. طرحواره‌های فیزیکی انتخاب شده جهت اجرای شبیه‌سازی توفان مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه و مرزی غلظت غبار در زمان شروع شبیه‌سازی (ساعت ۰۰ UTC بیست و نهم ژوئن ۲۰۰۹)، صفر در نظر گرفته شده تا تأثیرات شکل‌گیری و انتقال غبار بهتر رؤیت شود. در طرحواره ¹GOCART شار نشر غبار توسط سرعت باد سطحی و ویژگی‌های سطح از قبیل ترکیبات خاک، پوشش گیاهی و همچنین مقدار رطوبت خاک کنترل می‌شود (گرینی^۲ و همکاران، ۲۰۰۵: ۴). در این مطالعه، ذرات معلق گردوغبار خاک در ۵ دسته از اندازه‌های مختلف با متوسط شعاع به ترتیب ۰٫۵، ۱٫۲، ۲٫۴، ۴٫۵ و ۸

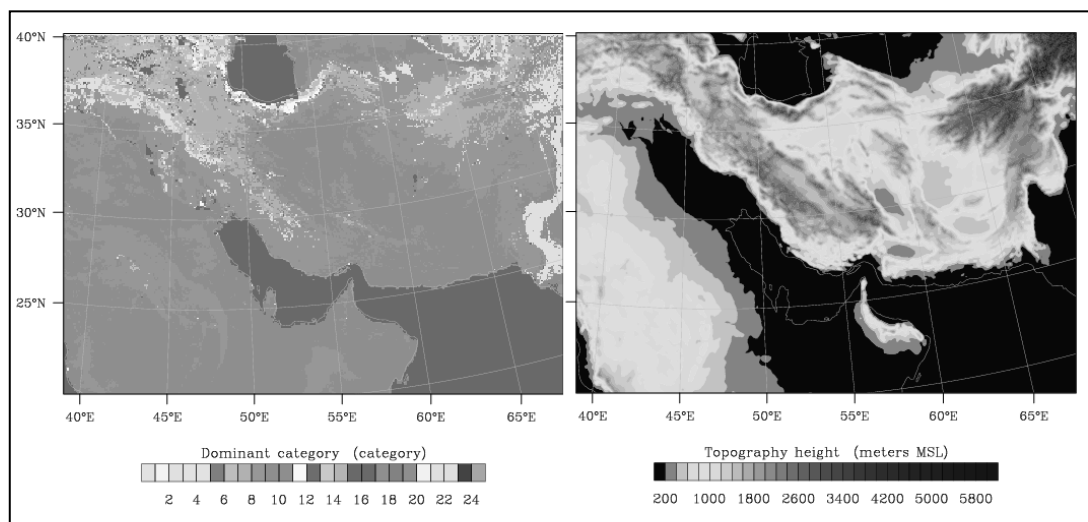
1 The Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport(GOCART)

2 Grini

میکرومتر تقسیم‌بندی شده‌اند. شار نشر غبار در هر دسته (F_p) اندازه ثابت است که با توجه به میزان کسر ذرات خاک، عوامل فرسایش، سرعت باد سطحی و سرعت آستانه فرسایش بادی محاسبه می‌شود. معادله:

$$F_p = \begin{cases} C\alpha_p E_r V_s^2 (V_s - V_t) & \text{if } V_s \geq V_t \\ 0 & \text{if } V_s < V_t \end{cases} \quad \text{EMBED Equation.3} \quad (1)$$

که C ضریب تناسب^۱ ($C = 0.8 \text{ ugs}^2\text{m}^{-5}$) و α_p کسر ذرات خاک^۲ در اندازه دسته E_r فرسایش خاک احتمالی^۳، V_s سرعت باد سطحی^۴ در ۱۰ متری و V_t سرعت آستانه فرسایش بادی^۵ است. سرعت آستانه باد به‌عنوان تابعی از اندازه و چگالی ذرات و رطوبت خاک مشخص می‌شود (گینوکس^۶ و همکاران، ۲۰۰۱:۲۷۱). پس از آن‌که ذرات تحت شرایط مساعد هواشناسی (روزهای خشک همراه با وزش باد) منتشر شدند، انتقال داده شده و در نهایت تحت تأثیر جاذبه روی سطح نشست می‌کنند. توصیف جزئیات این پارامترسازی توسط گینوکس و همکارانش ارائه شده است.



