

## بررسی فرایندهای میکروفیزیکی مؤثر بر ذرات هواویز جوی با استفاده از سامانه جفت شده طرحواره هواویز HAM و مدل میان‌مقیاس WRF

رباب مشایخی<sup>۱</sup>، پرویز ایران‌نژاد<sup>۲\*</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۳</sup> و یوهان فایشر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار، گروه هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup>استاد، گروه هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۴</sup>عضو هیأت علمی، مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک، هامبورگ، آلمان

rmash@ut.ac.ir, piran@ut.ac.ir, bidokhti@ut.ac.ir, johann.feichter@zmaw.de

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۹/۲۲)

### چکیده

در این پژوهش با استفاده از مدل جفت شده هواویز پیشرفته HAM و مدل پیش‌بینی عددی - تحقیقاتی WRF به بررسی فرایندهای میکروفیزیکی ذرات هواویز جوی پرداخته شده است. مدل WRF-HAM از روش جدیدی برای ارائه توزیع اندازه ذرات هواویز جوی تحت عنوان روش شبه‌مدی بهره می‌برد و فرایندهای میکروفیزیکی متعددی شامل میعان اسید سولفوریک بر سطح ذرات هواویز، هسته‌بندی و تولید ذرات ثانویه، برخورد و هم‌آمیزی ذرات و نیز تعادل ترمودینامیکی با بخار آب را در بر می‌گیرد. در این تحقیق، هواویزهای سولفات، کربن سیاه، کربن آلی، نمک دریا و ذرات گرد و غبار، به عنوان مؤلفه‌های اصلی هواویزهای جهانی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج آزمون‌های شبیه‌سازی در یک دوره ۲۴ ساعته نشان می‌دهد که غلظت اسید سولفوریک گازی مصرف شده برای تشکیل ذرات جدید در مد هسته‌بندی، از غلظت مصرفی برای میعان بر سطح ذرات هواویز بیشتر است. علاوه بر آن، ذرات سولفات ثانویه در مد هسته‌بندی در ارتفاعات بالاتر از سطح زمین و در منطقه ابری حوزه شبیه‌سازی تشکیل می‌شوند. میعان اسید سولفوریک گازی بر سطح ذرات هواویز، علاوه بر رشد این ذرات در هر دو مد آمیخته و نامحلول، منجر به تغییر ماهیت ذرات هواویز در مدهای نامحلول و در نتیجه انتقال این ذرات به مدهای آمیخته مربوط نیز می‌شود. برخورد و هم‌آمیزی ذرات هواویز نیز منجر به تغییر جرم این ذرات و انتقال یافتن آنها به مدهای درشت‌تر می‌شود که این تغییر جرم، نسبت به فرایند میعان به مراتب کوچک‌تر است.

واژه‌های کلیدی: هواویزها، مدل هواویز HAM، مدل میان‌مقیاس WRF، میعان، هسته‌بندی، برخورد و هم‌آمیزی

## Investigation of the microphysical processes on Aerosol particles using the coupled system of the Aerosol HAM scheme and the meso-scale WRF model

Rabab Mashayekhi<sup>1</sup>, Parviz Irannejad<sup>1\*</sup>, Abbas Ali Aliakbari Bidokhti<sup>1</sup> and Johann Feichter<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany

(Received: 17 June 2009, accepted: 13 December 2009)

\*Corresponding author:

piran@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

## Summary

In the present paper, the microphysical processes of aerosol particles are investigated using the new coupled system of the aerosol HAM model and the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. The WRF-HAM model uses a new "pseudomodal" approach for the representation of the aerosol size distribution. The aerosol population in this model is represented by the superposition of seven modes, assuming a lognormal distribution within each mode. The seven modes are grouped into four geometrical size classes, ranging from the nucleation, Aitken, and accumulation modes to coarse modes. Besides size, two categories of particles are distinguished, internally mixed and water soluble particles (four modes), and externally mixed and insoluble particles (three modes). This classification allows 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. Gravitational sedimentation and dry deposition are considered the main removal processes for the aerosol particles in this coupled WRF-HAM model. The model also contains the in-cloud scavenging of aerosol particles by precipitation within 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 prescribed based on the Emission Inventory for the Aerosol Model Inter-comparison Experiment B, AEROCOM representative for the year 2000.

