

## شبیه‌سازی هواویزها و واداشت تابشی ناشی از آنها با استفاده از مدل جفت‌شده هواویز

### HAM و مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا WRF

رباب مشایخی<sup>۱\*</sup>، پرویز ایران‌نژاد<sup>۲</sup> و عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۲/۱۳، پذیرش نهایی: ۸۸/۲/۲۲)

#### چکیده

در این پژوهش سیستم جفت‌شده جدیدی از طرحواره هواویز HAM با مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF معرفی شده است. در مقایسه با طرحواره‌های هواویز به‌کاررفته در مدل WRF، طرحواره هواویز HAM از دستاورد جدیدی تحت عنوان روش شبه‌مدال برای توزیع اندازه ذرات هواویز استفاده می‌کند. پنج نوع اصلی هواویزهای جهانی شامل سولفات، کربن سیاه، کربن آلی، ذرات گردوغبار و نمک دریا در این مدل در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی‌های اولیه حاصل از مدل جفت‌شده WRF-HAM برای یک دوره شبیه‌سازی شش روزه از ۶ مه تا ۱۲ مه ۲۰۰۶ آورده شده است و نتایج با شبیه‌سازی‌های حاصل از طرحواره هواویز موجود در نسخه دوم مدل WRF، یعنی طرحواره MADE، مقایسه شده‌اند. غلظت جرمی شبیه‌سازی شده ذرات PM<sub>10</sub> در منطقه تهران با استفاده از مدل جفت‌شده جدید، بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به طرحواره هواویز MADE نشان می‌دهد. وارد کردن هواویزها در شبیه‌سازی‌های مدل، منجر به واداشت تابشی منفی و ایجاد سرمایش به‌ویژه در مناطق با مقادیر بزرگ شار گسیل ذرات گرد و غبار و واداشت تابشی مثبت و تولید گرمایش در مناطق دارای هواویزهای کربن سیاه در حوزه شبیه‌سازی می‌شود. اختلاف شار تابش طول موج کوتاه پایین‌سوی شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی در منطقه تهران با وجود هواویزها کوچک‌تر شده و این بهبود در طرحواره جدید HAM نسبت به طرحواره MADE قابل ملاحظه‌تر است. شار تابش موج کوتاه پایین‌سو تا بیش از ۴۰ وات بر مترمربع در شبیه‌سازی‌های HAM بهبود می‌یابد. تغییرات کوچکی نیز در دمای جو و فشار سطحی با در نظر گرفتن هواویزها در مدل ایجاد می‌شوند. متوسط روزانه عمق نوری شبیه‌سازی شده با مدل، توافق خوبی با توزیع مکانی مشاهداتی از داده‌های ماهواره MODIS نشان می‌دهد. از سوی دیگر مقادیر شبیه‌سازی شده عمق نوری در طول موج ۵۰۰ نانومتر با طرحواره HAM با مقادیر مشاهداتی حاصل از داده‌های جهانی AERONET در ایستگاه سولار ویلیج نیز بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به عملکرد MADE نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: هواویز، طرحواره هواویز HAM، مدل میان‌مقیاس WRF و واداشت تابشی

## The simulation of aerosols and its radiative forcing using the new coupled system of aerosol HAM model with the Weather Research and Forecasting (WRF) model

Mashayekhi, R.<sup>1</sup>, Irannejad, P.<sup>2</sup> and Aliakbari-Bidokhti, A. A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph. D. Student of Meteorology, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup> Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 3 March 2009, Accepted: 12 May 2009)

#### Abstract

A new coupled system of the aerosol HAM model and the Weather Research and Forecasting (WRF) model is introduced and tested in this paper. Unlike the two other

aerosol schemes currently coupled in the WRF model (MADE/Sorgam and MOSAIC), the HAM applies a new "pseudomodal" approach for the representation of the aerosol particles. The aerosol population in this model is represented by the superposition of seven modes based on size and solubility. The particle size is assumed to be distributed log-normally. The seven modes are categorized into four geometrical size classes, ranging from the nucleation, Aitken and accumulation modes to coarse modes. The aerosols are also divided into two types of internally mixed and water soluble particles (four modes), and externally mixed and insoluble particles (three modes). This classification makes possible the prediction of the hygroscopic properties of initially insoluble aerosol compounds which controls their atmospheric lifetimes and also their interactions with clouds. The WRF-HAM model includes the various microphysical processes of condensation of sulfuric acid, nucleation and new particle formation, coagulation of aerosol particles, and the thermodynamical equilibrium of aerosols with the water vapor. The main removal processes for the aerosol particles in the coupled WRF-HAM model are gravitational sedimentation and dry deposition. The model also considers the in-cloud scavenging of aerosol particles by precipitation within the convective cumulus clouds. The main global aerosol compounds including sulfate, black carbon, particulate organic carbon (POM), sea salt and mineral dust have been considered in this study. The emission fluxes of different aerosol compounds are based on the prescribed Emission Inventory for the Aerosol Model Inter-comparison Experiment B, AEROCOM representative for the year 2000. The simulations are carried out for a 6-day simulation period from 6 to 12 May 2006 over a domain with 30-km grid spacing, covering south-western Asia, North Africa and some parts of Europe. The diurnal variation of the simulated hourly  $PM_{10}$  mass concentration at Tehran is qualitatively close to the hourly observations made by the Air Quality Control Company (AQCC) of the Municipality of Tehran. The model captures diurnal cycle and the magnitude of the observed  $PM_{10}$  concentration during most of the simulation period. Coupling WRF model with HAM aerosol scheme improves the hourly  $PM_{10}$  mass concentration compared to the case where WRF was coupled with MADE scheme. A negative radiative forcing and cooling of the atmosphere are found mainly over the regions of high emission of mineral dust. The absorption of shortwave radiation by black carbon causes warming effects in some regions with positive radiative forcing. The inclusion of aerosol feedback in the shortwave radiation scheme improves the simulated daily mean shortwave radiation fluxes in Tehran. The difference between the simulated and observed mean daily downward shortwave radiation, temperature and surface pressure by the HAM model is smaller than by the aerosol MADE scheme. Compared to WRF-MADE, using the coupled WRF-HAM model improves the simulation of downward shortwave radiation by up to  $40 \text{ Wm}^{-2}$ . The spatial variation in the simulated mean optical depth of aerosols at 500 nm wavelength by the WRF-HAM model is qualitatively close to the measurements by MODIS instrument. Furthermore, the comparison of the simulated aerosol optical depth by HAM and MADE aerosol schemes and the observations in Solar Village site of the global AERONET Network shows that the HAM model highly outperforms MADE.

**Key words:** Aerosols, Aerosol HAM model, WRF model, Radiative forcing

## ۱ مقدمه

نتیجه سامانه اقلیمی دارند. این ذرات با جذب و پراکنش تابش طول موج کوتاه خورشیدی و نیز جذب و گسیل

هواویزهای جوی که ذرات جامد و مایع معلق موجود در هوا هستند، نقش برجسته‌ای در بودجه تابشی جو و در

MAD/Sorgam (ایکرمن و همکاران، ۱۹۹۸) و طرحواره MOSAIC (زاوری و همکاران، ۲۰۰۵a و ۲۰۰۵b) در نسخه دوم مدل شیمی WRF قرار داده شده‌اند. این دو طرحواره از نظر روش عرضه توزیع اندازه ذرات، فرمول‌بندی‌های دینامیکی و میکروفیزیکی هواویزها و فرایندهای حذف ذرات از جو با هم متفاوت‌اند. طرحواره MADE از روش مدال برای عرضه توزیع اندازه ذرات استفاده می‌کند، درحالی‌که طرحواره MOSAIC روش قطعه‌ای را برای این منظور به کار می‌برد. در این مقاله طرحواره هواویز جدیدی تحت عنوان طرحواره HAM در مدل WRF جفت و اجرا شده، و نتایج حاصل از آن با شبه‌سازی‌های حاصل از طرحواره هواویز MADE موجود در مدل WRF مقایسه شده است. طرحواره هواویز پیشرفته HAM را اشتر و همکاران (۲۰۰۵) در مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک در هامبورگ ساخته‌اند و این طرحواره در حال حاضر در مدل اقلیمی ECHAM5 (رونکنر و همکاران، ۲۰۰۳) اجرا می‌شود. شبه‌سازی پنج نوع اصلی هواویزهای جهانی شامل سولفات، کربن سیاه، مواد آلی، نمک دریا و ذرات گردوغبار در این طرحواره در نظر گرفته شده است. علاوه بر تفاوت در فرمول‌بندی‌های دینامیکی و میکروفیزیکی، طرحواره جدید هواویز HAM در مقایسه با طرحواره هواویز MADE از روش نوینی برای عرضه توزیع اندازه ذرات، موسوم به روش شبه مدال، استفاده می‌کند. به دلیل مشابهت بیشتر این طرحواره با طرحواره MADE، در این مقاله نتایج حاصل از شبه‌سازی‌های طرحواره جدید HAM با شبه‌سازی‌های طرحواره MADE مقایسه شده است.