شکل ۳ توزیع کاربری اراضی و توپوگرافی سطح زمین برای آشیانه ۳ (داخلی‌ترین آشیانه)

همان‌طور که قبلاً بیان گردید، مدل WRF/Chem جهت شبیه‌سازی و تحلیل شرایط جوی، پارامترسازی فرسایش و نشر سطحی غبار، پخش و انتقال ذرات معلق خاکی استفاده گردیده است. از اطلاعات

-
- 1 Dimensional factor
 - 2 The soil particle fraction
 - 3 The probability soil erosion factor
 - 4 Surface wind velocity at 10 meter
 - 5 The threshold velocity of wind erosion
 - 6 Ginoux

ایستگاه‌های سینوپتیکی مانند دید افقی جهت ارزیابی زمان ورود و خروج غبار در منطقه و از رفتار فشار و دمای ایستگاهی جهت تشخیص اینکه زمان دقیق عبور جبهه سرد چه موقع بوده و برای پاسخ به اینکه آیا غبار با توده هوای پشت جبهه همراهی می‌کند، یا به عبارتی به‌منظور تشخیص نوع توفان (پیش یا پس جبهه‌ای، همرفتی و ...) استفاده گردیده است.

۳. بحث و نتایج

در ابتدا به تحلیل شرایط همدیدی ترازهای پایین، میانی و بالای جوی قبل و حین توفان غبار انتخابی می‌پردازیم تا شرایط شکل‌گیری و تکامل این توفان روشن گردد. سپس توزیع مکانی و زمانی جمعی غبار شبیه‌سازی شده در تمام دسته‌های اندازه‌ای را به‌منظور مقایسه با تصاویر مرئی و رفتار زمانی دید افقی را به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل را ارائه می‌دهیم و در نهایت توزیع مکانی و زمانی غبار شبیه‌سازی شده در دسته‌های اندازه‌ای ریز، متوسط و درشت (به ترتیب با اندازه شعاع مؤثر ۰,۵، ۲,۴ و ۸ میکرون) را معرفی می‌کنیم.