The model simulations were conducted for a 24-hour period from 22 to 23 February 2006 in a domain with 30 km horizontal grid spacing, encompassing south-western Asia, North Africa and some parts of Europe. The model simulation results were investigated for different microphysical processes of condensation, nucleation and coagulation. For better understanding of the treatment of different microphysical processes in this study, all aerosol particles were assumed to have been emitted into the atmosphere only during the first time step.

The model simulation results show that the sulfuric acid concentration consumed by new particle formation in the nucleation mode is higher than that by condensation on aerosol particles. In addition, the secondary sulfate aerosol in nucleation mode formed at high altitudes in the cloudy regions of the domain. It has also been concluded that aerosol particles in both insoluble and mixed modes grow by condensation of sulfuric acid. Moreover, it is shown that the condensation of gaseous sulfate on aerosol particles causes the transfer of particles in insoluble modes to the corresponding mixed modes. Thus, the mass of different aerosol compounds in insoluble modes decreases after condensation of sulfuric acid over their surfaces, while that of the aerosol particles in mixed modes increases significantly due to both condensation of gaseous sulfate and transfer of condensed particles in insoluble modes. The coagulation process of aerosol particles was further observed to modify the aerosol mass within the modes and transfers the coagulating particles to the coarser modes. The aerosol mass modification by coagulation is smaller than that by the condensation process.

**Key words:** Aerosols, aerosol HAM model, meso-scale WRF model, condensation, nucleation, coagulation

## ۱ مقدمه

هواویزهای جوی که همان ذرات جامد و مایع معلق موجود در جو هستند، نقش برجسته‌ای در توازن تابشی سامانه جو بازی می‌کنند. این ذرات با پراکنش تابش (برای نمونه، کارلسون و همکاران، ۱۹۹۲) یا جذب آن (برای نمونه، راماناتان و وگلن، ۱۹۹۷) تأثیر مستقیمی بر بودجه تابشی سامانه جو ایجاد می‌کنند و از طرفی در نتیجه ایفای نقش به عنوان هسته‌های میعان تأثیر غیرمستقیمی بر سپیدی ابر (تومی، ۱۹۹۱؛ کارلسون و همکاران، ۱۹۸۷) و میدان بارندگی (راماناتان و همکاران، ۲۰۰۱a و ۲۰۰۱b) دارند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی هواویزهای جوی و بررسی اثرهای مستقیم و غیرمستقیم این ذرات بر سامانه جو و اقلیم صورت گرفته است. روش‌های متعددی برای ارائه توزیع اندازه ذرات، از جمله روش‌های مدی (ایکرمن و همکاران، ۱۹۹۸؛ شل و همکاران، ۲۰۰۱) و روش‌های قطعه‌ای (جاکوبسن، ۲۰۰۱؛ گنگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ زاوری و همکاران، ۲۰۰۵a و ۲۰۰۵b) مطرح شده است. مروری بر جزئیات روش‌های گوناگون مورد استفاده برای ارائه توزیع اندازه ذرات هواویز و فرمول‌بندی‌های میکروفیزیکی و دینامیکی حاکم بر این ذرات در مقاله ویتبای و مک موری (۱۹۹۷) و ویلیامز و لویالکا (۱۹۹۱) آورده شده است. علی‌رغم تلاش‌های گسترده‌ای که در زمینه تحقیقات هواویزها در سطح جهانی انجام گرفته است، عدم قطعیت‌های نسبتاً بزرگی در برآورد خواص این ذرات و برهم‌کنش آنها با سامانه جو و اقلیم وجود دارد (IPCC، ۲۰۰۱). از جمله عوامل مؤثر بر این عدم قطعیت‌ها می‌توان به پیچیدگی این ذرات از نظر توزیع اندازه و ترکیب شیمیایی متنوع آنها در جو اشاره کرد. بررسی دقیق ذرات هواویز و تأثیر این ذرات در جو، نیازمند شناخت هرچه دقیق‌تر فرایندهای فیزیکی، ترمودینامیکی و دینامیکی حاکم بر رفتار این ذرات است.