نخست در بخش ۲ شرح مختصری از فرمول‌بندی‌های به کار رفته در سامانه جفت شده جدید WRF-HAM آورده شده است. سپس به مقایسه شبه‌سازی‌های حاصل از این مدل با شبه‌سازی‌های حاصل از طرحواره MADE

طول موج بلند زمینی تاثیر مستقیمی بر بودجه تابش می‌گذارند (چارسون و همکاران، ۱۹۹۲). از سوی دیگر هواویزها با ایفای نقش به‌منزله هسته‌های میعان، تاثیر بسزایی در تغییر میدان‌های ابر و بارندگی و در نتیجه واداشت تابشی غیرمستقیم سامانه اقلیمی دارند (تومی، ۱۹۹۱ و آلبرشت، ۱۹۸۹). در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه نقش هواویزها در سامانه اقلیمی و مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا صورت گرفته است. روش‌های متعددی برای عرضه ارائه توزیع اندازه ذرات هواویز و فرمول‌بندی‌های دینامیکی و میکروفیزیکی حاکم بر سازوکار این ذرات در جو مطرح شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مدل‌های سه‌بعدی عرضه شده بر مبنای روش قطعه‌ای (یاکوبسن، ۲۰۰۱؛ گنگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ زاوری و همکاران، ۲۰۰۵a و ۲۰۰۵b) و نیز روش‌های مدال مورد استفاده در مدل‌های میان‌مقیاس منطقه‌ای و کنترل کیفی هوا (ایکرمن و همکاران، ۱۹۹۸؛ شل و همکاران، ۲۰۰۱) اشاره کرد. علی‌رغم تلاش‌های گسترده‌ای که در زمینه بررسی هواویزها در سطح جهانی صورت گرفته است، عدم قطعیت‌های نسبتاً بزرگی در تعیین خواص این ذرات و برهم‌کنش‌های آنها با سامانه اقلیمی وجود دارد (IPCC، ۲۰۰۱).

شبه‌سازی دقیق اثرات تابشی هواویزها نیازمند به‌کارگیری مدل‌هایی است که در آنها برهم‌کنش‌های میدان‌های هواشناسی و فرایندهای شیمیایی و هواویزهای جوی در نظر گرفته شوند. ساختار مدولی مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی WRF این مدل را به بستری مناسب برای آزمون طرحواره‌های هواویز گوناگون تبدیل کرده و در نتیجه شرایط لازم برای در نظر گرفتن چنین برهم‌کنش‌های پیچیده‌ای را فراهم آورده است. در سال‌های اخیر، طرحواره‌های هواویز متعددی در نسخه شیمی مدل WRF اجرا و آزمون شده‌اند. در حال حاضر دو طرحواره متفاوت برای شبه‌سازی هواویزها با عنوان طرحواره

که در آن  $N_i$  تعداد ذرات،  $r$  قطر ذره،  $\bar{r}_i$  شعاع متوسط ذره و  $\sigma_i$  انحراف معیار مد  $i$  است. هفت مد به چهار گروه مجزا از نظر اندازه، متشکل از مدهای هسته‌بندی، ایتکن، تجمعی و مد ذرات درشت تقسیم‌بندی می‌شوند. انحراف معیار برای ذرات در مدهای هسته‌بندی، ایتکن و تجمعی برابر با ۱۵۹ میکرومتر و برای مد ذرات برابر با ۲ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود (ویلسون و همکاران، ۲۰۰۱). ذرات هواویز همچنین در دو گروه مجزا از ذرات آمیخته یا محلول و ذرات نامحلول قرار داده می‌شوند. این نوع تقسیم‌بندی اجازه بررسی تحول نم‌گیری (هیگروسکوپیکی) ذراتی که در ابتدا نامحلول هستند را فراهم می‌کند. در این تحقیق پنج مؤلفه اصلی هواویزهای جهانی شامل هواویزهای سولفات، کربن سیاه، کربن آلی، گردوغبار و نمک دریا در نظر گرفته شده است. سه مد در حکم مؤلفه‌های نامحلول در نظر گرفته شده است و چهار مد باقی‌مانده دیگر شامل حداقل یک مؤلفه محلول هستند. ساختار شبه مدال در نظر گرفته شده برای توزیع اندازه ذرات هواویز در جدول ۱ آورده شده است.

پرداخته شده است. نتایج در بخش ۴ مورد بحث قرار گرفته و نتیجه‌گیری‌ها در بخش پایانی آورده شده است.

## ۲ توصیف مدل

در این تحقیق از دومین نسخه شیمی مدل پیش‌بینی عددی و تحقیقاتی WRF به‌مثابه بستر آزمونی جدید برای اجرای طرحواره هواویز HAM استفاده شده است. جزئیات کامل مدل WRF در مقاله گرل و همکاران (۲۰۰۵) آورده شده است. در این بخش فقط به توصیف مختصری از فرایندهای اصلی در نظر گرفته شده در سامانه جفت شده جدید پرداخته می‌شود.

## ۱-۲ توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات هواویز در طرحواره HAM برپایه روشی جدید تحت عنوان روش شبه مدال عرضه می‌شود. طیف توزیع ذرات از برهم‌نهی هفت توزیع لوگ نرمال به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$n(\ln r) = \sum_{i=1}^7 \frac{N_i}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_i}} \exp\left(\frac{-(\ln r - \ln \bar{r}_i)^2}{2 \ln^2 \sigma_i}\right) \quad (1)$$

جدول ۱. ساختار شبه‌مدال طرحواره HAM.  $N_i$  معرف تعداد کلی هواویزها در مد  $i$  و  $M_i^k$  معرف جرم نوع  $k$  ام در مد  $i$  است که (سولفات  $(SU)$ ، کربن سیاه  $(BC)$ ، مواد آلی  $(POM)$ ، نمک دریا  $(SS)$ ، و ذرات گردوغبار  $(DU)$ )  $k \in \{$

	محلول				نامحلول		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
	هسته بندی	ایتکن	تجمعی	درشت	ایتکن	تجمعی	درشت
	$\bar{r} \leq 0.005$	$0.005 < \bar{r} \leq 0.05$	$0.05 < \bar{r} \leq 0.5$	$0.5 < \bar{r}$	$0.005 < \bar{r} \leq 0.05$	$0.05 < \bar{r} \leq 0.5$	$0.5 < \bar{r}$
سولفات	$M_1^{SU}$	$M_2^{SU}$	$M_3^{SU}$	$M_4^{SU}$			
کربن سیاه		$M_2^{BC}$	$M_3^{BC}$	$M_4^{BC}$	$M_5^{BC}$		
کربن آلی		$M_2^{POM}$	$M_3^{POM}$	$M_4^{POM}$	$M_5^{POM}$		
نمک دریا			$M_3^{SS}$	$M_4^{SS}$			
گردوغبار			$M_3^{DU}$	$M_4^{DU}$		$M_6^{DU}$	$M_7^{DU}$
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$

## ۲-۲ مدول میکروفیزیکی

هسته میکروفیزیکی طرحواره هواویز HAM بر مبنای مدل میکروفیزیکی M7 (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴) بنا شده که خود، از نظر فرمول‌بندی‌های دینامیکی و فیزیکی، نسخه بهبود یافته M3+ است. توصیف کامل M7 در مقاله ویگناتی و همکاران (۲۰۰۴) آورده شده است. سه فرایند اصلی میعان، هسته‌بندی و به هم چسبیدگی ذرات در مدول میکروفیزیکی M7 در نظر گرفته شده‌اند.

در نخستین گام، مقدار بیشینه کل سولفات گازی قابل میعان با استفاده از سولفات گازی در دسترس و قابلیت پخش سولفات بر سطح ذرات گوناگون هواویز محاسبه می‌شود (فوکس، ۱۹۵۹). در گام بعد، سولفات فاز گازی باقی‌مانده، در دسترس برای هسته‌بندی ذرات جدید قرار داده می‌شود. در حال حاضر، دو طرحواره متفاوت برای فرایند هسته‌بندی در M7 وجود دارد که عبارت‌اند از طرحواره‌های مبتنی بر روش کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) و وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲). تعداد ذرات هسته‌بندی شده و نیز جرم انتگرالی سولفات هسته‌بندی شده با استفاده از دما، رطوبت نسبی و غلظت سولفات گازی در دسترس بعد از فرایند میعان به دست می‌آیند. در مقایسه با روش کلمالا و همکاران (۱۹۹۸)، طرحواره وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲) بازه گسترده‌تری از شرایط ترمودینامیکی را در بر می‌گیرد.

در M7 اسید سولفوریک گازی روی تمام مدها، اعم از محلول و نامحلول میعان می‌یابد. تمایز بین میعان روی مدهای نامحلول و محلول یا آمیخته با فرض به کارگیری ضرایب جایگیری مجزا  $\alpha = 0.3$  برای مدهای نامحلول و  $\alpha = 1$  برای مدهای آمیخته در نظر گرفته می‌شود. پس از میعان سولفات روی ذرات در مد نامحلول، این ذرات به مدهای آمیخته مربوط انتقال می‌یابند.