۳,۱. پیشینه همدیدی

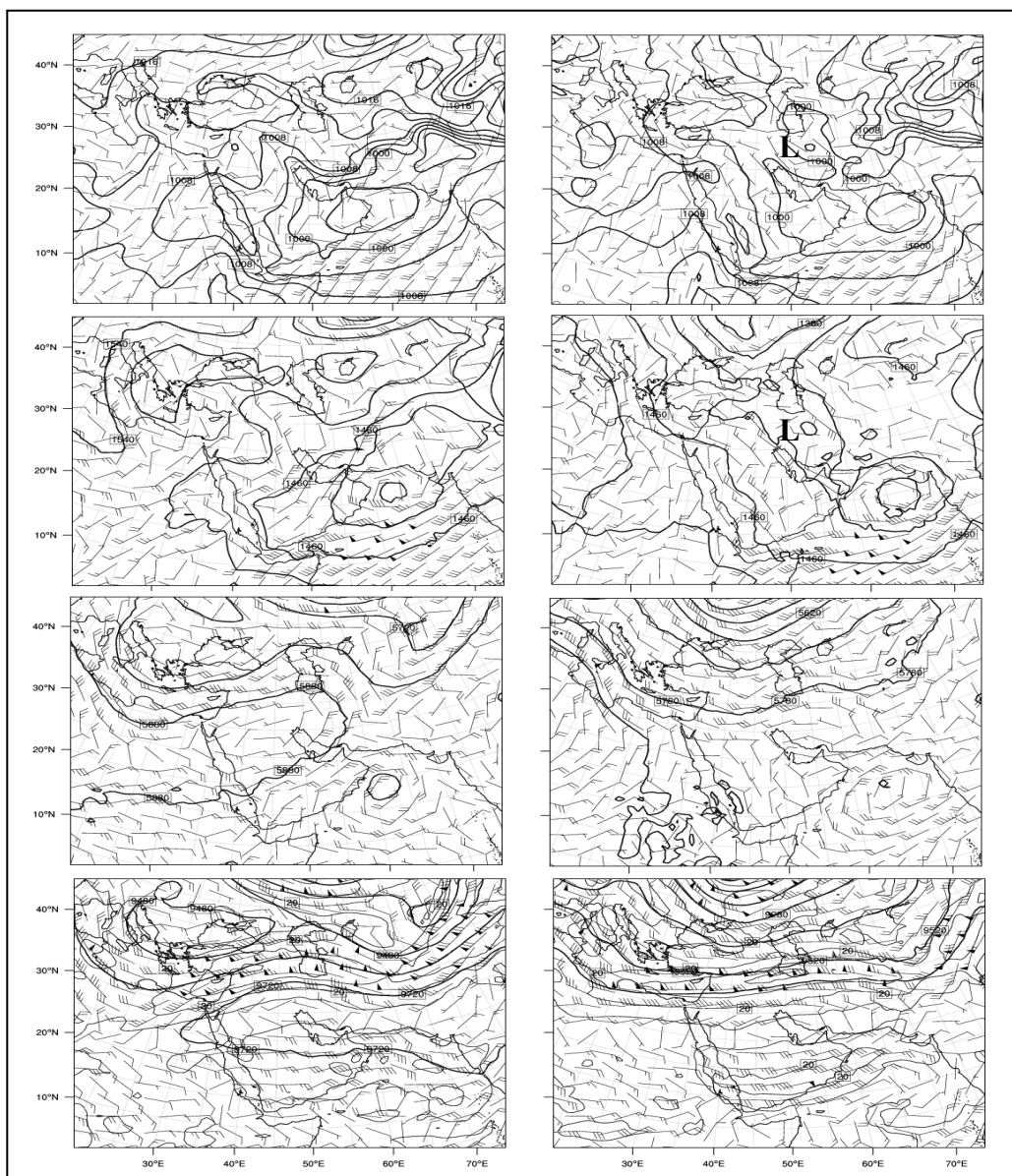
از اواخر ماه می تا اوایل ماه جولای، یکی از پدیده‌های متناوب هواشناسی در منطقه مرکزی خاورمیانه، باد شمال^۱ تابستانی است که به‌طور غالب حدود ۴۰ روز می‌وزد که از اهمیت زیادی در ارتقای شار غبار سطحی برخوردار است (ممبری^۲، ۱۹۸۳: ۱۸). برداشت گردوغبار توسط باد شمال از مناطقی در عراق، ایران و همچنین مناطق مجاور به‌طور معمول به استقرار یک کم‌فشار حرارتی روی ایران وابسته است که باعث ایجاد گرادیان فشاری قوی با پرفشار نیمه دائم در منطقه عربستان سعودی همراه می‌باشد. ارتقای منطقه همگرایی بین این دو سامانه فشاری، بادهای متلاطم با سرعت بسیار زیاد ایجاد می‌کند که باعث نشر و انتقال گردوغبار محلی همزمان با یک همرفت شدید روی دشت آبرفتی دجله و فرات می‌شود که یکی از دلایل همرفتی بودن دمای بالای سطح زمین در خلال روز در این منطقه است (ممبری، ۱۹۸۳: ۱۹). شرایط همدیدی شبیه‌سازی شده برای ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال و تراز سطح دریا در ساعت ۰۰ UTC، روز ۳۰م ماه ژوئن (زمان شکل‌گیری اولیه توفان) و ساعت ۰۰ UTC، روز ۱۶م ماه جولای (زمان حضور توفان روی ایران مرکزی) در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که از نقشه‌های همدیدی دریافت می‌شود، در روز ۱۶م ماه جولای، مکانیزم تشکیل باد شمال تابستانی روی حوضه‌های دجله و فرات برقرار شده و یک چرخند جبهه‌ای^۳ روی منطقه مدیترانه همراه با واداشتهای تراز بالای قابل توجه (ناوه تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال) در

1 Shamal Wind

2 Membroy

3 Frontal Cyclone

حال شکل‌گیری است. پس از آن در طی تشدید این چرخند جبهه‌ای و ورود آن به عراق، شکل‌گیری گردوغبار و صعود آن روی این چشمه، شتاب گرفته است. فرسایش نهایی توسط این سیستم، یک غبار پس-جبهه‌ای^۱ سنگین را شکل داده که در طول مسیر حرکت، با عبور از محدوده کوه‌های زاگرس، این گردوغبار سنگین را به ناحیه‌ای وسیع منتقل کرده است.



