

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و دوم، زمستان ۱۳۹۸

صص ۱۱۹-۱۳۴

DOI: <https://doi.org/10.22067/geo.v8i4.82034>

مقاله پژوهشی

## نقش رشته کوه زاگرس بر ترابرد گردوخاک‌های عراق به غرب ایران با استفاده از مدل WRF/Chem (مطالعه موردی)

جلیل صحرایی - استادیار گروه فیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

الهام مبارک حسن - استادیار گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

ناهید محمدی<sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری مخاطرات آب و هوایی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۸

### چکیده

رشته کوه زاگرس به واسطه قرار داشتن در مجاورت نواحی خشک و نیمه خشک کشورهای عراق، سوریه و عربستان همواره در معرض طوفان‌های گردوغبار قرار دارد. هدف از این تحقیق بررسی نحوه رفتار طوفان گردوغبار در رویارویی با رشته کوه زاگرس در غرب کشور است. بدین منظور دو رویداد طوفان گردوغبار رخ داده در ۱۲ الی ۱۴ آوریل سال ۲۰۱۱ (۲۳ الی ۲۵ فروردین سال ۱۳۹۰) و ۱۶ الی ۱۸ ژوئن سال ۲۰۱۶ (۲۷ الی ۲۹ خرداد سال ۱۳۹۵) با بررسی داده‌های دید افقی ایستگاه‌های همدیدی غرب کشور انتخاب شده است. مدل WRF/Chem جهت شبیه‌سازی طوفان گردوغبار برای دو رویداد طوفان یاد شده به کار گرفته شده است. جهت اطمینان از نتایج مدل، غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های دید افقی دریافت شده از سازمان هواشناسی کشور مقایسه شده است که در مجموع نتایج مقایسه نشان می‌دهد که گردوغبار شبیه‌سازی شده با داده‌های دید افقی همخوانی دارد. به منظور بررسی تأثیر رشته کوه بر طوفان گردوغبار، مدل در سه حالت مرجع، کاهش ناهمواری‌های رشته کوه زاگرس به هزار متر و حذف ناهمواری‌ها اجرا شده و نتایج هر سه حالت با هم مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که رشته کوه زاگرس مانع پیشروی بیشتر گردوغبار به نواحی مرکزی کشور شده است اما گردوغبار در نواحی پست مجاور و دامنه‌های غربی رشته کوه زاگرس تجمع دارد. حذف ناهمواری‌ها موجب انتشار گردوغبار بیشتری به سمت شرق رشته کوه شده و از غلظت گردوغبار در نواحی رو به باد کاسته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** رشته کوه زاگرس، گردوغبار، مدل WRF/Chem، دید افقی.

## ۱- مقدمه

ذرات خاک به وسیله وزش باد از نواحی خشک و کم‌آب وارد جو شده و طوفان گردوغبار ایجاد می‌کند. کشور عراق با داشتن ذرات ریز ماسه و خاک رس بستری مناسب برای بلند شدن گردوغبار دارد. وزش بادهای غربی و جنوب‌غربی در این منطقه که بادهای غالب است، مقادیر عظیمی از این ذرات ریز را وارد جو می‌کند که تا فواصل هزاران کیلومتر منتقل می‌شوند. بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان منشأ خیزش گردوغبار عظیم و انتقال آن به نواحی مجاور خود از جمله ایران است. رشته‌کوه زاگرس اولین مانع در مقابل جریاناتی است که گردوغبار را از سمت غرب و جنوب‌غرب وارد کشور می‌کند. این شرایط به‌طور سالیانه باعث شکل‌گیری رویدادهای گردوغبار متعدد در این منطقه شده و مشکلات فراوانی برای ساکنین شهرهای واقع در غرب این رشته‌کوه ایجاد می‌کند. به‌خطر افتادن سلامتی مردم و به‌ویژه بیماران قلبی و ریوی، کاهش کیفیت هوا، کاهش دید افقی، کاهش محصولات کشاورزی، اختلال در تردد هوایی و حوادث رانندگی از جمله مهم‌ترین و بارزترین مشکلات حاصل از این پدیده است.

در طوفان‌های گردوغبار که هزاران کیلومتر را طی می‌کنند سیستم‌های جوی میان‌مقیاس و سیستم‌هایی در مقیاس همدیدنی نقش اصلی را دارند. طوفان گردوغبار می‌تواند تا ارتفاع چند کیلومتری (یک تا شش کیلومتری) و با توجه به قدرت باد تا هزاران کیلومتر به صورت افقی حرکت کند. مسلماً این طوفان‌ها با موانع طبیعی فیزیکی متوقف نخواهند شد، اما ناهمواری‌های سطح از جمله کوه‌های با ارتفاع چندین هزار متر بر طوفان‌های گردوغبار تأثیرگذار است. با وجود بارندگی خوب و پوشش گیاهی جنگل و مرتع در کوهستان زاگرس، به دلیل نزدیکی به بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان، در این منطقه شاهد وقوع طوفان‌های گردوغبار شدید هستیم. محدوده تمرکز گردوغبار در دامنه‌های غربی رشته‌کوه زاگرس قرار داشته و ارتفاعات زاگرس به عنوان عامل پخش و پراکنش مکانی عمل کرده و طوفان گردوغبار را در جهات مختلف شمال و جنوب پراکنده ساخته است (شمسی‌پور و صفراد، ۱۳۹۱). کوه مانعی محکم و استوار در برابر حرکت بسته هوا است. بسته هوای مواجه شده با کوه ممکن است از روی کوه عبور کند، کوه را دور بزند، یا پس از مواجه شدن با کوه بازگردد. رفتار بسته هوای نزدیک‌شونده به کوه با توجه به چندین عامل شامل سرعت بسته هوا، پایداری هوا، و مشخصه‌های کوه تعیین می‌شود (Whiteman, 2000). اگر هوا ناپایدار، پایدار خستی، و یا حتی پایدار ضعیف باشد بسته هوا در صورت داشتن انرژی کافی می‌تواند از روی کوه عبور کند؛ اما در هوای پایدار عبور بسته هوا از روی کوه دشوار است. در این شرایط ممکن است بسته هوا کاملاً برگشت نماید، کوه را دور بزند، از میان کانال‌ها و درزهای کوهستان عبور کند، یا به چند بخش تقسیم شود طوری که بخش بالایی آن از روی کوه عبور کند و بخش پایینی کوه را دور بزند. مشخصه‌های کوه از جمله ارتفاع کوه، جهت قرارگیری، طول آن و غیره، در نحوه رفتار بسته هوای نزدیک‌شده به کوه مؤثر است (Durran, 2003). رشته‌کوه زاگرس از دیدگاه زمین‌شناسی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌گردد: زاگرس مرتفع و زاگرس چین‌خورده. زاگرس مرتفع بخش شمال‌شرقی

رشته‌کوه‌های زاگرس و در واقع اولین ردیف از کوه‌های زاگرس را تشکیل می‌دهند و به صورت دیواره‌ای بلند اما با پهنای نسبتاً کم (حداکثر ۸۰ کیلومتر) از شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده‌اند. زاگرس مرتفع دارای بیش‌ترین میزان بالآمدگی، ارتفاع و بارندگی در زاگرس می‌باشد. ارتفاع در این بخش به چهار هزار متر می‌رسد و شامل مرتفع‌ترین کوهستان‌ها است. مرتفع‌ترین قله زاگرس شامل دنا، زردکوه، اشترانکوه و گرین در زاگرس مرتفع قرار دارند. بخش غربی و جنوبی رشته‌کوه‌های زاگرس، با طولی حدود ۱۳۷۵ کیلومتر و عرضی بین ۱۲۰ تا ۲۵۰ کیلومتر، زاگرس چین‌خورده نامیده می‌شود. این بخش از زاگرس، هم راستا با زاگرس مرتفع، تا خلیج فارس و تنگه هرمز ادامه می‌یابد (مردانی و رضایی، ۱۳۸۵). زردکوه با ارتفاع بیش از ۴۲۰۰ متر از بلندترین کوه‌ها در این رشته‌کوه است. دنا، اشتران کوه، کوه گره و کوه بل به ترتیب سایر کوه‌های مرتفع این رشته‌کوه است.