توزیع اندازه ذرات می‌تواند در اثر برخورد و همامیزی ذرات نیز تغییر کند. فرایند برخورد و همامیزی در M7 با

در نظر گرفتن حرکت براونی (فوکس، ۱۹۶۴) برای ذرات هواویز وارد می‌شود. ضرایب برخورد برای ذرات در مدهای  $i$  و  $j$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{ij} = \frac{16\pi \tilde{r} \tilde{D}}{4\tilde{D} + \frac{\tilde{r}}{\tilde{v}\tilde{r}} + \frac{\tilde{r}}{\tilde{r} + \tilde{\Delta}}} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $\tilde{D}$ ،  $\tilde{v}$  و  $\tilde{\Delta}$ ، به ترتیب، ضریب پخش، سرعت گرمایی و طول مسیر آزاد متوسط برای یک ذره هواویز با شعاع هندسی معادل با میانگین شعاع‌های هندسی مدهای  $i$  و  $j$ ،  $\tilde{r} = \frac{\tilde{r}_i + \tilde{r}_j}{2}$  است. در M7 علاوه بر برخوردهای میان‌مدی، برخوردهای درون‌مدی نیز در نظر گرفته شده است. ذره حاصل از برخورد درون‌مدی در همان مد باقی می‌ماند، به گونه‌ای که غلظت جرمی کلی آن مد تغییر نمی‌کند، درحالی‌که تعداد ذرات در آن مد کاهش و جرم متوسط ذرات مد افزایش می‌یابد. برای برخورد میان‌مدی، هنگامی که ذره‌ای از مد  $i$  با ذره‌ای از مد درشت‌تر  $j$  برخورد کند، جرم متوسط مد  $i$  به مد  $j$  انتقال می‌یابد. انتقال تعداد و جرم سازگار است، به گونه‌ای که جرم متوسط ذرات در مد  $i$  بدون تغییر باقی می‌ماند، درحالی‌که جرم متوسط در مد  $j$  افزایش می‌یابد. برخوردهای درون‌مدی و میان‌مدی ذرات در مدهای نامحلول تجمعی و مدهای درشت در نظر گرفته نمی‌شوند.

## ۲-۳ فرایندهای حذف ذرات از جو

### ۲-۳-۱ نشست خشک و رسوب‌گذاری

رسوب‌گذاری گرانشی و نشست خشک یا به عبارتی انتقال ذرات هواویز از جو به سطح زمین، دو روش عمده حذف ذرات هواویز جوی است. در این تحقیق، شار ذرات و گازها از جو به سطح زمین از حاصل ضرب غلظت ذرات در پایین‌ترین لایه مدل در سرعت نشست محاسبه می‌شود. سرعت نشست ذرات مشابه با قانون اهم در مدارهای

جدول ۲. پارامتر جاروب‌سازی از پیش تعریف شده  $R$  برای هر مد.

مد	پارامتر جاروب‌سازی $R$
هسته‌بندی آمیخته	۰٫۲۰
ایتکن آمیخته	۰٫۶۰
تجمعی آمیخته	۰٫۹۹
درشت آمیخته	۰٫۹۹
ایتکن نامحلول	۰٫۲۰
تجمعی نامحلول	۰٫۴۰
درشت نامحلول	۰٫۴۰

#### ۲-۴ تاثیر هواویزها بر میدان تابش

خواص نوری ذرات هواویز با استفاده از خواص شیمیایی و اندازه ذرات تعیین می‌شود. در این تحقیق، تنها برهم‌کنش هواویزها با طول موج کوتاه تابشی در نظر گرفته شده است. سه پارامتر ضریب خاموشی، آلیبدو تک پراکنندگی و عامل عدم تقارن برای پراکنندگی تابش طول موج کوتاه خورشیدی به منزله تابعی از طول موج براساس روش عرضه شده فست و همکاران (۲۰۰۶) محاسبه شده است. به‌طور مختصر، برای هر ذره هواویز، یک عدد مختلط به‌منزله شاخص پراکنش تعریف می‌شود، به‌طوری‌که بخش حقیقی این عدد معرف ضریب پراکنش و بخش موهومی مربوط به ضریب جذب نور با ذرات هواویز است. سپس شاخص پراکنش کلی برای هر قطعه اندازه با میانگین‌گیری حجمی محاسبه می‌شود. نظریه مای برای محاسبه ضریب خاموشی، کارایی پراکنندگی و عامل عدم تقارن به‌منزله تابعی از اندازه ذرات متناسب با شعاع مرطوب آنها به کار گرفته می‌شود.

پس از محاسبه خواص نوری ذرات هواویز، اثرات هواویزها بر تابش طول موج کوتاه خورشیدی رسیده از راه انتقال پارامترهای مربوط به داخل طرحواره طول موج کوتاه تابشی گدارد (چو و همکاران، ۱۹۹۸) محاسبه می‌شود.

الکتریکی تعریف می‌شود. این سرعت متناسب با حاصل جمع سه مقاومت مشخصه شامل مقاومت آیرودینامیک، مقاومت زیرلایه‌ای و مقاومت سطحی است. سرعت نشست برای هر نوع هواویز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_d = (r_a + \hat{r}_d + r_a \hat{r}_d \hat{v}_G)^{-1} + \hat{v}_G \quad (3)$$

که  $r_a$  مقاومت سطحی،  $\hat{v}_G$  سرعت رسوب‌گذاری، و  $r_d$  پخش براونی است (اسلین و اسلین، ۱۹۸۰ و پلایم و همکاران، ۱۹۸۴). مقاومت سطحی با استفاده از روش پارامترسازی وسلی (۱۹۸۹) برآورد می‌شود. در این روش، مقاومت سطحی از مقاومت سطوح خاک و گیاهان به دست می‌آید. ویژگی‌های گیاهان با استفاده از داده‌های کاربری اراضی و فصل سال تعیین می‌شود. مقاومت سطحی به ضریب پخش، واکنش‌پذیری و قابلیت حل در آب نیز وابسته است.

#### ۲-۳-۲ نشست مرطوب

نشست مرطوب یا جاروب شدن ذرات با بارندگی، از عمده‌ترین روش‌های حذف ذرات هواویز از جو در شرایط وجود بارندگی است. در این تحقیق از یک روش پارامترسازی ساده برای نشست مرطوب ذرات هواویز استفاده شده است. در این روش، درصد ذرات جاروب شده با استفاده از آهنگ بارندگی خروجی از طرحواره ابر مدل WRF به دست می‌آید. تفکیک بین هوا و آب ابر با استفاده از یک پارامتر جاروب‌سازی  $R$ ، که به اندازه و ترکیب هواویزها بستگی دارد، از پیش تعریف می‌شود (اشتیر و همکاران، ۲۰۰۵). پارامتر  $R$  به‌منزله درصد هواویز در بخش ابری هر جعبه‌گیرید تعریف می‌شود. مقادیر از پیش تعریف شده  $R$  برای هر مد در جدول ۲ آورده شده است.

### ۳ حوزه تحقیقاتی و داده‌های اولیه

#### ۱-۳ شبکه مورد بررسی

تفکیک افقی به کار رفته در شبیه‌سازی‌های این مقاله، شبکه‌ای ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر برای منطقه‌ای شامل ایران، جنوب غرب آسیا، شمال آفریقا و بخش‌هایی از اروپا است. مدل ۳۱ تراز در راستای قائم تا ارتفاع ۱۶ کیلومتری از تراز متوسط دریاها را پوشش می‌دهد. دوره شبیه‌سازی یک‌هفته‌ای از ۶ مه تا ۱۱ مه سال ۲۰۰۶ به‌منزله دوره‌ای با مقادیر زیاد ذرات هواویز  $PM_{10}$  به‌ویژه در منطقه تهران انتخاب شده است. شرایط آغازی و شرایط مرزی برای میدان‌های هواشناسی از داده‌های باز تحلیل شده ۶ ساعته NCEP-GFS (قابل دسترس در: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>) استخراج شده است. برای هواویزها از شرایط آغازی افقی یکنواخت در کل حوزه بر مبنای مقدار  $PM_{10}$  اندازه‌گیری شده در تهران استفاده شده است. جدول ۳ فهرست طرحواره‌های گوناگون فیزیکی و شیمیایی به کار رفته در این تحقیق را به‌دست می‌دهد.

#### ۲-۳ شار گسیل ذرات

اطلاعات مربوط به آهنگ گسیل ذرات هواویز از منبع‌های متفاوت و توزیع افقی و قائم ذرات برای پنج نوع

هواویز به کار رفته در این تحقیق از داده‌های از پیش تعریف شده AEROCOM در سال ۲۰۰۰ (قابل دسترس از: <http://nansen.ipsl.jussieu.fr/AEROCOM/>) (دنتر و همکاران، ۲۰۰۶) استخراج شده است. به استثنای هواویز سولفات، گسیل همه ذرات به صورت گسیل اولیه در نظر گرفته می‌شود. به این معنی که همه ذرات مستقیماً از سطح به جو وارد می‌شوند. به منظور ساده‌سازی در این تحقیق مقادیر شار گسیل برای همه ذرات هواویز در طول دوره شبیه‌سازی ثابت و برابر با اندازه متوسط در ماه مه در نظر گرفته شده است. شکل ۱ شار گسیل ذرات هواویز از سطح به جو از منبع‌های گوناگون برای پنج نوع هواویز به کار رفته در مدل، به‌علاوه مجموع شار گسیل کل ذرات تحت عنوان شار گسیل ذرات  $PM_{10}$  را در دوره شبیه‌سازی نمایش می‌دهد. شکل ۱-الف توزیع شار گسیل ذرات سولفات از منبع‌های بشرساخته شامل چشمه‌های صنعتی، نیروگاه‌ها، کشتی‌رانی، ترافیک جاده‌ای و سوخت‌های خانگی را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر بزرگ‌تر شار گسیل ذرات هواویز سولفات روی مناطق صنعتی اروپا متمرکز است. شار گسیل هواویزهای کربن سیاه و کربن آلی حاصل از سوخت‌های فسیلی و سوخت‌های آلی در شکل‌های ۱-ب و ۱-ج نشان داده شده است.