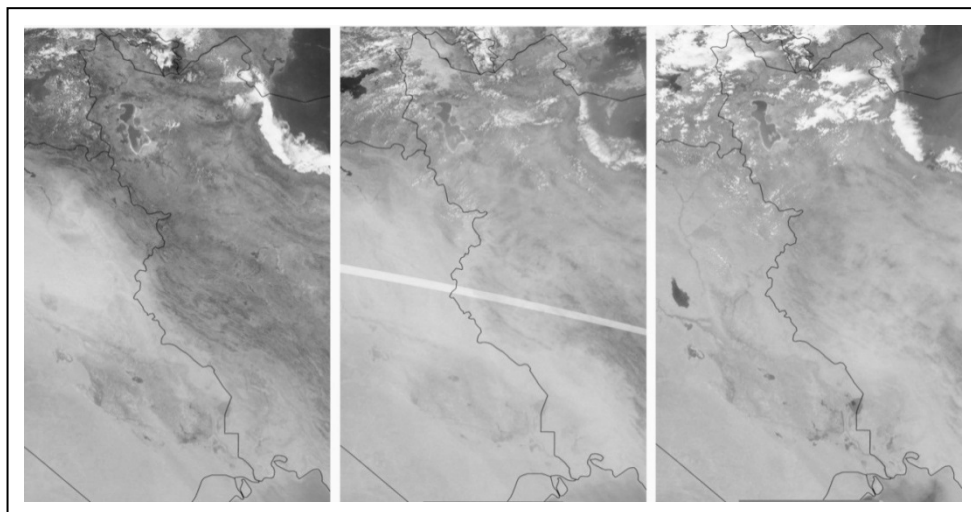
شکل ۴ نقشه همدیدی شبیه‌سازی شده ساعت ۰۰ UTC، روز ۳۰م جوئن (چپ) و ۰۰ UTC، روز ۶م جولای ۲۰۰۹ (راست) (از بالا به پایین به ترتیب مربوط به ترازهای سطح دریا، ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال هستند)

۳،۲. توزیع غبار خاک در روند وقوع توفان گردوغبار

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، قابل تشخیص است که در زمان شکل‌گیری توفان (۴م جولای)، شمال عراق از حضور یک گردوغبار بالا به دلیل واداشت باد شمال و چرخند جبهه‌ای، فرسایش شدید خاک را تجربه کرده است. پس از ورود جبهه سرد و برش باد سطحی به سمت جنوب عراق، یک نشر عظیم غبار روی حوضه‌های دجله و فرات رخ داده است.

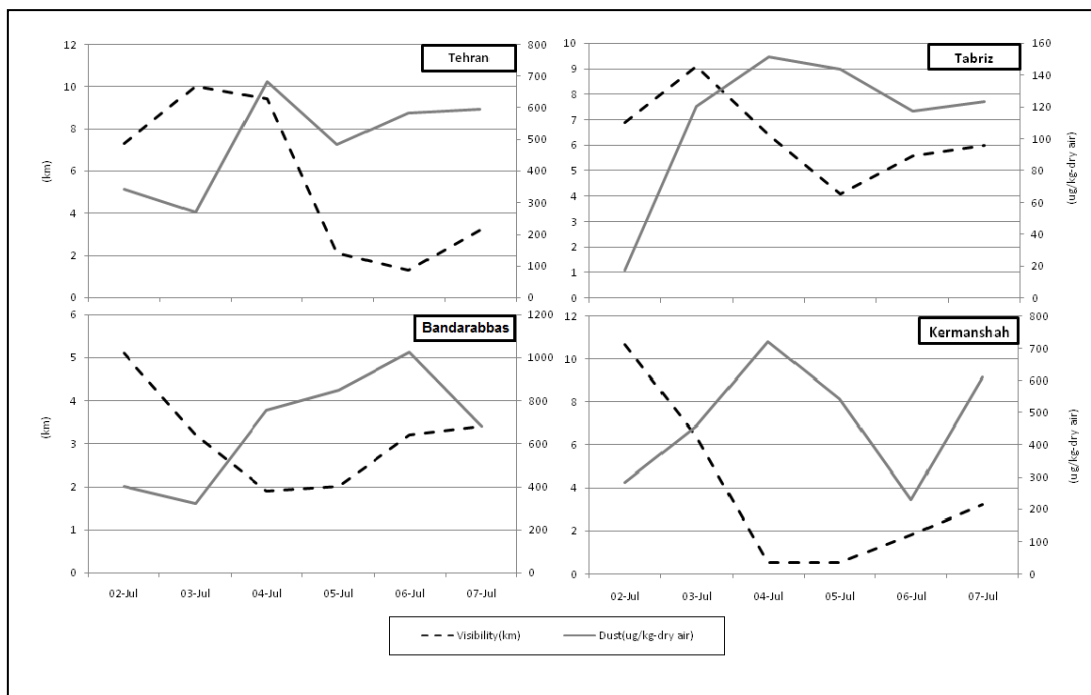
در ۵م جولای، به علت عبور و واداشت‌های چرخند جبهه‌ای روی محدوده کوه‌های زاگرس، امکان انتقال و صعود حجم زیادی از غبار از کوه‌ها فراهم شده است. در ۶م جولای، به دلیل حضور چرخند جبهه‌ای روی مرکز ایران، توده غبار به‌طور عمیقی به این منطقه ورود کرده و ناحیه وسیعی را پوشش داده است؛ به عبارت دیگر بعد از عبور چرخند جبهه‌ای و انتقال توده غبار، عراق غلظت بسیار کمتری از غبار را در این زمان تجربه کرده است که در شکل ملاحظه می‌شود. در شکل ۶ تأثیر افزایش غلظت غبار بر کاهش دید افقی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل می‌توان از روند دید افقی و غلظت روزانه غبار دریافت کرد، چهارم و پنجم جولای کرمانشاه، بندرعباس و تبریز درگیر غبار بوده و سپس تهران در پنجم و ششم جولای آن را تجربه کرده است.