مدل‌های عددی فراوانی برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی کیفیت هوا وجود دارد. در اغلب این مدل‌ها محاسبات قسمت شیمیایی و هواشناسی به‌طور مجزا از هم اجرا می‌شود. این موضوع باعث از دست رفتن اطلاعات مهم مربوط به برهم‌کنش بین قسمت شیمی و هواشناسی پدیده‌های جوی می‌گردد. مدل 'WRF-Chem' مدلی است که در آن محاسبات هواشناسی و شیمی توأمان انجام می‌شود. از این جهت مدلی بسیار مناسب برای شبیه‌سازی آلودگی‌های هوا مانند گردوغبار است. این مدل یک ابزار بسیار قوی در شبیه‌سازی انتقال، انتشار، ته‌نشست، تبدیل‌های شیمیایی، برهم‌کنش‌های ذرات معلق، تجزیه نوری، و تابش آلاینده‌های جوی است.

ساری صراف و همکاران توزیع قائم سامانه‌های ایجاد کننده گردوغبار و ارتباط آن با سامانه‌های هم‌مدیدی و توپوگرافی را در غرب ایران با استفاده از مدل WRF/Chem بررسی کرده‌اند. طبق این مطالعات با حذف کوهستان توده گردوغبار، پیشروی بیشتری در داخل مرزهای کشور خواهد داشت و با توجه به فرونشینی توده گردوغبار در مسیر انتقال به غرب ایران، گردوغبار انتقال یافته به مرکز ایران در مقایسه با غلظت گردوغبار در نواحی چشمه، بسیار ناچیز است (ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۶). فن<sup>۲</sup> و همکاران رویداد گردوغبار را که در بازه زمانی ۲۳ الی ۲۷ آوریل سال ۲۰۱۴ در شرق آسیا رخ داده بود با استفاده از مدل WRF/Chem بررسی کردند. با توجه به خروجی‌های مدل در شرایط عادی و حذف کوهستان به این نتیجه رسیدند که ناحیه کوهستانی‌تریم بسین<sup>۳</sup> یک اثر توپوگرافی به صورت "مخزن گردوغبار" دارد و می‌تواند گردوغبار ته‌نشین نشده را ذخیره کند و به عنوان منبع ثانویه آن را منتشر کند، که باعث افزایش شدت و دوام رویداد گردوغبار می‌شود (Fan et al., 2016). واشینگتون<sup>۴</sup> و همکاران در پژوهش خود ارتباط بین سرعت باد، توپوگرافی و گردوغبار را در بودیلی<sup>۵</sup> در کشور چاد بررسی کردند. آن‌ها با پیش

1 Weather Research Forecasting-Chemistry

2 Fan

3 Tarim basin

4 Washington

5 Bodèlè

نیاز دانستن بادهای سطحی قوی و منبع عظیم گردوغبار، ارتباط بین توپوگرافی و بادهای را بررسی نمودند و با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای و مشاهدات گسترده، نشان دادند که کوه‌های تیستی<sup>۱</sup> و اندی<sup>۲</sup> نقش کلیدی در ایجاد بادهای فرسایشی و شکل‌گیری جت‌استریم سطح پایین بودیلی ایفا می‌کند. خروجی مدل نشان می‌دهد که کانال بین این دو کوه منجر به تشکیل جت سطح پایین<sup>۳</sup> (LLJ) شده و آن هم به نوبه خود باعث افزایش بادهای سطحی می‌شود و در نتیجه گردوغبار افزایش می‌یابد (Washington et al., 2006).

در این تحقیق تأثیر رشته‌کوه زاگرس بر روی سامانه‌های غباری در غرب کشور با استفاده از مدل WRF-Chem بررسی و از امکان شبیه‌سازی گردوغبار این مدل استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه تأثیر رشته‌کوه زاگرس بر نحوه رفتار و انتشار گردوغبار و چگونگی تمرکز غلظت آن در این نواحی دو رویداد گردوغبار مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت بررسی وضعیت سامانه گردوغبار، داده‌های دید افقی مربوط به سی ایستگاه همدیدی در سرتاسر رشته‌کوه زاگرس از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. داده‌های تهیه شده از ایستگاه هواشناسی همدیدی در بازه زمانی سه ساعته بوده است. با بررسی داده‌های دید افقی از سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۶ یک رویداد گردوغبار شدید که غالب مناطق غرب کشور و برخی نواحی مجاور آن را متأثر ساخته بود، انتخاب شده است. بر اساس طبقه‌بندی گردوخاک (Shao, 2008)، در این مطالعه گردوخاک‌های با دید افقی کمتر از یک کیلومتر انتخاب شده که شامل طوفان‌های گردوخاک و طوفان‌های گردوخاک شدید حداقل در هفت ایستگاه در غرب کشور می‌باشد. بدین ترتیب پدیده گردوغبار مربوط به ۱۲ الی ۱۴ آوریل سال ۲۰۱۱ انتخاب شده است. همچنین رویداد گردوغبار دیگری با شدت ضعیف‌تر در ۱۶ الی ۱۸ ژوئن سال ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- مشخصات سامانه‌های مورد مطالعه

تاریخ شمسی	تاریخ میلادی	کمترین کاهش دید
۲۳ الی ۲۵ فروردین ۱۳۹۰	۱۲ الی ۱۴ آوریل ۲۰۱۱	صفر مربوط به کرمانشاه، و گیلان غرب
۲۷ الی ۲۹ خرداد ۱۳۹۵	۱۶ الی ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶	صد متر مربوط به قصر شیرین و ایلام

به منظور بررسی وضعیت دو سامانه گردوغبار علاوه بر داده دید افقی از تصاویر ماهواره مربوط به سنجنده مودیس ماهواره آکوا که هر روز یک بار در بین ساعت ۰۹ تا ۱۱ UTC از محدوده غربی ایران عبور می‌کند، استفاده شده است.

1 Tibesti

2 Ennedi

3 Low Level Jet

مدل پیش‌بینی تحقیقاتی وضع هوا (WRF) شامل دو هسته دینامیکی متفاوت؛ هسته دینامیکی تحقیقاتی پیشرفته و هسته دینامیکی مدل میان‌مقیاس غیر هیدروستاتیک؛ و نیز یک سیستم داده‌گواری است. در این مدل امکان انتخاب طرحواره‌های متفاوت برای فرآیندهای فیزیکی مختلف وجود دارد. این مدل از معادلات اویلری، کاملاً تراکم‌پذیر و غیر هیدروستاتیک<sup>۱</sup> پیروی می‌کند. مختصات قائم در این مدل مختصات قائم فشاری هیدروستاتیک دنبال‌کننده عوارض زمین<sup>۲</sup> است. این مدل از شبکه C آراکاوا<sup>۳</sup> استفاده می‌کند.