در این مقاله به منظور بررسی خواص میکروفیزیکی ذرات هواویز جوی، از مدل جفت شده جدیدی تحت عنوان مدل WRF-HAM استفاده شده است. مدل هواویز پیشرفته HAM توسط اشتیر و همکاران (۲۰۰۵) در موسسه هواشناسی ماکس پلانک در هامبورگ ساخته شد و در حال حاضر در مدل اقلیمی ECHAM5 (روئکنر و همکاران، ۲۰۰۳) اجرا می‌شود. مدل هواویز HAM از روش نسبتاً جدیدی تحت عنوان روش شبه‌مدی در ارائه توزیع اندازه ذرات استفاده می‌کند و فرایندهای میکروفیزیکی متعددی را در قالب هسته میکروفیزیکی M7 (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴) در بر می‌گیرد. در این مقاله مدل HAM در یک بستر آزمونی جدید تحت عنوان مدل میان‌مقیاس WRF وارد و اجرا شده است. شبیه‌سازی ذرات هواویز سولفات، کربن سیاه، مواد آلی، نمک دریا و ذرات گرد و غبار برای یک دوره ۲۴ ساعته از نقطه‌نظر میکروفیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. تحول زمانی رشد ذرات هواویز در مدهای متفاوت در اثر برخورد و هم‌آمیزی ذرات، میعان اسید سولفوریک گازی و نیز تشکیل ذرات جدید سولفات در مد هسته‌بندی بررسی شده است.

در بخش اول به توصیف مختصری از فرایندهای میکروفیزیکی مورد استفاده در مدل هواویز HAM پرداخته شده است. پس از آن در بخش دوم، آزمون‌های شبیه‌سازی انجام شده معرفی و در نهایت در بخش پایانی، نتایج مورد بحث قرار داده شده است.

## ۲ توصیف مدل

در این بررسی، مدل هواویز HAM در دومین نسخه مدل پیش‌بینی عددی و تحقیقاتی WRF (گرل و همکاران، ۲۰۰۵) وارد و اجرا شده است. جزئیات کامل مدل هواویز HAM در مقاله اشتیر و همکاران (۲۰۰۵) آمده است. در این بخش تنها به توصیف مختصری از روش ارائه توزیع

امکان بررسی تحول نم‌گیری (هیگروسکوپیکی) ذراتی را که در ابتدا نامحلول هستند، فراهم می‌کند. در این تحقیق، پنج مولفه اصلی هواویزهای جهانی شامل هواویزهای سولفات، کربن سیاه، کربن آلی، گرد و غبار و نمک دریا در نظر گرفته شده است. سه مد به عنوان مولفه‌های نامحلول در نظر گرفته شده و چهار مد باقی‌مانده، شامل حداقل یک مولفه محلول‌اند. ساختار شبه‌مدی در نظر گرفته شده برای توزیع اندازه ذرات هواویز در جدول ۱ آورده شده است. هفت مد مورد استفاده در این بررسی به ترتیب عبارت‌اند از ذرات محلول در مد هسته‌بندی، ذرات هواویز محلول در مد ایتکن، ذرات محلول در مد تجمعی، هواویزهای محلول در مد درشت، ذرات در مد نامحلول ایتکن، مد نامحلول تجمعی و مد نامحلول درشت.