از مقایسه شکل ۷ که رفتار میانگین روزانه فشار میانگین تراز دریا و دمای دو متری را نشان می‌دهد با شکل ۶، قابل استنتاج می‌باشد که در بازه انتخابی یک کم فشار جبهه‌ای منطقه را تحت تأثیر قرار داده و کمینه فشار زمان عبور جبهه سرد را نشان می‌دهد که رفتار کاهشی دما و دید افقی بعد از این کمینه فشار، مؤید عبور یک توفان غبار پس جبهه‌ای از منطقه است.

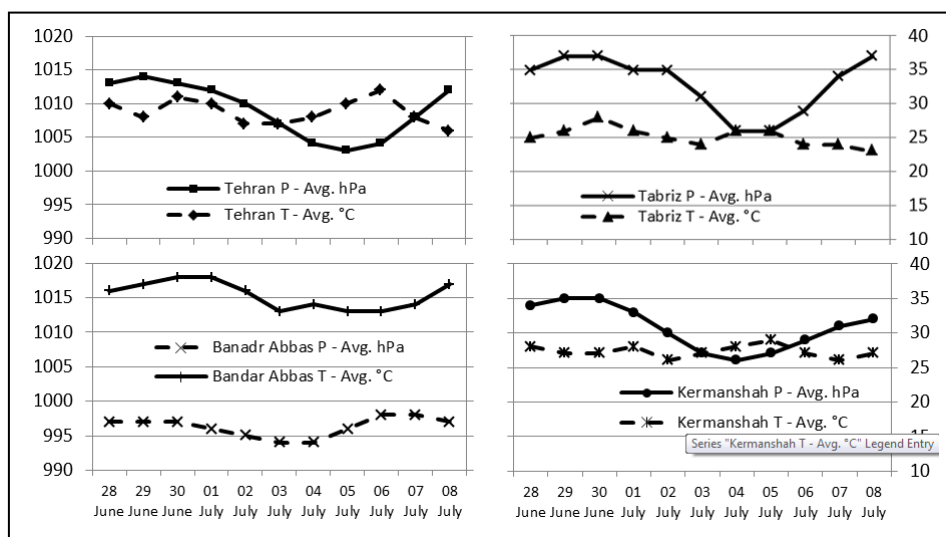


شکل ۵ تصاویر مرئی سنجنده مودیس (VIS, 0.65 μm) از توزیع غبار در نیمروز ۴، ۵ و ۶ جولای (چپ به راست).
توزیع گردوغبار تفسیر شده توسط تصویر مرئی و سری زمانی دید افقی به‌طور کامل با توزیع مکانی غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده انطباق دارد (شکل ۸). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، الگوی فشاری باد شمال هنوز