جدول ۳. طرحواره‌های فیزیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های مدل.

منابع	طرحواره به کار رفته	فرایندهای جوی
ملاور و همکاران، ۱۹۹۷	RRTM	تابش موج بلند
چو و همکاران، ۱۹۹۶	Goddard	تابش موج کوتاه
مونین و اوبوخف، ۱۹۵۴	Monin - Obukhov	لایه سطحی
اسکامارک و همکاران، ۲۰۰۵	Thermal diffusion	طرحواره سطح
هنگ و همکاران، ۲۰۰۶	YSU	لایه مرزی
گرل و دونی، ۲۰۰۲	Grell - Devenyi	طرحواره همرفت
-	خاموش	میکروفیزیک ابر
چانگ و همکاران، ۱۹۸۹	RADM2	شیمی فاز گازی
اشتیر و همکاران، ۲۰۰۵	HAM	طرحواره هواویز
وایلد و همکاران، ۲۰۰۰؛ برنارد و همکاران، ۲۰۰۴a	Fast - J	تجزیه تابشی

باز هم تمرکز این ذرات روی نواحی صنعتی از جمله منطقه تهران به دلیل توسعه منبع‌های بشرساخته سوخت‌های فسیلی حاصل از حمل‌ونقل و ترافیک جاده‌ای به‌خوبی دیده می‌شود. شکل ۱-د توزیع شار گسیل ذرات گرد و غبار از منبع‌های طبیعی را با تمرکز روی مناطق بیابانی واقع بر شمال آفریقا، عربستان، عراق و بخش‌هایی از جنوب شرق ایران نشان می‌دهد. این شکل نمک دریا را با تمرکز روی اقیانوس‌ها و آب‌ها نشان می‌دهد. شار گسیل هواویزهای نمک دریا از چشمه‌های طبیعی در شکل ۱-ه نشان داده شده است. تمرکز این ذرات روی آب‌ها و اقیانوس‌ها به‌خوبی در این شکل دیده می‌شود. مجموع شار گسیل پنج نوع ذرات هواویز در کل حوزه در شکل ۱-و نشان داده شده است. با توجه به این شکل و مقایسه شار گسیل ذرات گوناگون، مشخص است که مقادیر شارهای گسیل ذرات گرد و غبار و نمک دریا از منبع‌های طبیعی، بیشترین مقادیر گسیل را در حوزه مورد بررسی به خود اختصاص می‌دهند و نقش قابل ملاحظه‌ای در شار گسیل ذرات  $PM_{10}$  دارند، درحالی‌که مقادیر شار گسیل هواویزهای بشرساخته سولفات و کربنات‌ها به مراتب کمتر از این مقادیر است.

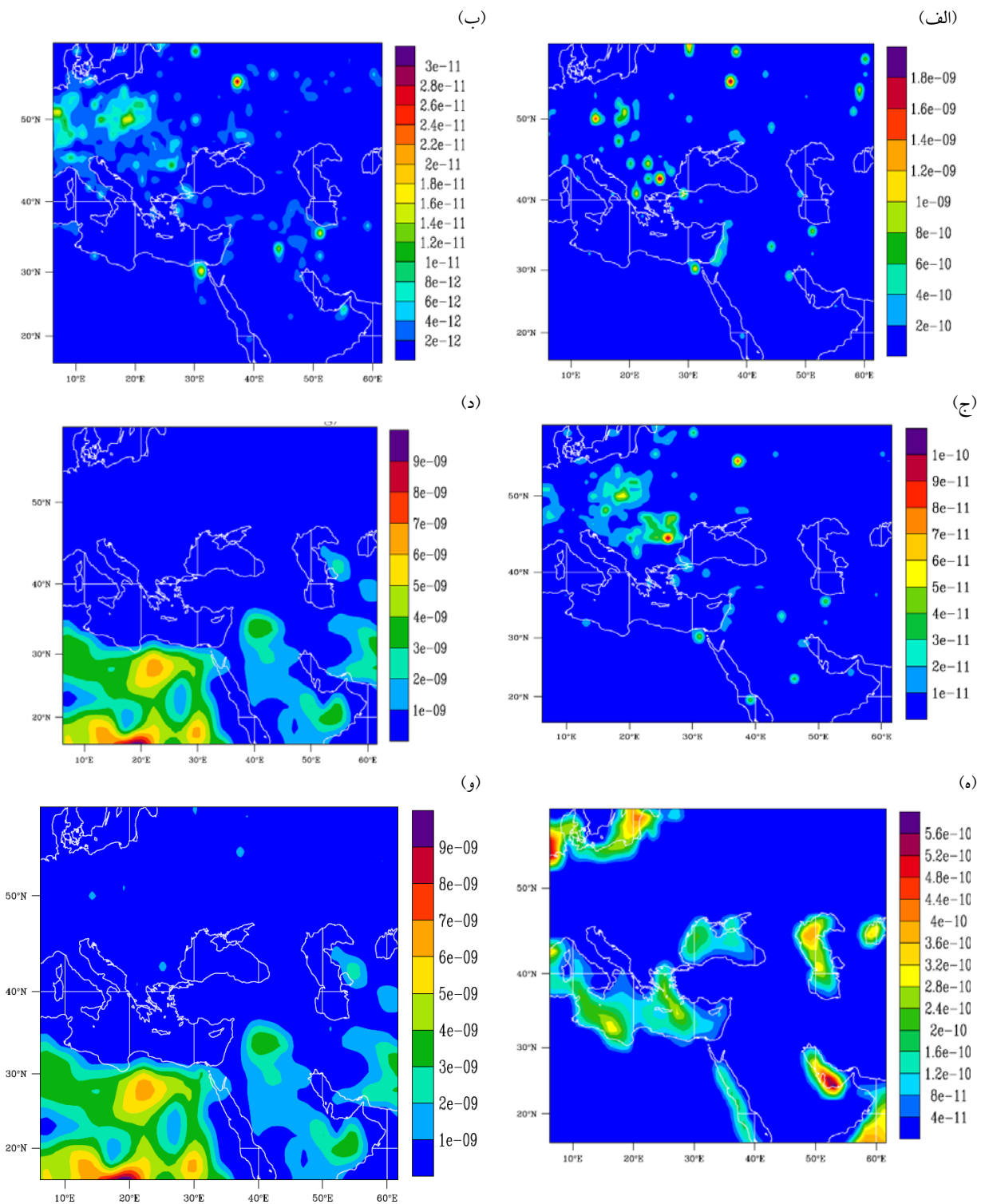
#### ۴ نتایج

##### ۴-۱ چرخه شبانه‌روزی ذرات $PM_{10}$

ذرات  $PM_{10}$  که به کلیه ذرات معلق موجود در هوا با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر اطلاق می‌شود، از عمده‌ترین ذرات آلاینده در شهرهای آلوده، صنعتی و پرجمعیت است. در این بخش مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی شده  $PM_{10}$  و اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده در شهر تهران به‌مثابه منطقه‌ای صنعتی و آلوده صورت گرفته است. اندازه ذرات  $PM_{10}$  از متوسط‌گیری مقادیر در چهار ایستگاه سنجش آلودگی در دسترس در سطح تهران از