## ۲-۲ فرایندهای 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 بهبودیافته M3+ است. فرایندهای دینامیکی و ترمودینامیکی ذرات هواویز در M7 در چارچوب ساختار مدی توصیف شده است. توصیف کامل M7

اندازه ذرات هواویز و فرایندهای میکروفیزیکی مورد استفاده در مدل HAM پرداخته شده است.

## ۱-۲ توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات هواویز در طرحواره HAM بر پایه روشی جدید تحت عنوان روش شبه‌مدی ارائه می‌شود. طیف توزیع ذرات از برهم‌نهی هفت توزیع لوگ نرمال به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

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

که در آن  $n$  توزیع احتمال تعداد ذرات هواویز،  $N_i$  تعداد ذرات،  $r$  قطر ذره،  $\bar{r}_i$  شعاع متوسط ذره و  $\sigma_i$  انحراف معیار مد  $i$  است. هفت مد از نظر اندازه به چهار گروه مجزا، متشکل از مدهای هسته‌بندی، ایتکن، تجمعی و مد ذرات درشت تقسیم‌بندی می‌شوند. انحراف معیار برای ذرات در مدهای هسته‌بندی، ایتکن و تجمعی برابر با ۱/۵۹ میکرومتر و برای مد درشت برابر با ۲ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود (ویلسون و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین، ذرات هواویز در دو گروه مجزا از ذرات آمیخته یا محلول و ذرات نامحلول قرار داده می‌شوند. این نوع تقسیم‌بندی

جدول ۱. ساختار شبه‌مدی مدل HAM.  $N_i$  معرف تعداد کلی هواویزها در مد  $i$  و  $M_i^k$  معرف جرم نوع  $k$  ام در مد  $i$  است و {سولفات (SU)،

کربن سیاه (BC)، مواد آلی (POM)، نمک دریا (SS) و ذرات گرد و غبار (DU)}  $k \in \{$

	محلول				نامحلول		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
	هسته‌بندی $\bar{r} \leq 0.005$	ایتکن $0.005 < \bar{r} \leq 0.05$	تجمعی $0.05 < \bar{r} \leq 0.5$	درشت $0.5 < \bar{r}$	ایتکن $0.005 < \bar{r} \leq 0.05$	تجمعی $0.05 < \bar{r} \leq 0.5$	درشت $0.5 < \bar{r}$
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			$M_3^{SS}$	$M_4^{SS}$			
گرد و غبار			$M_3^{DU}$	$M_4^{DU}$		$M_6^{DU}$	$M_7^{DU}$
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$

ذرات نامحلول برابر با ۰/۳ قرار داده می‌شود (رایس و فان دینخن، ۱۹۹۲).

در M7 اسید سولفوریک گازی روی ذرات هواویز در همهٔ مدها، اعم از محلول و نامحلول میعان می‌یابد. میعان سولفات گازی روی ذرات، در مد نامحلول، منجر به انتقال این ذرات به مدهای آمیخته مربوط می‌شود. به همین منظور برای مدهای آمیخته ایتکن، تجمعی و ذرات درشت ( $j = 2, 4$ )، علاوه بر میعان مستقیم سولفات، جمله دیگری نیز در معادله ۲ اضافه می‌شود که مربوط به جرم سولفاتی است که در مدهای نامحلول میعان یافته و به مدهای آمیخته مربوطه منتقل شده است. (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴)

$$\frac{d[SO_{4,j}]}{dt} = \frac{N_j C_j + N_{j+3} C_{j+3}}{\sum_{i=1}^7 N_i C_i} \left( \sum_{i=1}^7 N_i C_i [SO_{4g}^{2-}] \right). \quad (4)$$