در این پژوهش از امکان شبیه‌سازی گردوغبار توسط مدل WRF/CHEM که توسط گرل و همکاران در سال ۲۰۰۵ در ویرایش سوم مدل WRF گنجانده است، استفاده شده است (Grell et al., 2005). دامنه مدل محدوده رشته-کوه زاگرس و منابع چشمه گردوغبار در عراق و سوریه را دربرمی‌گیرد. همچنین از داده‌های سیستم پیش‌بینی جهانی<sup>۴</sup> (GFS) در بازه زمانی سه ساعته به عنوان ورودی مدل WRF/CHEM استفاده شده است. به منظور دقت بیشتر از دو دامنه، دامنه اول با فاصله افقی شبکه ۲۱ کیلومتر و دامنه دوم با فاصله ۷ کیلومتر استفاده شده است. در تنظیم دامنه‌ها از ۱۰۰ و ۲۵۰ نقطه شبکه در راستای شرق-غرب و ۶۸ و ۱۶۰ نقطه شبکه در راستای شمال-جنوب به ترتیب برای دامنه اول و دوم استفاده شد. همچنین دو دامنه دارای ۳۲ نقطه شبکه در راستای قائم است. طرحواره‌های بکار رفته در مدل در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- طرحواره‌های فیزیکی و شیمیایی

فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی	طرحواره‌های بکار رفته در مدل WRF/CHEM
میکرو فیزیک ابر	Lin et al. scheme
تابش طول موج کوتاه	Goddard shortwave
تابش طول موج بلند	Rapid Radiative Transfer Model (RRTMG)
مدل سطحی خاک	Noah Land Surface Model
لایه مرزی	Yonsei University scheme (YUS)
گردوغبار	GOCART simple aerosol scheme

به منظور مطالعه تأثیر رشته‌کوه زاگرس بر طوفان گردوغبار، مدل WRF-Chem در سه حالت طبیعی، کاهش ارتفاع ناهمواری‌ها به هزار متر و کاهش ارتفاع ناهمواری‌ها به صفر اجرا شده است. شکل ۱ قسمت الف ارتفاع ناهمواری‌ها را در حالت طبیعی خود نشان می‌دهد. مطابق آن ارتفاع ناهمواری‌ها در غالب مناطق رشته‌کوه زاگرس

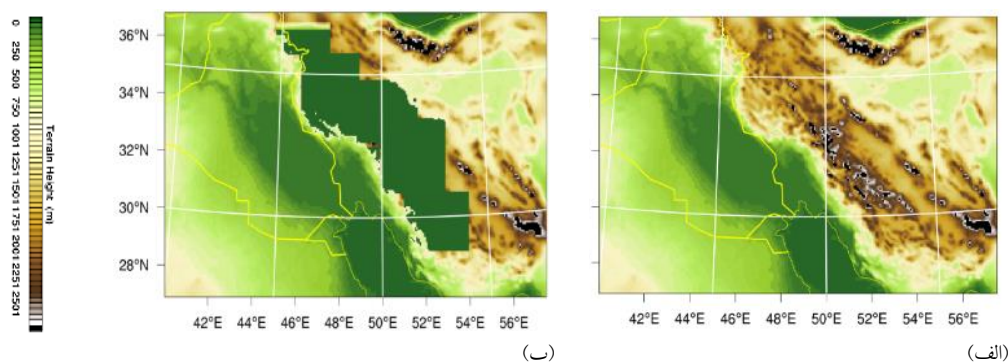
1 None hydrostatic

2 terrain-following hydrostatic pressure coordinate

3 Arakawa C-grid

4 Global Forecast System

بیش از ۱۵۰۰ متر است. همچنین ارتفاع‌های بیش از ۲۵۰۰ متر بیشتر در عرض‌های ۳۰ الی ۳۳ درجه شمالی در راستای شمال غربی-جنوب شرقی که در شکل با رنگ سیاه مشخص شده است، قرار دارد. شکل ۱ قسمت ب محدوده حذف ارتفاع ناهمواری‌های رشته‌کوه را نشان می‌دهد.

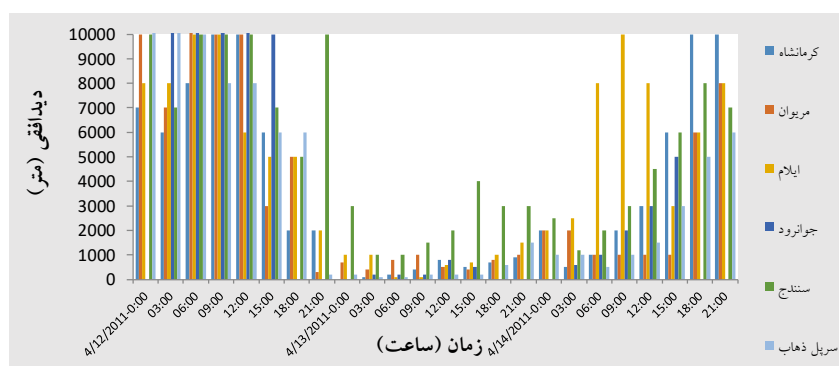


شکل ۱- ارتفاع ناهمواری‌ها (متر)، (الف) حالت طبیعی، (ب) حالت حذف رشته‌کوه زاگرس

### ۳- نتایج و بحث

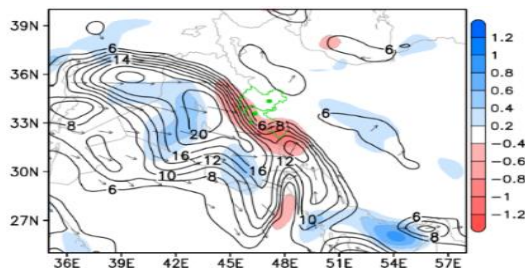
#### ۳-۱- رویداد گردوغبار آوریل ۲۰۱۱

در شکل ۲ کاهش دید افقی طی ۱۲ الی ۱۴ آوریل ۲۰۱۱ (۲۳ تا ۲۵ فروردین سال ۱۳۹۰) برای شش ایستگاه همدیدی که در سمت روبه باد رشته‌کوه زاگرس قرار دارند، مشاهده می‌شود. روند کاهش دید افقی به کمتر از ۵۰۰۰ متر در بیشتر ایستگاه‌ها از ساعت ۱۸ UTC روز ۱۲ آوریل مشاهده شده است و پس از آن در روز ۱۳ آوریل تقریباً در تمام ساعت‌ها دید افقی به کمتر از هزار متر رسیده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. بیش‌ترین کاهش دید در مریوان تا ساعت ۲۱ UTC این روز ادامه دارد. شدیدترین حالت گرد و خاک در روز ۱۳ آوریل رخ داده اما تا میانه‌های روز ۱۴ آوریل همچنان گرد و خاک در منطقه با شدت کمتری تداوم دارد.