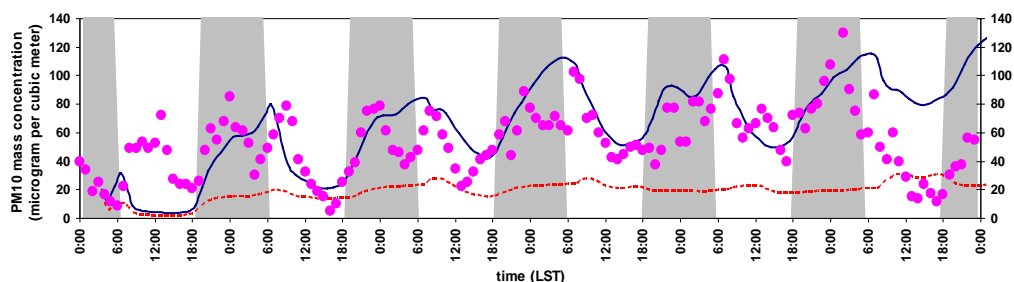
داده‌های شرکت کنترل کیفی هوای تهران به‌دست آمده‌اند. مقدار  $PM_{10}$  شبیه‌سازی شده از جمع پنج نوع هواویز سولفات، کربن سیاه، کربن آلی، نمک دریا و ذرات گردوغبار شبیه‌سازی شده در مدل محاسبه شده است. تغییرات شبانه‌روزی غلظت جرمی  $PM_{10}$  شبیه‌سازی شده حاصل از دو طرحواره HAM و MADE به همراه مقادیر مشاهداتی در طول دوره شبیه‌سازی در منطقه تهران در شکل ۲ نشان داده شده است. توافق نسبتاً خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده از طرحواره HAM و مشاهدات وجود دارد، درحالی‌که مقادیر شبیه‌سازی شده با طرحواره MADE از مقادیر مشاهداتی به مراتب کوچک‌تر است. این تفاوت در شبیه‌سازی‌های دو طرحواره را می‌توان به تفاوت در سرعت نشست محاسبه شده در دو طرحواره مربوط دانست. در طرحواره MADE در هر گام زمانی حدود ۵۰٪ از ذرات هواویز، به‌ویژه در مدهای درشت با فرایندهای نشست خشک و رسوب‌گذاری از جو حذف می‌شوند. از آنجا که بخش اعظم جرم ذرات  $PM_{10}$  در منطقه تهران مربوط به گسیل ذرات گرد و غبار در مدهای درشت است، کوچک‌تر بودن اندازه‌های شبیه‌سازی شده  $PM_{10}$  با طرحواره MADE به حذف نسبتاً سریع ذرات گرد و غبار در مدهای درشت در این طرحواره نسبت به طرحواره HAM بر می‌گردد. سرعت نشست خشک محاسبه شده در طرحواره HAM برای مدهای درشت از این مقدار در طرحواره MADE کوچک‌تر است و این مسئله عملکرد بهتر طرحواره جدید HAM و در نتیجه بهبود شبیه‌سازی‌های ذرات  $PM_{10}$  حداقل در منطقه تهران در این تحقیق را به همراه دارد. با مشاهده نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های طرحواره HAM ملاحظه می‌شود که مقادیر غلظت جرمی و نیز روند تغییرات شبانه‌روزی ذرات  $PM_{10}$  توافق نسبتاً خوبی با مشاهدات دارند.





شکل ۱. شار گسیل هواویزهای (الف) سولفات، (ب) کربن سیاه، (ج) کربن آلی، (د) ذرات گردوغبار، (ه) نمک دریا و (و) ذرات  $PM_{10}$  از منابع‌های متفاوت

طبیعی و بشرساخته به صورت متوسط ماهانه در ماه مه.



شکل ۲. چرخه شبانه‌روزی غلظت جرمی ذرات  $PM_{10}$  مشاهداتی (دایره های توپر) و مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل جفت شده جدید WRF-HAM (خط پر) و مدل WRF-MADE (خط چین) در منطقه تهران در دوره شبیه‌سازی از ۶ تا ۱۲ مه سال ۲۰۰۶.

استفاده در شبیه‌سازی‌های مدل قادر به در نظر گرفتن اثرات محلی نیست.

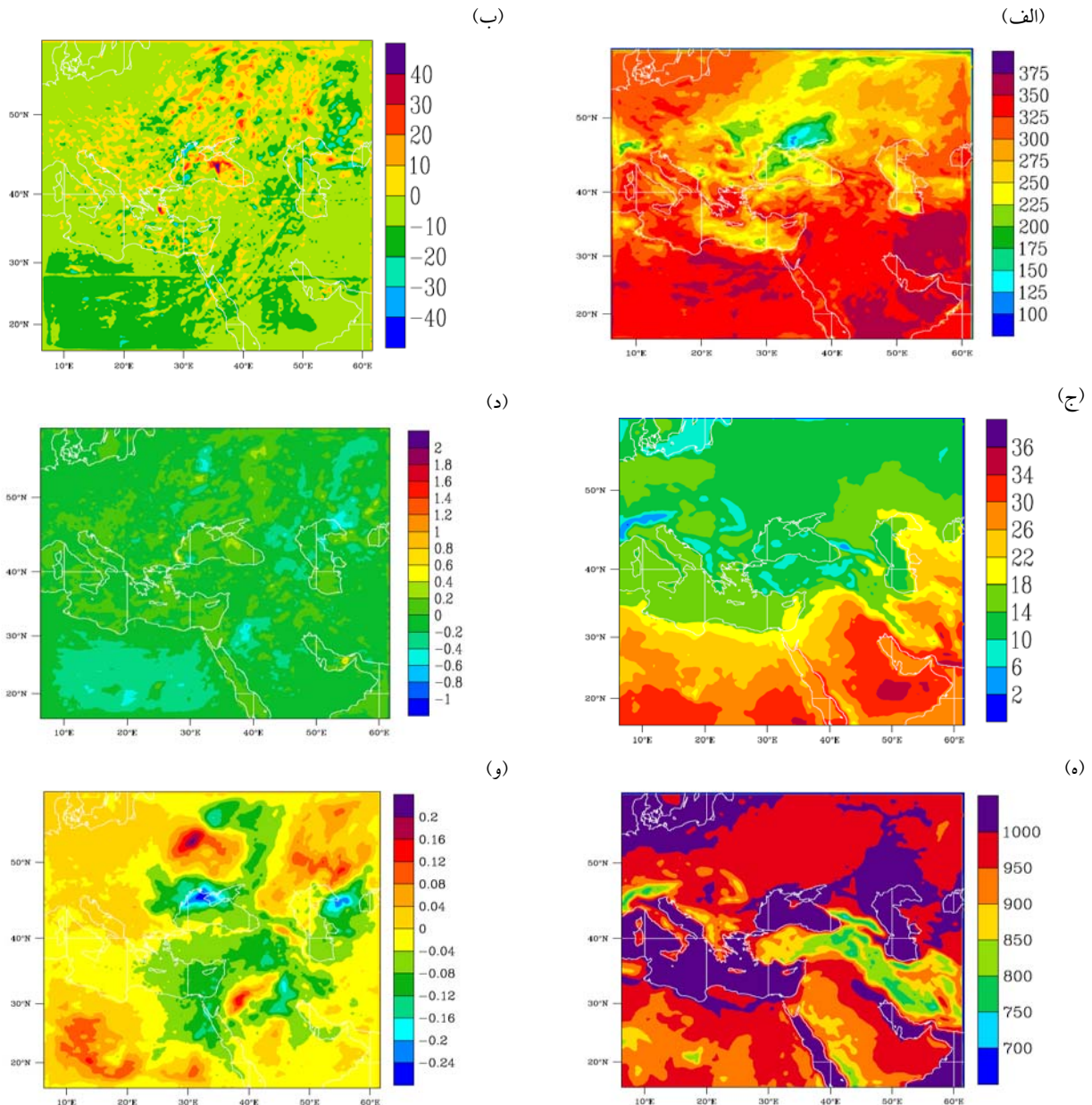
#### ۴-۲ واداشت تابشی هواویزها

در این بخش به بررسی واداشت ناشی از هواویزها و تاثیر این ذرات بر میدان‌های هواشناسی تابش، دما و فشار جوی در مدل جفت شده WRF-HAM می‌پردازیم. توزیع مکانی متوسط شش‌روزه تابش طول موج کوتاه پایین‌سو، دما در دو متری بالای سطح و فشار سطحی شبیه‌سازی شده با مدل WRF-HAM به همراه تفاوت این مقادیر با شبیه‌سازی‌های اجرا شده بدون در نظر گرفتن هواویزها در حوزه تحقیقاتی در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳-ب وجود یک واداشت تابشی منفی را در قسمت جنوب غرب حوزه منطبق بر مناطق دارای گسیل زیاد ذرات گردوغبار نشان می‌دهد. اندازه این واداشت تابشی روی بیابان‌های شمال آفریقا از ۱۵- وات بر متر مربع نیز تجاوز می‌کند. در این شکل برخی از مناطق با مقادیر واداشت تابشی مثبت ناشی از اثرات جذبی نسبتاً قوی ذرات کربن سیاه از منبع‌های بشرساخته نیز وجود دارند. با توجه به شکل ۳-د ملاحظه می‌شود که وجود هواویزهای گردوغبار منجر به کاهش دمای متوسط شبیه‌سازی شده تا مقدار ۰٫۶ سانتی‌گراد نیز شده است. وجود اثر گرمایشی

در روز پایانی دوره شبیه‌سازی (۱۲ مه ۲۰۰۶) مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت جرمی با مدل از مقادیر مشاهداتی  $PM_{10}$  کوچک‌تر است. این مسئله به ضعف مدل WRF در پیش‌بینی مقادیر بارندگی و در نتیجه ایجاد خطا در میزان نشست مرطوب ذرات در این روز باز می‌گردد. مقدار شبیه‌سازی شده بارندگی در این روز برابر با یک میلی‌متر است که از مقدار واقعی بارش گزارش شده در این روز (۱۶ میلی‌متر) به مراتب کوچک‌تر است. تفاوت دیگر نتایج مدل و مشاهدات در شبیه‌سازی زمان وقوع بیشینه و کمینه  $PM_{10}$  است. بیشینه مقدار  $PM_{10}$  شبیه‌سازی شده در ساعت‌های آغازی روز (حدود ساعت ۶ صبح محلی) رخ می‌دهد و به تدریج با افزایش ناپایداری‌ها و رشد لایه مرزی همرفتی از غلظت آن کاسته می‌شود و در اواسط بعدازظهر به مقدار کمینه خود می‌رسد. مشاهدات، وجود دو بیشینه و دو کمینه را در چرخه شبانه‌روزی  $PM_{10}$  نشان می‌دهند. این رفتار مشاهده شده در روند تغییرات شبانه‌روزی غلظت جرمی ذرات  $PM_{10}$  به گسیل محلی ذرات هواویز بشرساخته سولفات و کربنات‌ها در منطقه تهران، به‌ویژه ترافیک جاده‌ای مربوط است که در حال حاضر در مدل در نظر گرفته نشده است. بخشی از این تفاوت‌ها را نیز می‌توان به تفکیک فضایی به کار رفته در مدل مربوط دانست. شبکه افقی ۳۰ کیلومتری مورد

تأثیرات در شکل ۳- و به صورت افزایش ۱۲۰ تا ۱۵۰ پاسکالی فشار ناشی از اثرات سرمایشی ذرات گردوغبار روی صحراهای شمال آفریقا و عراق دیده می‌شود. کاهش فشار ناشی از گرمایش ایجاد شده توسط ذرات کربن سیاه در حوزه شبیه‌سازی نیز به‌ویژه روی سواحل شمالی دریای سیاه در شکل مشاهده می‌شود.