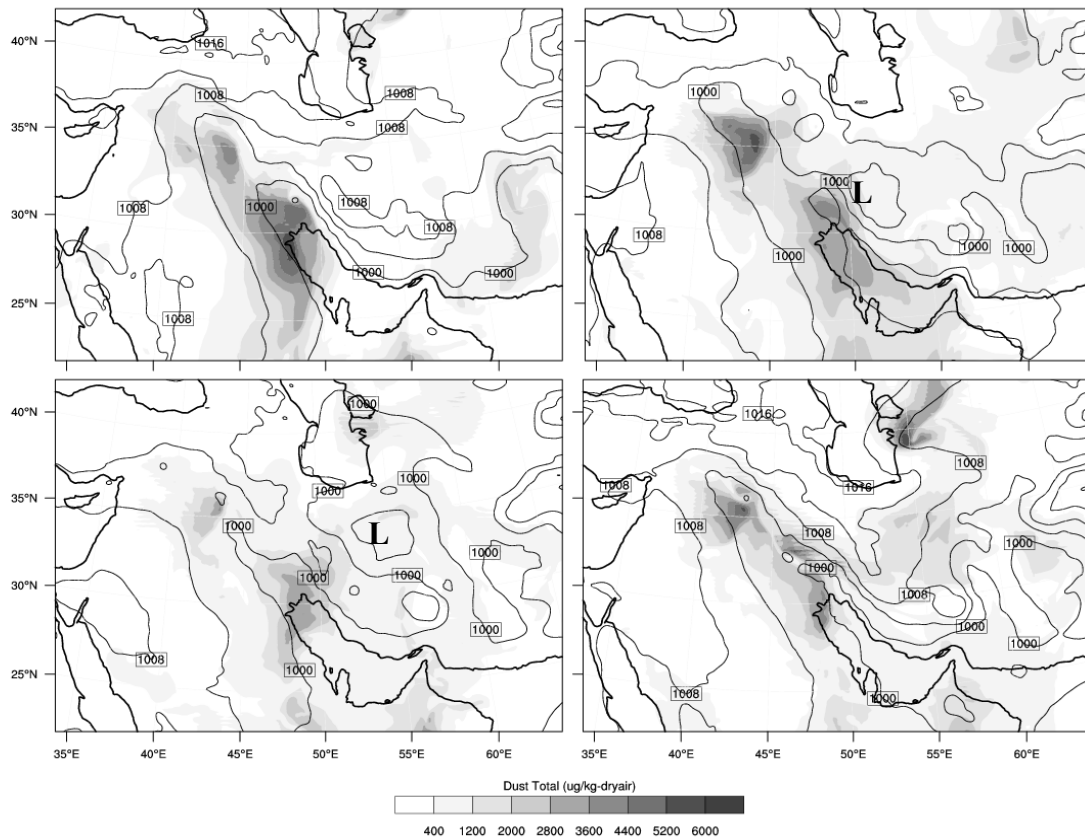
در روز ۲ جولای فعال است و همین مسئله باعث نشر قابل توجه شده و در روز ۴ جولای، الگوی فشاری باد شمال به‌وسیله واداشت چرخند جبهه‌ای تغییر شکل یافته و این مسئله باعث نشر حجم عظیمی از غبار روی شمال عراق شده است و در ۶ جولای چرخند جبهه‌ای در مرکز ایران همراه با انتقال قابل‌ملاحظه غبار قرار گرفته است. در ۸ جولای الگوی فشاری باد شمال دوباره فعال شده و توده غبار ایران مرکزی را ترک کرده است.



شکل ۶ رفتار غلظت غبار-خطوط پر (ug/kg-dry air) و دید افقی خط چین (km) در چهار ایستگاه انتخابی.



شکل ۷ رفتار فشار متوسط روزانه تراز میانگین دریا (hPa) و دمای دو متری (°C) در چهار ایستگاه انتخابی.



شکل ۸ توزیع مکانی گردوغبار شبیه‌سازی شده ($\mu\text{g}/\text{kg-dry air}$) در تراز ۱۰ متری از سطح برای ساعت ۰۰ UTC، روز ۲ جولای (بالا-چپ)، ۴ جولای (بالا-راست)، ۶ جولای (پایین-چپ) و ۸ جولای (پایین-راست) ۲۰۰۹.