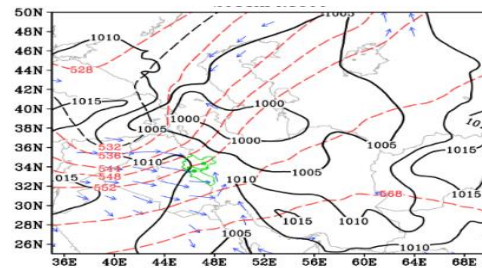


شکل ۲- دید افقی (متر) در بازه زمانی ۱۲ الی ۱۴ آوریل ۲۰۱۱

در روز ۱۳ آوریل کم فشار با منشأ مدیترانه‌ای با مقدار ۱۰۰۰ هکتوپاسکال همراه با ناوه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، به سمت ایران جابه‌جا شده و پشته فشاری ۱۰۱۰ هکتوپاسکال ناشی از پرفشار جنب حاره به عراق گسترش یافته و منجر به افزایش گرادیان فشار و سرعت باد می‌شود (۳-الف). باد غربی با حداکثر سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه در سطح ۹۲۵ هکتوپاسکال تمامی کشور عراق را در بر گرفته‌است که منجر به تشدید گردوغبار شده‌است و در راستای غربی به سوی ایران انتقال می‌یابد (۳-ب). از طرفی گسترش پرفشار ۱۰۱۵ هکتوپاسکال در جنوب ایران بادهای جنوبی را در این مناطق ایجاد می‌کند. همان‌طور که در تصویر ماهواره (۴-ب) دیده می‌شود، در روز ۱۳ آوریل توده گردوخاک با شدت بسیار زیاد تمامی بخش‌های جنوب شرق عراق، شمال شرق عربستان و غرب و جنوب غرب ایران را در بر می‌گیرد. گرچه منشأ آن بیابان‌های عراق است اما بادهای جنوبی در جنوب غرب ایران منجر به انتقال شمال سوی گردوخاک می‌گردد. فراگیری گردوغبار در استان خوزستان نسبت به ایلام و کرمانشاه گواه این مطلب است.



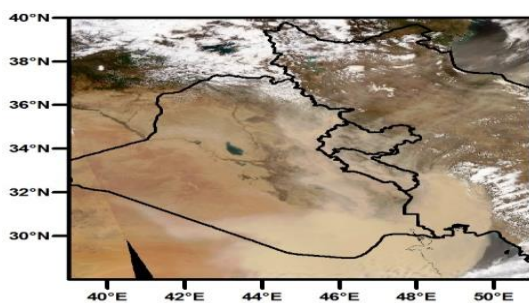
(ب)



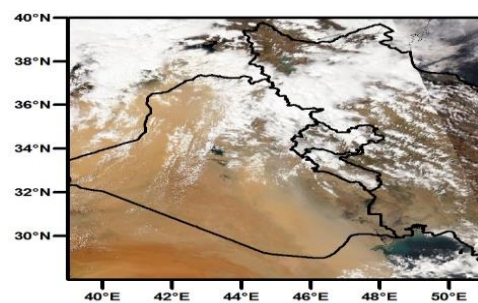
(الف)

شکل ۳- خط هم فشار (مشکی) بر حسب هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (خط چین قرمز) بر حسب دکامتر، باد ده متری (پیکان آبی)، (ب) سرعت باد (خط مشکی) بر حسب متر بر ثانیه، جهت باد (پیکان)، سرعت عمودی (نواحی رنگی) بر حسب پاسکال بر ثانیه، در ساعت UTC ۰۰ روز ۱۳ آوریل سال

۲۰۱۱



(ب)

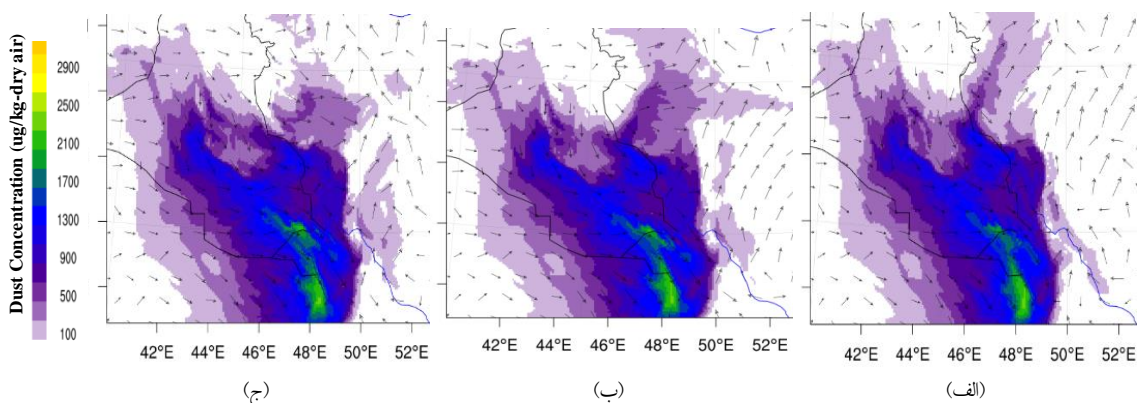


(الف)

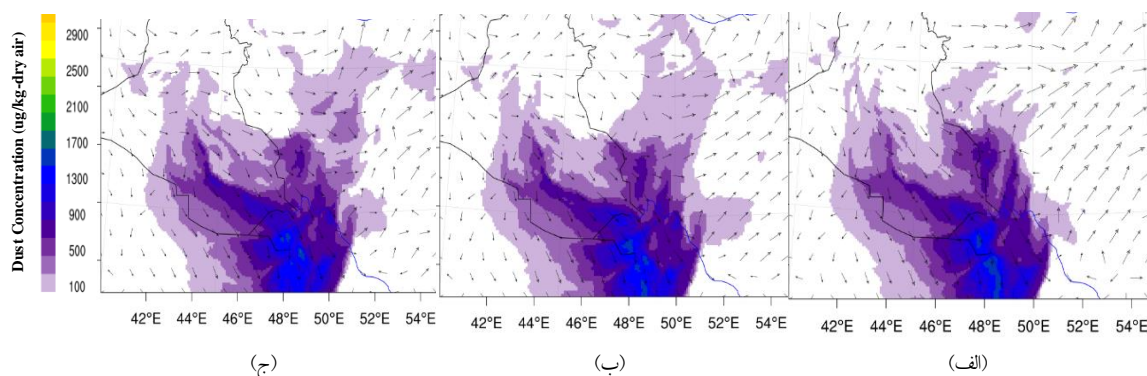
شکل ۴- تصاویر ماهواره مربوط به سنجنده مودیس ماهواره آکوا الف (۱۲ آوریل، ب) ۱۳ آوریل سال ۲۰۱۱

طبق خروجی‌های مدل، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در حالت حذف ناهمواری‌ها نسبت به حالت طبیعی، گسترش گردوغبار به سمت مرکز و شمال کشور بیشتر است. همچنین در حالت کاهش ناهمواری نسبت به حالت طبیعی، از غلظت گردوغبار در دامنه‌های غربی زاگرس کاسته شده‌است.

در قسمت الف شکل ۶ در حالت مرجع گردوغبار به طول جغرافیایی ۴۹ درجه رسیده‌است. غلظت گردوغبار در نواحی جنوب غربی کشور به بیش از هزار میکروگرم بر کیلوگرم و در غرب کشور در حدود ۱۰۰ الی ۱۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم رسیده است. طبق این شکل گردوغبار در سمت دامنه‌های رو به باد رشته‌کوه تجمع دارد و غلظت گردوغبار در این نواحی از شمال تا جنوب رشته‌کوه بین ۳۰۰ الی ۱۳۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم است. در شکل ۶-ج با حذف ارتفاع رشته‌کوه گردوغبار به طول جغرافیایی ۵۰ درجه می‌رسد. همچنین در نواحی شمالی رشته‌کوه زاگرس گردوغبار با غلظت بیشتری نسبت به حالت مرجع به سمت مرکز کشور گسترش یافته‌است.