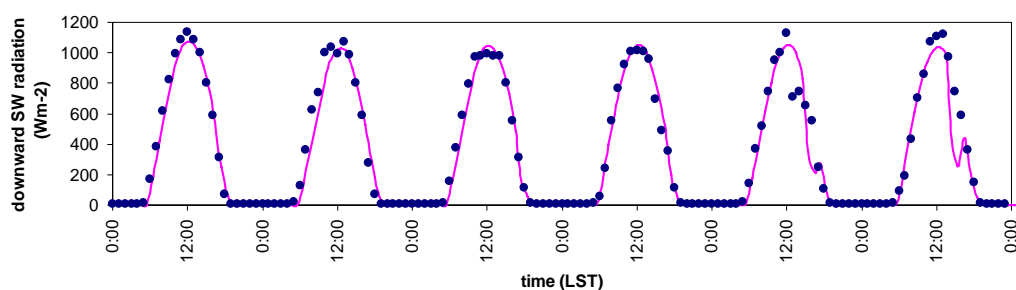
بیش از ۵ ر ۰ سانتی‌گراد روی خلیج فارس به دلیل اثرات جذبی قوی کربن سیاه تولید شده از سوخت‌های فسیلی در این منطقه نیز در این شکل قابل ملاحظه است. مقایسه میانگین مقادیر شبیه‌سازی فشار سطحی نشان می‌دهد که وارد کردن هواویزها در مدل، به صورت غیرمستقیم بر میدان فشار شبیه‌سازی شده نیز تأثیرگذار است. این



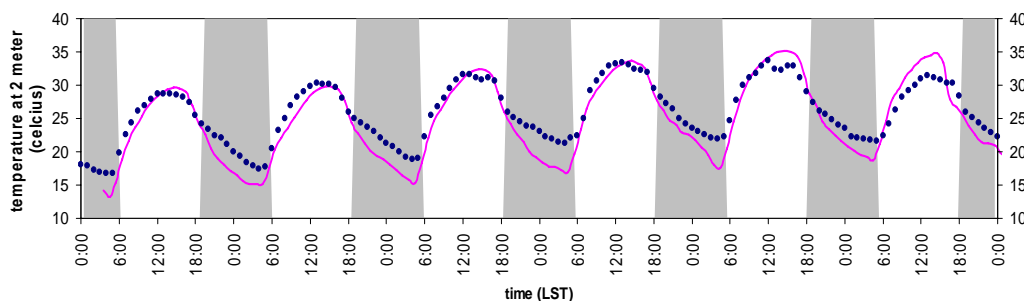
شکل ۳. توزیع مکانی میانگین شش‌روزه (الف) شار طول موج کوتاه پایین‌سو، (ج) دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح و (ه) فشار سطحی شبیه‌سازی شده از مدل WRF-HAM به همراه توزیع مکانی تفاضل شبیه‌سازی‌های (ب) میدان تابش موج کوتاه، (د) دمای دو متری جو و (ز) فشار سطحی با هواویزها و بدون آنها.

نشان می‌دهند. در روز نخست شبیه‌سازی (روز ۶ مه)، میزان ابرناکی و بارندگی شبیه‌سازی شده برای نقطه شبکه‌ای تهران بیشتر از مقادیر گزارش شده از ایستگاه تهران است، که این مسئله منجر به کاهش قابل‌ملاحظه تابش طول موج کوتاه در مدل شده است. اندازه کوچک‌تر شار تابش طول موج کوتاه شبیه‌سازی شده نسبت به مشاهدات در روز پایانی نیز به فرایرد غلظت ذرات  $PM_{10}$  با مدل در این روز بر می‌گردد که منجر به پراکندگی بیشتر تابش موج کوتاه پایین سو نسبت به مقادیر واقعی می‌شود.

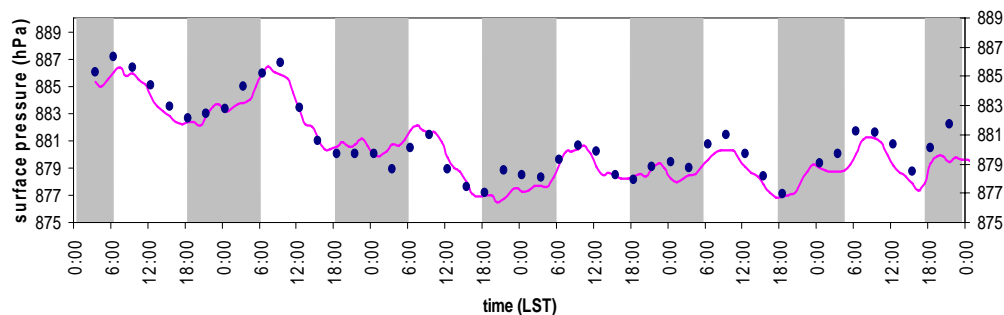
در ادامه به مقایسه شبیه‌سازی‌های نقطه‌ای متغیرهای هواشناسی در منطقه تهران می‌پردازیم. شکل ۴ تغییرات زمانی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حاصل از مدل جفت شده WRF-HAM برای شار طول موج کوتاه پایین سوی رسیده به سطح، دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح و فشار سطحی را در طول دوره شبیه‌سازی در منطقه تهران نشان می‌دهد. مقادیر شبیه‌سازی شده طول موج کوتاه تابشی حاصل از طرحواره HAM در بیشتر موارد، به استثنای روز نخست و روز پایانی دوره شبیه‌سازی، توافق نسبتاً خوبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده



(الف)



(ب)



(ج)

**شکل ۴:** تغییرات شبانه‌روزی (الف) شار تابش طول موج کوتاه پایین‌سو، (ب) دمای جو در ارتفاع دو متری از سطح و (ج) فشار سطحی مشاهداتی (دایره‌های پر) و شبیه‌سازی حاصل از مدل WRF-HAM (خط پر) در منطقه تهران در طول دوره شبیه‌سازی (۱۱-۵ مه ۲۰۰۶).

کمیت‌ها با مقادیر مشاهداتی در شبیه‌سازی‌های حاصل از طرحواره HAM نسبت به طرحواره MADE کمتر است، که این نیز به نوعی بهبود حاصل شده با طرحواره جدید HAM را در مدل WRF نسبت به طرحواره هواویز MADE موجود در این مدل نشان می‌دهد. برای مثال ملاحظه می‌شود که در روز چهارم شبیه‌سازی (روز ۸ مه)، تفاوت مقدار متوسط شار تابش موج کوتاه شبیه‌سازی شده با مشاهدات بدون در نظر گرفتن هواویزها برابر با ۵۵ وات بر مترمربع و با استفاده از طرحواره MADE ۵۳ وات بر مترمربع است، در حالی که این تفاوت در طرحواره HAM به دلیل پراکندگی ناشی از هواویزها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و به مقدار ۳۲ وات بر مترمربع می‌رسد. به‌طور کلی طرحواره MADE به دلیل شبیه‌سازی مقادیر کمتری از ذرات هواویز نسبت به طرحواره HAM، مقادیر بزرگ‌تری از شار تابش طول موج کوتاه را نسبت به طرحواره HAM نشان می‌دهد. اگرچه تاثیر هواویزها بر میدان‌های شبیه‌سازی شده متوسط روزانه دما و فشار در تهران در برخی از روزها چندان قابل ملاحظه نیست، ولی مقایسه مقادیر نشان از بیشتر شدن این تاثیر در روزهای آخر شبیه‌سازی در مدل دارد.