۳.۳. توزیع اندازه ذرات در طول رخداد گردوغبار

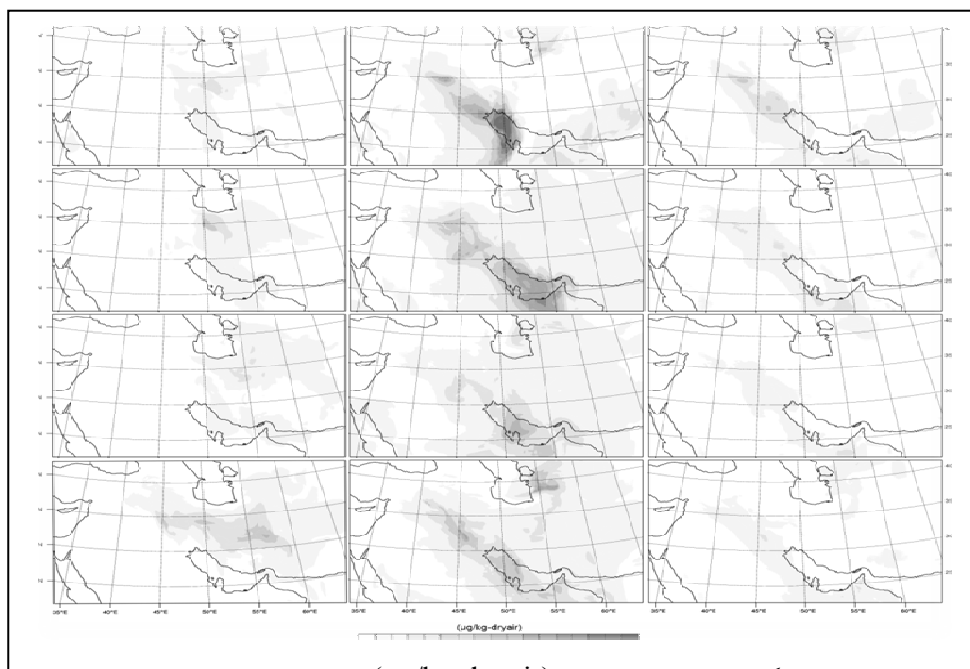
همان‌طور که قبلاً بیان شد، سرعت آستانه برای فرسایش غبار، تابعی از اندازه ذرات و همچنین رسوب خشک آن‌ها و سرعت نشست جاذبه‌ای^۱ نیز به‌اندازه ذرات بستگی دارد (جدول ۲). شکل ۹، توزیع مکانی غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده ($\mu\text{g}/\text{kg-dry air}$) برای اولین، سومین و پنجمین دسته از ذرات (به ترتیب با شعاع مؤثر ۰/۵، ۲/۴ و ۸ میکرومتر) در ساعت ۰۰ UTC، روز ۲، ۴، ۶ و ۸ جولای ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از توزیع‌های ارائه شده می‌توان برداشت کرد، بیشترین شار نشر غبار و تراکم نزدیک سطح مربوط به سومین دسته‌بندی ذرات با شعاع مؤثر ۲/۴ میکرومتر می‌باشد. از طرفی، نخستین دسته با شعاع مؤثر ۰/۵ میکرومتر بیشترین پویایی را دارند و با غلظت قابل ملاحظه‌ای تا مسافت‌های بسیار دور از چشمه اولیه خود منتقل شده‌اند. این اندازه از ذرات، بزرگ‌ترین کسر غلظت غبار را روی ایران مرکزی داشته‌اند. همچنین شبیه‌سازی‌ها توزیع ماسه (پنجمین دسته با شعاع مؤثر ۸ میکرومتر) را با غلظت قابل توجهی فقط در روی مناطق چشمه به‌ویژه در طول شکل‌گیری توفان در ۲ جولای را نشان داده است.

1 Gravitational settled velocity

جدول ۲ اطلاعات مربوط به نشست جاذبه‌ای ذرات مختلف غبار بر روی سطح (های بیان، ۲۰۱۱:۲۲:۴).

دسته‌ی ذرات	شعاع مؤثر $R(\mu m)$	سرعت نشست جاذبه‌ای $V_d (cm/s)$	زمان مورد نیاز (روز) برای نشست روی سطح، از ارتفاع یک کیلومتری
۱	0/5	0/0265	29/80
۲	1/4	0/1509	7/66
۳	2/4	0/4436	2/60
۴	4/5	1/5597	0/74
۵	8	4/9297	0/23

همان‌طور که از توزیع‌های ارائه شده می‌توان برداشت کرد، بیشترین شار نشر غبار و تراکم نزدیک سطح مربوط به سومین دسته‌بندی اندازه ذرات با شعاع مؤثر ۲,۴ میکرومتر می‌باشد. از طرفی، نخستین دسته با شعاع مؤثر ۰,۵ میکرومتر بیشترین پویایی را دارند و با غلظت قابل ملاحظه‌ای تا مسافت‌های بسیار دور از چشمه اولیه خود منتقل شده‌اند. این اندازه از ذرات، بزرگ‌ترین کسر غلظت غبار را روی ایران مرکزی داشته‌اند. همچنین شبیه‌سازی‌ها توزیع ماسه (پنجمین دسته با شعاع مؤثر ۸ میکرومتر) را با غلظت قابل توجهی فقط در روی مناطق چشمه به‌ویژه در طول شکل‌گیری توفان در ۲ جولای را نشان داده است.