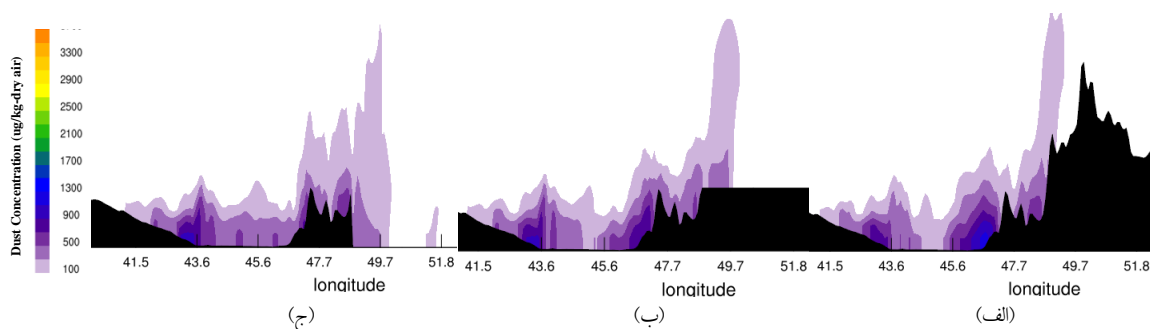
شکل ۵- غلظت گردوغبار و باد افقی الف) در حالت مرجع، ب) در حالت کاهش ناهمواری به هزار متر، ج) در حالت حذف ناهمواری در ساعت ۳:۰۰ روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۱



شکل ۶- غلظت گردوغبار و باد افقی الف) در حالت مرجع، ب) در حالت کاهش ناهمواری به هزار متر، ج) در حالت حذف ناهمواری در ساعت ۷:۰۰ روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۱

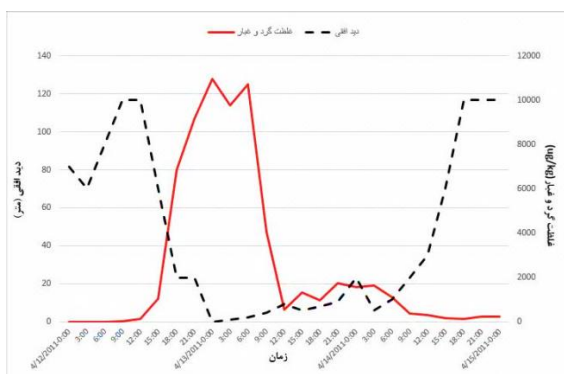


شکل ۷ ارتفاع ناهمواری‌ها (رنگ مشکی) و نمایه قائم گردوغبار را عرض جغرافیایی  $32/5$  درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت الف مشاهده می‌شود گردوغبار با غلظت  $100$  میکروگرم بر کیلوگرم به صورت محدود از کوهستان با ارتفاع دو کیلومتر عبور کرده‌است؛ اما گردوغبار در دامنه غربی رشته‌کوه متوقف شده‌است. با توجه به شکل ۷-ب، با کاهش ارتفاع کوهستان به  $1000$  متر، گردوغبار به سمت شرق منتقل می‌شود. حذف کوهستان (۷-ج) نیز موجب گسترش بیشتر گردوغبار به شرق و کاهش غلظت در دامنه‌های رو به باد زاگرس در این عرض جغرافیایی نسبت به حالت مرجع می‌شود.

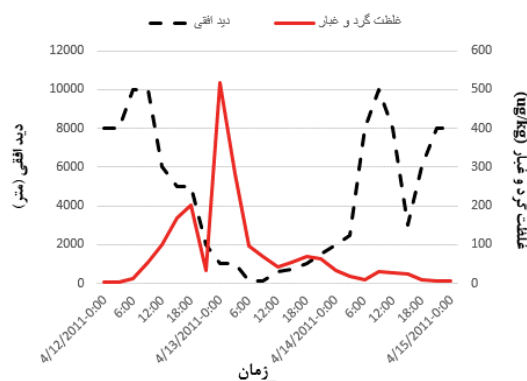


شکل ۷- نمایه قائم گردوغبار الف) حالت طبیعی، ب) حالت کاهش ناهمواری، ج) حالت حذف ناهمواری در عرض جغرافیایی  $32/5$  درجه شمالی در ساعت  $4:00$  روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۱

جهت سنجیدن درستی شبیه‌سازی گردوغبار توسط مدل WRF/CHEM، غلظت گردوغبار با داده‌های دید افقی بدست آمده از سازمان هواشناسی برای ایستگاه ایلام و کرمانشاه که بیشترین کاهش دید افقی را داشتند، مقایسه شده‌است. شکل ۸ قسمت الف این مقایسه را برای شهر ایلام نشان می‌دهد. طبق این شکل در هر دو مورد با کاهش دید افقی، افزایش غلظت گردوغبار مشاهده می‌شود. علی‌رغم اینکه در ساعات ۶ الی ۱۸ روز ۱۳ آوریل با توجه به تداوم کاهش دید افقی، غلظت گردوغبار به درستی شبیه‌سازی نشده است، در مجموع شبیه‌سازی مدل با داده‌های دید افقی ایستگاه ایلام همخوانی دارد. در ایستگاه همدیدی کرمانشاه جز در ساعاتی از روز ۱۳ آوریل، با افزایش غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده، دید افقی کاهش می‌یابد.



(ب)



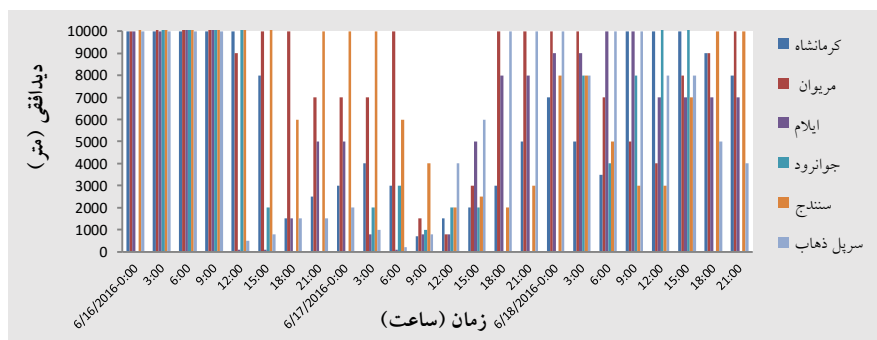
(الف)

شکل ۸- سری زمانی غلظت دید افقی (خط چین)، سری زمانی گردوغبار (خط قرمز) در الف) ایلام ب)

کرمانشاه مربوط به بازه زمانی ۱۲ الی ۱۴ آوریل ۲۰۱۱

۳-۲- رویداد گردوغبار ژوئن ۲۰۱۶

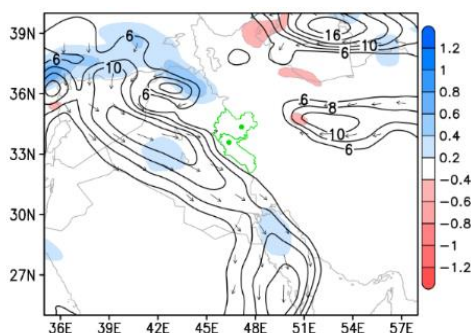
دید افقی در بازه زمانی ۱۶ الی ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶ (۲۷ الی ۲۹ خرداد ۱۳۹۵) در شکل ۹ نشان داده شده است. شدت این رویداد گردوغبار کمتر از شدت گردوغبار رویداد سال ۲۰۱۱ است. طبق این شکل، دید افقی از ساعت ۱۸ UTC روز ۱۶ ژوئن شروع به کاهش می‌کند. بیش‌ترین کاهش دید به‌طور میانگین برای این شش ایستگاه در ساعات ۹ الی ۱۵ روز ۱۷ ژوئن اتفاق افتاده است.