روند تغییرات شبانه‌روزی دمای شبیه‌سازی شده در تهران توافق نسبتاً خوبی با مشاهدات دارد، اگرچه سرمایش شبانه در مدل در طول دوره شبیه‌سازی مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به مشاهدات نشان می‌دهند (شکل ۴-ب). این تفاوت را می‌توان به تفکیک فضایی نسبتاً کم مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها (۳۰ کیلومتر) مربوط دانست. مقادیر فشار سطحی نیز توافق نسبتاً خوبی با مشاهدات سه‌ساعته فشار از ایستگاه‌های همدیدی در منطقه تهران دارند. در جدول ۴ مقایسه‌ای بین مقادیر متوسط روزانه کمیت‌های شار تابش طول موج کوتاه، دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح و فشار سطحی شبیه‌سازی شده با مدل با دو طرحواره HAM و MADE و نیز بدون در نظر گرفتن ذرات هواویز صورت گرفته است. مقادیر عرضه شده در این جدول تفاضل مقادیر متوسط روزانه هریک از این شبیه‌سازی‌ها از مشاهدات مربوط هستند. با مقایسه مقادیر جدول ۴ مشخص است که وارد کردن هواویزها در مدل بهبود قابل ملاحظه‌ای در شبیه‌سازی مقادیر متوسط روزانه کمیت‌های دما، فشار سطحی و به‌ویژه شار تابش موج کوتاه پایین‌سو ایجاد می‌کند. از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که تفاوت این

جدول ۴. مقایسه تفاوت متوسط روزانه شبیه‌سازی‌های حاصل از دو طرحواره HAM و MADE با مشاهدات در تهران.

۱۱ مه	۱۰ مه	۹ مه	۸ مه	۷ مه	۶ مه	
۴۷	۸۸	۵۲	۵۵	۲۵	۱۹	تفاضل تابش موج کوتاه بدون هواویزها و مشاهدات ( $Wm^{-2}$ )
-۳	۷۸	۳۲	۳۸	۱۳	۱۲	تفاضل تابش موج کوتاه از HAM و مشاهدات ( $Wm^{-2}$ )
۷	۸۶	۴۲	۵۳	۲۱	۱۵	تفاضل تابش موج کوتاه از MADE و مشاهدات ( $Wm^{-2}$ )
۲۲۵	۳۳۵	۲۲۸	۲۳۴	۱۸۷	۱۴۵	تفاضل دمای جو بدون هواویزها و مشاهدات ( $^{\circ}C$ )
-۰٫۰۵	۲۴۷	۱۸۸	۱۹۶	۰۹۷	۰۹۵	تفاضل دمای جو از HAM و مشاهدات ( $^{\circ}C$ )
۰٫۴۵	۳۳۱	۲۲۳	۲۳	۱۵۵	۱۰۵	تفاضل دمای جو از MADE و مشاهدات ( $^{\circ}C$ )
۰٫۹۱	۰٫۷۹	۰٫۳۹	۰٫۶۳	۰٫۵۶	۰٫۴۳	تفاضل فشار سطحی بدون هواویزها و مشاهدات (hPa)
۰٫۸۳	۰٫۶۷	۰٫۲۴	۰٫۵۷	۰٫۴۶	۰٫۳۸	تفاضل فشار سطحی از HAM و مشاهدات (hPa)
۰٫۸۹	۰٫۷۲	۰٫۳۱	۰٫۶۱	۰٫۵۲	۰٫۴	تفاضل فشار سطحی از MADE و مشاهدات (hPa)

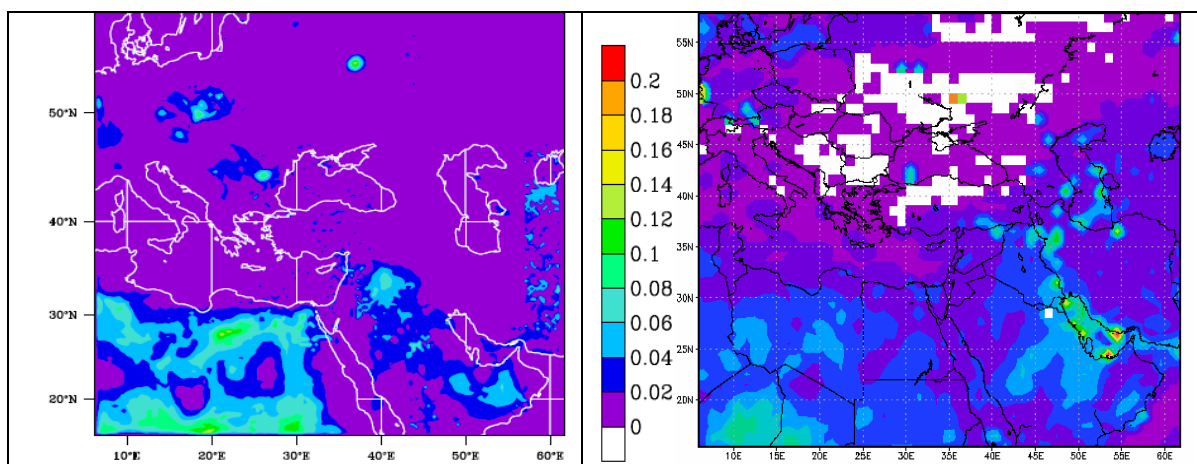
## ۳-۴ عمق نوری هواویزها (AOD)

عمق نوری هواویزها متناسب با لگاریتم درصد نور جذب شده یا پراکنده شده با ذرات هواویز موجود در جو تعریف می‌شود و معیاری از شفافیت جو است. به عبارتی این پارامتر می‌تواند به نوعی میزان هواویزهای موجود در جو را در یک ستون هوا نشان دهد. توزیع مکانی متوسط شش‌روزه عمق نوری هواویز شبیه سازی شده حاصل از طرحواره جدید WRF-HAM در طول دوره شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی به دست آمده از تصاویر ماهواره MODIS در طول موج ۵۰۰ نانومتر در شکل ۵ مقایسه شده است. نواحی سفید رنگ در تصویر ماهواره در شکل ۵-ب مربوط به پیکسل‌هایی است که دارای مقادیر مشاهداتی قابل قبولی برای عمق نوری هواویزها نیستند. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، مقادیر شبیه‌سازی شده عمق نوری هواویزها و نیز توزیع مکانی این مقادیر توافق نسبتاً خوبی با مشاهدات ماهواره نشان می‌دهد. به منظور مقایسه عملکرد دو طرحواره، عمق نوری شبیه‌سازی شده حاصل از دو طرحواره هواویز HAM و MADE

مدل WRF در طول موج ۵۰۰ نانومتر نیز با مقادیر مشاهداتی قابل دسترس از شبکه AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) برای ایستگاه سولار ویلیج (واقع در ۲۴ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۵ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۲۳ دقیقه و ۴۹ ثانیه شرقی) که دارای اطلاعات نسبتاً کاملی از خواص نوری هواویزها در دوره شبیه‌سازی ۶ تا ۱۱ مه سال ۲۰۰۶ است، مقایسه شده است (شکل ۶). مقادیر عمق نوری شبیه‌سازی شده با طرحواره هواویز HAM به دلیل محاسبه سرعت‌های نشست کمتر و در نتیجه وجود هواویزهای بیشتر در این طرحواره، نسبت به شبیه‌سازی‌های طرحواره MADE، بزرگ‌ترند. به استثنای روز آخر شبیه‌سازی، توافق نسبتاً خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌های حاصل از طرحواره HAM به چشم می‌خورد. مقایسه نتایج حاصل از دو طرحواره روشن می‌سازد که طرحواره هواویز HAM در شبیه‌سازی عمق نوری هواویزها نیز عملکرد مناسب‌تری نسبت به طرحواره MADE نشان می‌دهد.

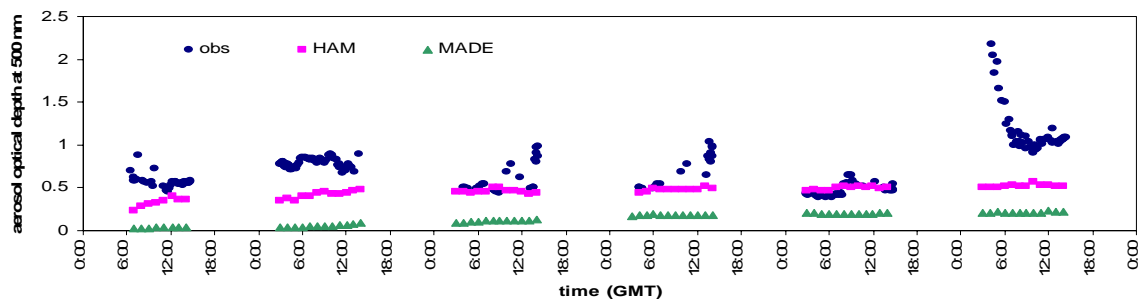
(الف)

(ب)



شکل ۵. توزیع مکانی مقادیر متوسط ۶ روزه عمق نوری هواویزها در دوره شبیه‌سازی در طول موج ۵۰۰ نانومتر (الف) حاصل از مشاهدات ماهواره MODIS، و (ب) مقادیر متوسط شبیه‌سازی شده با مدل WRF-HAM.





شکل ۶. تغییرات زمانی عمق نوری مشاهداتی (دایره) در طول موج ۵۰۰ نانومتری و مقادیر شبیه‌سازی شده از طرحواره HAM (مربع) و طرحواره MADE (مثلث) در ایستگاه سولار ویلیج.