شکل ۸ توزیع مکانی غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده ($\mu g/kg\text{-dry air}$) برای اولین، دومین و پنجمین دسته از ذرات (به ترتیب با اندازه شعاع مؤثر ۰,۵، ۲,۴ و ۸ میکرون) در ساعت ۰۰ UTC، روز ۲، ۴، ۶ و ۸ جولای ۲۰۰۹ (از بالا به پایین)

۴. نتیجه گیری

از این مطالعه می توان نتیجه گرفت که در اواخر تابستان، با توجه به فعالیت رژیم باد شمال روی عراق، رخداد و عبور یک چرخند جبهه ای عمیق خشک می تواند توفان گردوغبار بسیار وسیعی را در خاورمیانه تولید کند. در این مطالعه به روشنی مشخص شد که استفاده از مدل WRF/Chem همراه با مدل فیزیکی^۱ GOCART، تکنیک مناسبی برای شبیه سازی توفان گردوغبار است. به این معنی که ساختار این مدل به صورت صحیح توانایی شبیه سازی توزیع زمانی و مکانی غبار را در طول وضعیت های بحرانی گردوغباری شدید را دارد. به وضوح مشخص شد که چشمه های گردوغبار در عراق، به ویژه حوضه های آبرفتی دجله و فرات پتانسیل بالایی در فرسایش شدید خاک در زمان فعالیت باد شمال تابستانی و فعالیت شدید چرخند جبهه ای در طول شرایط بسیار گرم و خشک دارد و ذرات سیلت و رس کوچک تر از ۲ میکرومتر می توانند به هزاران کیلومتر دورتر از چشمه های خود مهاجرت کنند.

پیشنهاد می شود دیگر پارامترسازی های فیزیکی برای نشر غبار در مطالعه میزان حساسیت شبیه سازی و پیش بینی توفان گردوغبار آزمون شود و همچنین داده های هواشناسی و شیمیایی تکنیک های مشابه با به کارگیری مشاهدات ماهواره ای و ایستگاهی جهت شبیه سازی به کار گرفته شود.

کتابنامه

- رضازاده، م؛ ایران نژاد، پ؛ شائو، ی؛ ۱۳۹۲. شبیه سازی گسیل غبار با مدل پیش بینی عددی وضع هوا WRF-Chem و با استفاده از داده های جدید سطح در منطقه خاورمیانه. مجله فیزیک زمین و فضا. شماره ۱. صفحه ۱۹۱-۲۱۲.
- Bennion, P., Hubbard, R., O'Hara, S., Wiggs, G., Wegerdt, J., Lewis, S., Small, I., van der Meer, J., Upshur, R., 2007. The impact of airborne dust on respiratory health in children living in the Aral Sea region. *International Journal of Epidemiology* 36, 1103-1110.
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., Tarpley, J. D., 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research* 108, 1-12.
- Fryrear, D.W., 1981. Long-term effect of erosion and cropping on soil productivity. *Geological Society of America* 186, 253-259.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S. J., 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research* 106, 20555-20273.
- Grell, G., 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review* 121, 764-787.

1 The Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport(GOCART)

- Grini, A., Myhre, G., Zender, C. S., Isaksen I. S. A., 2005. Model simulations of dust sources and transport in the global troposphere. *Journal of Geophysical Research* 110, 1-14.
- Bian, H., Tie, X., Cao, J., Ying, Z., Han, S., Xue, Y., 2011. Analysis of a severe Dust Storm Event over china: Application of the WRF_Dust. *Aerosol Air Quality Research* 11, 419-428.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* 134, 2318-2341.
- 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, 1481-1496.
- Kutiél, H., Furman, H., 2003. Dust storms in the Middle East: Sources of origin and their temporal characteristics. *Indoor and Built Environment* 12, 419-426.
- Lau, K. M., Kim, M. K., Sud, Y. C., Walker, G. K., 2009. A GCM study of the response of the atmospheric water cycle of West Africa and the Atlantic to Saharan dust radiative forcing. *Annals of Geophysics* 27, 4023-4037.
- Lin, Y. L., Farley, R. D., Orville, H. D., 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 22, 1065-1092.
- Membery, D. A., 1983. Low-level wind profiles during the Gulf Shamal. *Weather* 38, 18-24.
- Obukhov, A. M., 1971. Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Boundary Layer Meteorology* 2, 7-29.
- Ozer, P., Laghdaf, M. B. O. M., Lemine, S. O. M., Gassani, J., 2006. Estimation of air quality degradation due to Saharan dust at Nouakchott, Mauritania, from horizontal visibility data. *Water Air Soil Pollution* 178, 79-87.
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., Shao, Y., 2013. Dust emission simulation with the WRF-Chem model using new surface data in the Middle East region. *Journal of the Earth and Space Physics* 1, 191-212.
- 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. *Reviews of Geophysics* 40, 1-31.
- Wild, O., Zhu, X., Prather, M. J., 2000. Fast-J: Accurate simulation of in and below cloud photolysis in tropospheric chemical models. *Journal of Atmospheric Chemistry* 37, 245-282.