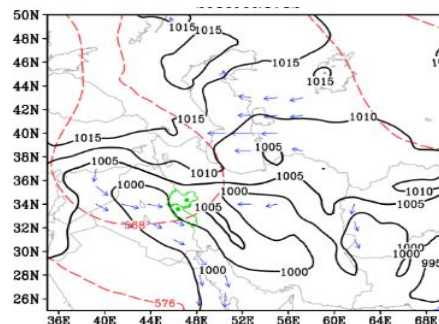
شکل ۹- دید افقی (متر) در بازه زمانی ۱۶ الی ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶

در روز ۱۷ ژوئن کم فشار ۹۹۵ هکتوپاسکال همراه با ناوه ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در شمال عراق مشاهده می‌شود. با توجه به ناوه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، کم فشار دینامیکی است. وجود کم‌فشار و گسترش پرفشار جنب حاره به شمال عربستان منجر به شکل‌گیری بادهای شمال غربی در سوریه و عراق می‌شود (۱۰-الف). در سطح ۹۲۵ هکتوپاسکال باد شمال غربی در شمال غرب حاکم است که سرتاسر عراق و سوریه تا شمال عربستان را در برمی-

گیرد (۱۰-ب). بادهای غربی و شمال غربی توده گردوخاک شکل گرفته در روز قبل را به مرز غربی و جنوب غرب ایران انتقال می‌دهند، که در تصویر ماهواره به خوبی قابل مشاهده است (۱۱-ب).

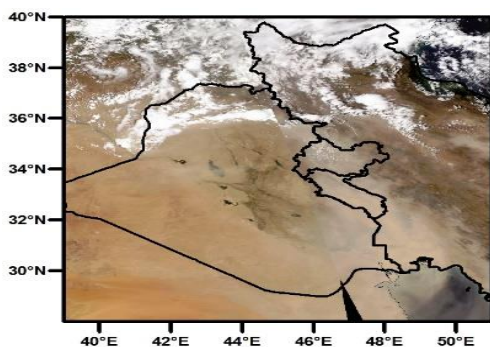


(ب)

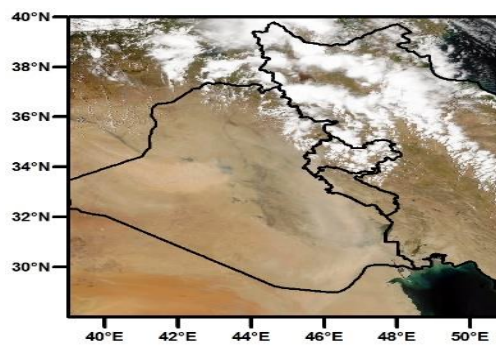


(الف)

شکل ۱۰- الف) خط هم فشار (مشکی) بر حسب هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (خط چین قرمز) بر حسب دکامتر، باد ده متری (پیکان آبی)، ب) سرعت باد (خط مشکی) بر حسب متر بر ثانیه، جهت باد (پیکان)، سرعت عمودی (نواحی رنگی) بر حسب پاسکال بر ثانیه، در ساعت ۱۲ UTC روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶



(ب)

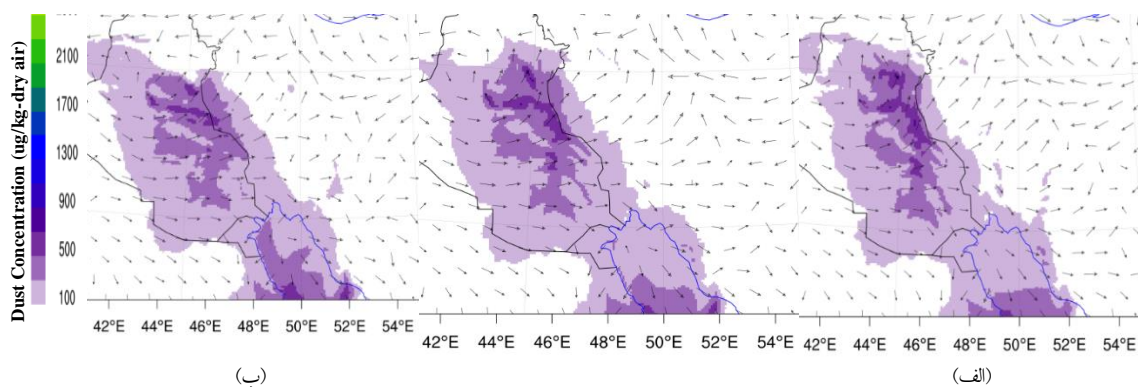


(الف)

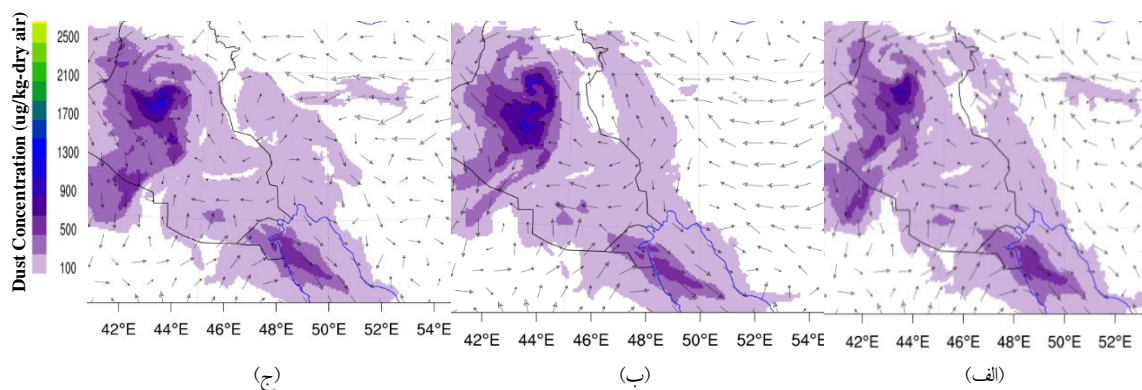
شکل ۱۱- تصاویر ماهواره آکوا سنجنده مادیس الف) ۱۶ ژوئن، ب) ۱۷ ژوئن سال ۲۰۱۶

خروجی‌های مدل در رویداد دوم و روز ۱۶ ژوئن (۲۷ خرداد)، حاکی از آن است که به‌طور همزمان در سه ناحیه در شمال غربی عراق و جنوب شرقی سوریه، در شمال شرقی عربستان و جنوب سواحل خلیج و در مرکز و جنوب غربی عراق طوفان گردوغبار شکل گرفته‌است. شکل ۱۲ قسمت الف غلظت گردوغبار را در ساعت ۱۲ روز ۱۷ ژوئن (۲۸ خرداد) نشان می‌دهد. در این زمان یک توده گردوغبار شدید بر روی کشور عراق مشاهده می‌شود. این توده در مجاورت مرز غربی کشور قرار داشته و قسمت‌هایی از نواحی مرزی در غرب و جنوب غربی کشور را در بر گرفته‌است. در حالت مرجع گردوغبار در هنگام رویارویی با قسمت‌های شمالی رشته‌کوه زاگرس به سمت شمال

و جنوب دامنه‌های رو به باد رشته‌کوه تمایل پیدا می‌کند و کمتر به سمت شرق سوق پیدا می‌کند. مطابق قسمت ب این شکل با حذف ارتفاع رشته‌کوه زاگرس گردوغبار در عرض‌های جغرافیایی ۳۲ الی ۳۵ درجه شمالی به اندازه یک درجه طول جغرافیایی به سمت شرق انتقال پیدا کرده‌است. بر اساس شکل ۱۳ قسمت الف، گردوغبار در قسمت شمالی رشته‌کوه زاگرس تا حدود طول جغرافیایی ۴۸ درجه، و در نواحی مرکزی آن تا طول ۴۹ درجه و در قسمت‌های جنوبی رشته‌کوه تا طول ۵۰ درجه شرقی پیشروی کرده‌است؛ اما طبق قسمت ج این شکل با حذف ارتفاع رشته‌کوه زاگرس، شاهد پیشروی بیشتر گردوغبار به سمت مرکز کشور هستیم. چنانچه ارتفاعات رشته‌کوه زاگرس هموار شود، گردوغبارهای شکل گرفته بر روی عراق و سوریه گسترش بیشتری به سمت شرق خواهند داشت.