کربن سیاه با جذب طول موج کوتاه باعث ایجاد واداشت مثبت و اثرات گرمایشی می‌شوند. تغییراتی نیز در میدان فشار سطحی شبیه‌سازی شده تحت تاثیر هواویزها ایجاد می‌شود. در نظر گرفتن هواویزها در مدل WRF منجر به کاهش تفاوت مقادیر شبیه‌سازی شده شار تابش سطحی و مقادیر مشاهداتی در منطقه تهران می‌شود. بهبود ایجاد شده با طرحواره HAM نسبت به طرحواره MADE قابل ملاحظه‌تر است. مدل جفت شده جدید در شبیه‌سازی توزیع مکانی و متوسط روزانه عمق نوری هواویزها در طول موج ۵۰۰ نانومتری مشاهده شده با ماهواره نیز به خوبی عمل می‌کند. عمق نوری شبیه‌سازی شده هواویزها در همین طول موج، توافق خوبی با مقادیر مشاهداتی در ایستگاه سولار ویلیج از داده‌های شبکه هواویز جهانی AERONET نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده عمق نوری حاصل از دو طرحواره در این ایستگاه نیز نشان از برتری قابل ملاحظه طرحواره جدید HAM نسبت به طرحواره هواویز MADE دارد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از سازمان هواشناسی کشور، شرکت کنترل کیفی هوای تهران و نیز مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک در آلمان بابت فراهم آوردن اطلاعات، داده‌ها و

#### ۵ بحث و نتیجه‌گیری

سامانه جفت شده جدید هواویز HAM و مدل میان‌مقیاس WRF معرفی شد و نتایج اولیه حاصل از شبیه‌سازی‌های حاصل از آن با طرحواره هواویز MADE موجود در مدل WRF و نیز مشاهدات مورد مقایسه قرار گرفت. مدل جفت شده جدید بهبود قابل ملاحظه‌ای را در شبیه‌سازی چرخه شبانه‌روزی و نیز اندازه غلظت جرمی ذرات  $PM_{10}$  در منطقه تهران نشان داده است. عملکرد بهتر طرحواره هواویز HAM نسبت به طرحواره MADE در این زمینه را می‌توان به محاسبه سرعت‌های نشست کوچک‌تر در مدهای درشت در این طرحواره نسبت به طرحواره MADE مربوط دانست. ناتوانی مدل در شبیه‌سازی دقیق زمان پیشینه و کمینه‌های شبانه‌روزی مشاهده شده، تا حدی به تفکیک فضایی نسبتاً بزرگ مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های مدل و نیز رفتار محلی گسیل هواویزهای سولفات و کربنات، به ویژه ناشی از ترافیک جاده‌ای در منطقه تهران مرتبط است. در نظر گرفتن هواویزها در شبیه‌سازی‌های مدل WRF، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در برخی از میدان‌های هواشناسی، به ویژه تابش موج کوتاه پایین‌سو ایجاد می‌کند. ذرات گردوغبار منجر به تولید واداشت تابشی منفی و اثرات سرمایشی و هواویزهای

- direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model: *J. Geophys. Res.*, **111**, D21305, doi:10.1029/2005JD006721.
- Fuchs, N. A., 1959, *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media*, Pergamon, Tarrytown, New York.
- Fuchs, N. A., 1964, *The Mechanics of Aerosols*, Pergamon press, Oxford.
- Gong, S. L., Barrie, L. A., Blanchet, J. P., von Salzen, K., Lohmann, U., Lesins, G., Spacek, L., Zhang, L. M., Girard, E., Lin, H., Leitch, R., Leighton, H., Chylek, P. and Huang, P., 2003, Canadian Aerosol Module: A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models: 1. Module development: *J. Geophys. Res.*, **108**(D1), 4007, doi:10.1029/2001JD002002.
- Grell, G. A. and Devenyi, D., 2002, A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques: *Geoph. Res. Let.*, **29**(14), 10.1029/2002GL015311.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., and Eder, B., 2005, Fully coupled "online" chemistry within the WRF model: *Atmos. Environ.*, **39**, 6957-6975.
- Hong, S. Y., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Weather Rev.*, **134**, 2318-2341.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001- The Scientific Basis*, J. T. Houghton, (Ed.), Cambridge Univ. Press, 2001.
- Jacobson, M. Z., 2001, Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols: *J. Geophys. Res.*, **106**, 1551-1568.
- Kulmala, M., Laaksonen, A. and Pirjola, L., 1998, Parameterizations for sulfuric acid/water nucleation rates: *J. Geophys. Res.*, **103**, 8301-8307.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-K model for longwave: *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682.
- Monin, A. S. and Obukhov, A. M., 1954, Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Trans. Geophys. Inst. Akad. Nauk USSR*, **151**, 163-187.
- Pleim, J. E., Venkatram, A. and Yamartino, R., 1984, ADOM/TADAP Model Development
- کدهای مورد نیاز برای اجرای این طرح تحقیقاتی تشکر می کنند.
- منابع
- Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S. and Shankar, U., 1998, Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications: *Atmos. Environ.*, **32**, 2981-2999.
- Albrecht, B. A., 1989, Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, **245**, 1227-1230.
- Barnard, J. C., Chapman, E. G., Fast, J. D., Schemlzer, J. R., Slusser, J. R. and Shetter, 2004a, An evaluation of the FAST-J photolysis algorithm for predicting Nitrogen Dioxide photolysis rates under clear and cloudy sky conditions: *Atmos. Environ.*, **38**, 3393-3403.
- Chang, J. S., Binkowski, F. S., Seaman, N. L., McHenry, J. N., Samson, P. J., Stockwell, W. R., Walcek, C. J., Madornich, S., Middleton, P. B., Pleim, J. E. and Lansford, H. H., 1998, The regional acid deposition model and engineering model, State-of-Science/Technology, Report No. 4, National Acid Precipitation Assessment Program, Washington D. C.
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley Jr., J. A., Hansen, J. E. and Hofmann, D. J., 1992, Climate forcing by anthropogenic aerosols: *Science*: **255**, 423-430.
- Chou, M. D., Suarez, M. J., Ho, C. H., Yan, M. M. H. and Lee, K. T., 1998, Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models: *J. Climate.*, **11**, 202-214.
- Dentener, F., Kinne, S., Bond, T., Boucher, O., Cofala, J., Generoso, S., Ginoux, P., Gong, S., Hoelzmann, J. J., Ito, A., Marelli, L., Penner, J. E., Putaud, J. P., Textor, C., Schulz, M., van der Werf, G. R. and Wilson, J., 2006, Emissions of primary aerosol and precursor gases in the years 2000 and 1750 prescribed data-sets for AeroCom: *J. Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 4321-4344.
- Fast, J. D., Gustafson, W. I., Easter, Jr. R. C., Zaveri, R. A., Barnard, J. C., Chapman, E. G., Grell, G. A. and Peckham, S. E., 2006, Evolution of ozone, particulates, and aerosol



- Wilson, J., Cuvelier, C. and Raes, F., 2001, A modeling study of global mixed aerosol fields: *J. Geophys. Res.*, **106**, 34081-34108.
- Wesely, M. L., 1989, Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional numerical models: *Atmos. Environ.*, **16**, 1293-1304.
- Zaveri, R. A., Easter, R. C. and Wexler, A. S., 2005a, A new method for multicomponent activity coefficients of electrolytes in aqueous atmospheric aerosols: *J. Geophys. Res.*, **110**, D02201, doi:10.1029/2004JD004681.
- Zaveri, R. A., Easter, R. C. and Peters, L. K., 2005b, A computationally efficient Multicomponent Equilibrium Solver for Aerosols (MESA): *J. Geophys. Res.*, **110**, D24203, doi:10.1029/2004JD005618.
- Program, 4, The Dry Deposition Module, Ont. Min. of the Environment, Canada.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornbluh, L., Manzini, M., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U. and Tompkins, A., 2003, The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description, Technical Report 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg. 127pp.
- Schell, B., Ackermann, I. J., Hass, H., Binkowski, F. S. and Ebel, A., 2001, Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system: *J. Geophys. Res.*, **106**, 28275-28293
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W. and Powers, J. G., 2005, A description of the Advanced Research WRF version 2, NCAR Tech Note, NCAR/TN468+STR, 88pp.
- Slinn, S. A. and Slinn, W. G. N., 1980, Predictions for particle deposition on natural waters: *Atmos. Environ.*, **14**, 1013-1016.
- Stier, P., Feichter, J., Kinne, S., Kloster, S., Vignati, E., Wilson, J., Ganzeveld, L., Tegen, I., Werner, M., Balkanski, Y., Schulz, M., Boucher, O., Minikin, A. and Petzold, 2005: The aerosol-climate model ECHAM5-HAM: *J. Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1125-1156.
- Towmey, S., 1991, Aerosols, clouds and radiation: *Atmos. Environ.*, Part A, **25**, 2435-2442.
- Vehkamäki, H., Kulmala, M., Napari, I., Lehtinen, K. E. J., Timmreck, C., Noppel, M. and Laaksonen, A., 2002, An improved parameterization for sulfuric acid-water nucleation rates for tropospheric and stratospheric conditions: *J. Geophys. Res.*, **107**, D22, doi: 10.1029/2002JD002184.
- Vignati, E., Wilson, J. and Stier, P., 2004, M7: a size resolved aerosol mixture module for the use in global aerosol models: *J. Geophys. Res.*, **109**, D22202, doi: 10.1029/2003JD004485.
- Wild, O., Zhu, X. Prather, M. J., 2000, Fast-J: Accurate simulation of in- and below-cloud photolysis in tropospheric chemical models: *J. Atmos. Chem.*, **37**, 245-282.