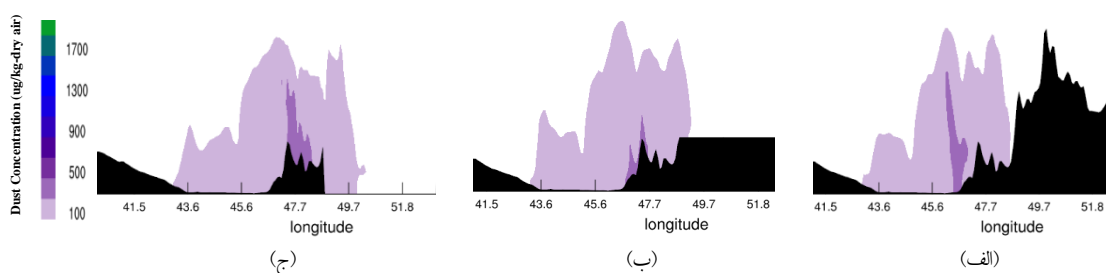


شکل ۱۲- غلظت گردوغبار و باد افقی الف) در حالت مرجع، ب) در حالت کاهش ناهمواری به هزار متر، ج) در حالت حذف ناهمواری‌ها در ساعت ۱۲:۰۰ روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶



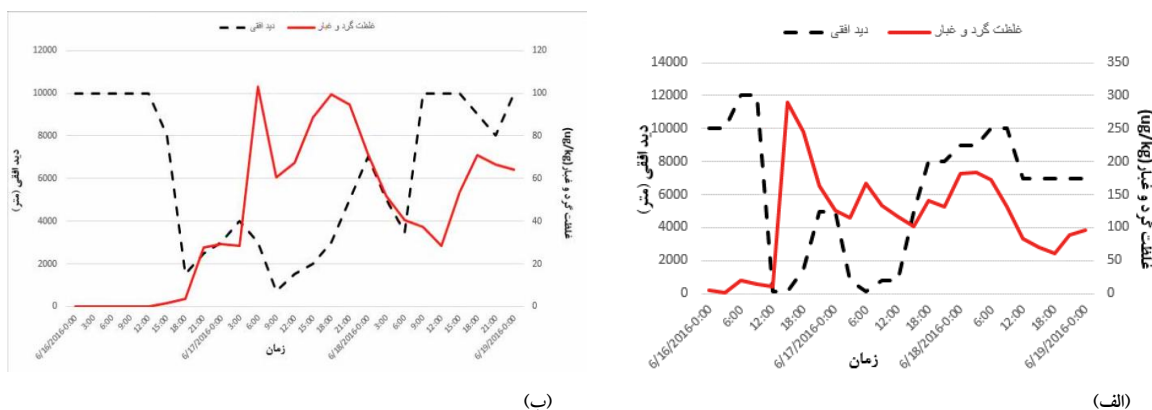
شکل ۱۳- غلظت گردوغبار و باد افقی الف) در حالت مرجع، ب) در حالت کاهش ناهمواری به هزار متر، ج) در حالت حذف ناهمواری‌ها در ساعت ۶:۰۰ روز ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶

شکل ۱۴ نمایه قائم گردوغبار را منطبق بر عرض جغرافیایی ۳۲/۵ درجه نشان می‌دهد. ارتفاع گردوغبار در این ساعت از سه کیلومتر تجاوز نکرده است و ارتفاع ستون گردوغبار تقریباً برابر با ارتفاع کوه است. همچنین تقریباً غلظت این ستون از گردوغبار برابر با ۱۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم است. طبق شکل ۱۴ قسمت الف ناحیه‌ای از توده گردوغبار با غلظت ۳۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم در حالت طبیعی در دامنه رو به باد کوه در طول جغرافیایی بین ۴۶ تا ۴۷ درجه قرار گرفته است. در شرایط حذف کوهستان (شکل ۱۴-ج) این ناحیه با غلظت ۳۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم به سمت شرق جابه‌جا می‌شود. همان‌طور که شکل ۱۴ قسمت ب نشان می‌دهد با کاهش ناهمواری به هزار متر گردوغبار پیشروی بیشتری نسبت به حالت مرجع دارد. در حالت حذف کامل ارتفاعات، گردوغبار حدود دو درجه طول جغرافیایی بیشتر از حالت مرجع به سمت شرق انتقال می‌یابد؛ بنابراین در این شرایط کوه کاملاً مانع عبور گردوغبار شده است و با حذف کوه میزان پیشروی گردوغبار تغییر می‌کند.



شکل ۱۴- نمایه قائم گردوغبار الف) حالت طبیعی، ب) حالت حذف ناهمواری، ج) در حالت حذف ناهمواری-  
ها در عرض ۳۲/۵ درجه شمالی ساعت ۱۹۰۰ روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۶

نمایه قائم گرد و غبار نشان می‌دهد در مکان‌هایی که ارتفاع ستون گردوغبار برخورد کننده با کوه برابر یا کمتر از ارتفاع کوه است گردوغبار در مقابل کوه متوقف شده است. در مواردی که ارتفاع ستون گردوغبار از ارتفاع کوه بیشتر بوده، کوه نتوانسته است مانع عبور آن گردد؛ اما باعث تشدید غلظت در نواحی رو به باد کوهستان شده است. مطابق شکل ۱۵ در هر دو ایستگاه کرمانشاه و ایلام، با کاهش دید افقی، غلظت گردوغبار افزایش می‌یابد و بالعکس؛ بنابراین نتایج مقایسه شبیه‌سازی غلظت گردوغبار توسط مدل WRF/CHEM، و داده‌های دید افقی بدست آمده از سازمان هواشناسی برای ایستگاه ایلام و کرمانشاه، توانایی مدل را در شبیه‌سازی گردوغبار تأیید می‌کند.



شکل ۱۵- سری زمانی غلظت دید افقی (خط چین)، سری زمانی گردوغبار (خط قرمز) در الف) ایلام ب)

کرمانشاه مربوط به بازه زمانی ۱۶ الی ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶

با مقایسه دو سامانه، می‌توان دریافت که گرچه در هر دو مورد کم فشار دینامیکی شکل گرفته اما سازوکار آن‌ها متفاوت است. در آوریل ۲۰۱۱ کم فشار مدیترانه منجر به شکل‌گیری بادهای غربی بر روی عراق شده و پرفشاری در جنوب ایران بادهای جنوبی ایجاد می‌کند که باعث می‌شود توده گردوغبار از عراق به جنوب غرب ایران و سپس به غرب انتقال یابد. با توجه به شرایط استان خوزستان و شکل‌گیری باد جنوبی احتمال شکل‌گیری گردوخاک محلی و افزایش شدت گردوخاک وجود دارد. در حالی که در ژوئن ۲۰۱۶ کم‌فشار دریای سرخ فعال شده و بادهای شمال غربی (باد شمال) بر روی عراق شکل می‌گیرد و گردوغبار را از عراق به غرب و جنوب غرب ایران انتقال می‌دهد. با توجه به جهت باد، گردوغبار استان خوزستان شدیدتر از غرب ایران است. در رویداد گردوغبار در آوریل ۲۰۱۱ منشأ گردوغبار شمال عربستان و جنوب شرق عراق بوده و به احتمال زیاد استان خوزستان هم مؤثر بوده است در حالی که در ژوئن ۲۰۱۶ منشأ گردوغبار عراق است. مدل WRF/Chem با شبیه‌سازی ساختار افقی و عمودی گردوغبار، نشان می‌دهد که گردوغبار آوریل ۲۰۱۱ با شدت زیاد توانسته از کوه عبور کند. در طوفان ژوئن ۲۰۱۶ با غلظت‌های گردوغبار کمتر، کوه مانعی در برابر انتقال گردوغبار است. در هر دو مورد بیشترین میزان تجمع و ماندگاری گردوغبار در دامنه‌های غربی رشته‌کوه زاگرس است.

#### ۴- نتیجه گیری

رشته‌کوه زاگرس به واسطه موقعیت جغرافیایی که دارد مانعی در برابر حجم گردوغبار ورودی به کشور است. هدف از این پژوهش شناخت رفتار سامانه‌های گردوغباری است که در غرب کشور رخ می‌دهد. بدین منظور دو طوفان گردوغبار با شدت زیاد و متوسط جهت بررسی نقش رشته‌کوه زاگرس بر طوفان گردوغبار غرب کشور مورد مطالعه قرار گرفته است. طوفان گردوغبار در بازه زمانی ۱۲ الی ۱۴ آوریل ۲۰۱۱ با کمترین دید افقی در اکثر ایستگاه-

های مورد مطالعه، و طوفان مربوط به بازه زمانی ۱۶ الی ۱۸ ژوئن ۲۰۱۶ که نسبت به رویداد اول شدت کمتری دارد، انتخاب گردید. با استفاده از مدل WRF/Chem این دو طوفان گردوغبار در سه حالت ارتفاع طبیعی، کاهش ارتفاع به هزار متر و حذف ناهمواری‌های رشته‌کوه زاگرس شبیه‌سازی شده‌است. به منظور اطمینان از نتایج شبیه‌سازی گردوغبار توسط مدل WRF/CHEM، این نتایج با داده‌های مشاهده‌ای دید افقی در ایستگاه همدیدی ایلام برای دو مورد طوفان گردوغبار مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی گردوغبار با داده‌های دید افقی همخوانی دارد.

در بازه زمانی ۱۲ الی ۱۴ آوریل ۲۰۱۱ کمترین دید افقی مربوط به شهرهای کرمانشاه و گیلان غرب است که میزان آن به صفر رسیده‌است. این طوفان گردوغبار از نواحی جنوب غرب کشور و با عبور از خلیج فارس به رشته‌کوه زاگرس می‌رسد. در مورد طوفان ماه ژوئن ۲۰۱۶ شدت گردوغبار در روز ۱۷ ژوئن به اوج خود می‌رسد که کمترین دید افقی با مقدار ۱۰۰ متر در شهرهای ایلام و قصر شیرین رخ داده‌است. مکانیزم انتقال گردوغبار در دو رویداد گردوغبار متفاوت است. در هر دو مورد کم فشار دینامیکی شکل گرفته با سازوکار متفاوت موجب شکل‌گیری گردوغبار می‌گردد. در آوریل ۲۰۱۱ کم فشار مدیترانه منجر به شکل‌گیری بادهای غربی بر روی عراق شده و پرفشاری در جنوب ایران بادهای جنوبی ایجاد می‌کند که باعث می‌شود توده گردوغبار از عراق به جنوب غرب ایران و سپس به غرب انتقال یابد؛ اما در ژوئن ۲۰۱۶ کم فشار دریای سرخ فعال شده و بادهای شمال غربی (باد شمال) بر روی عراق شکل می‌گیرد و گردوغبار را از عراق به غرب و جنوب غرب ایران انتقال می‌دهد. با توجه به جهت باد، گردوغبار استان خوزستان شدیدتر از غرب ایران است. طبق برون داد مدل در بررسی ساختار افقی و عمودی گردوغبار، در سامانه اول با شدت زیاد گردوغبار، مانع کوهستان به‌طور کامل نتوانسته است مانع از عبور گردوغبار گردد؛ اما در مورد طوفان دوم که شدت کمتر بوده است کوه کاملاً مانع انتقال گردوغبار گشته‌است. با این حال در هر دو مورد بیشینه غلظت گردوغبار در دامنه‌های غربی و نواحی مجاور آن بوده‌است که از کوه عبور نکرده و ماندگاری زیادی در این نواحی داشته‌است.

حذف کوهستان باعث پیشروی بیشتر گردوغبار به داخل کشور می‌شود. این یافته همسو با نتایج ساری صراف و همکاران (۱۳۹۶) است. طبق نتایج این پژوهش نواحی رو به باد رشته‌کوه (دامنه غربی)، طوفان گردوغبار با شدت و ماندگاری بیشتری را تجربه می‌کنند که همسو با نتایج فن و همکاران (۲۰۱۶) و شمسی‌پور و صفرراد (۱۳۹۱) است.

## کتابنامه

- ساری صراف، بهروز؛ رسولی، علی اکبر؛ زرین، آذر؛ نجفی، محمدسعید؛ ۱۳۹۶. شبیه سازی توزیع قائم سامانه های گردوغبارزا در ارتباط با سامانه های همدید و توپوگرافی در غرب ایران. پژوهش های جغرافیای طبیعی. شماره ۴۹. ۱۶۹-۱۸۹.
- شمسی پور، علی؛ صفرزاد، طاهر؛ ۱۳۹۱. تحلیل ماهواره ای-همدیدی پدیده ی گردوغبار (گردوغبار تیرماه ۱۳۸۸). پژوهش های جغرافیای طبیعی. شماره ۴۴. ۱۱۱-۱۲۶.
- مردانی، م؛ رضایی، ع؛ ۱۳۸۵. لرزه خیزی، زمین ساخت زاگرس. پایگاه ملی داده های علوم زمین کشور. (دسترسی ۱۳۹۶/۷/۱).

- Durrán DR., 2003. Lee Waves and Mountain Waves. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 1161-1169.
- Fan J, Yue X, Sun Q, Wang S. 2016. Case study of dust event sources from the Gobi and Taklamakan deserts: An investigation of the horizontal evolution and topographical effect using numerical modeling and remote sensing. *Journal of Environmental Sciences* 56, 62-70.
- Grell GA, Steven EP, Schmitz R, McKeen SA, Frost G, Skamarock WC, Eder B., 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, 6957-6975.
- Prospero JM, Ginoux p, Torres O, Nicholson SE, Gill TE. 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, 2-1-2-31.
- Shao Y. 2008. Physics and modeling of wind erosion. Springer New York.
- Washington R, Todd MC, Lizcano G, Tegen I, Flamant C, Koren I, Ginoux P, Engelstaedter S, Bristow CS, Zender CS, Goudie AS, Warren A, Prospero JM. 2006. Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bode'le' Depression, Chad. *Geophysical Research Letters* 33, L09401.
- Whiteman CD., 2000. Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. Oxford University Press.