#### ۲-۲-۲ هسته‌بندی

بخشی از اسید سولفوریک گازی علاوه بر میعان بر سطح ذرات هواویز، صرف تشکیل ذرات هواویز جدید سولفات از راه هسته‌بندی سولفات گازی روی ذرات سولفات موجود می‌شود. در M7 مقدار اسید سولفوریک گازی مورد استفاده در فرایند هسته‌بندی، به این صورت در نظر گرفته می‌شود: در نخستین گام، مقدار بیشینه کل سولفات گازی قابل میعان با استفاده از اسید سولفوریک در دسترس و قابلیت پخش سولفات بر سطح ذرات گوناگون هواویز محاسبه می‌شود (فوکس، ۱۹۵۹). در گام بعد، سولفات فاز گازی باقی‌مانده، برای هسته‌بندی ذرات جدید در دسترس قرار داده می‌شود. در حال حاضر، دو طرحواره متفاوت برای فرایند هسته‌بندی در M7 وجود دارند که عبارت‌اند از طرحواره‌های مبتنی بر روش کلامالا

در مقاله ویگناتی و همکاران (۲۰۰۴) آورده شده است. در اینجا تنها به توصیف مختصری از فرایندهای اصلی میکروفیزیکی ذرات هواویز در مدل می‌پردازیم.

#### ۱-۲-۲ میعان

میعان اسید سولفوریک گازی بر سطح ذرات هواویز در مدهای متفاوت، از جمله فرایندهای میکروفیزیکی مؤثر بر تغییر جرم و تعداد ذرات هواویز در هر مد یا به عبارتی تغییر در توزیع اندازه ذرات است. تغییر در غلظت جرمی سولفات در مد هسته‌بندی  $[SO_{4,1}]$  ناشی از هسته‌بندی اسید سولفوریک گازی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود: (فوکس، ۱۹۶۴)

$$\frac{d[SO_{4,1}]}{dt} = \frac{N_1 C_1}{\sum_{i=1}^7 N_i C_i} \left( \sum_{i=1}^7 N_i C_i [SO_{4g}^{2-}] \right), \quad (2)$$

که در آن  $C_i$  و  $N_i$  به ترتیب تعداد ذرات و ضریب میعان در مد  $i$  و  $[SO_{4g}^{2-}]$  غلظت اسید سولفوریک است.  $N_i$  تعداد ذرات در مد هسته‌بندی و  $C_i$  ضریب میعان مربوط به مد هسته‌بندی است. جمله  $\sum_{i=1}^7 N_i C_i [SO_{4g}^{2-}]$  مقدار کلی میعان در همهٔ مدها را نشان می‌دهد. ضریب میعان  $C_i$  برای مد  $i$  بر مبنای روش فوکس (۱۹۶۴) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_i = \frac{4\pi D \bar{r}}{\frac{4D}{sv\bar{r}} + \frac{\bar{r}}{r_{gi}} + \Delta}, \quad (3)$$

در این رابطه،  $\bar{r}_{gi}$  شعاع متوسط هندسی در مد  $i$ ،  $D$  ضریب پخش،  $v$  سرعت گرمایی متوسط،  $\Delta$  طول مسیر آزاد میانگین برای مولکول سولفات و  $s$  ضریب جایگزینی است که برای ذرات آمیخته برابر با یک و برای

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{1}{2} K_{11} N_1^2 - \sum_{j=2}^7 K_{1,j} N_j N_1 \quad (6)$$

که در آن  $K_{11}$  ضریب برخورد درون‌مدی برای هواویزها در مد هسته‌بندی و  $K_{1,j}$  ضریب برخورد بین‌مدی برای برخورد هواویزها در مد هسته‌بندی با ذرات در مد زام است. ضرایب برخورد برون‌مدی و درون‌مدی از روش فوکس (۱۹۶۴) بر مبنای حرکت براونی ذرات محاسبه می‌شود:

$$K_{ij} = \frac{16\pi\bar{D}\bar{r}}{4\bar{D} + \frac{\bar{r}}{\bar{v}\bar{r} + \Delta'}}, \quad (7)$$

که در آن  $\bar{D}$ ،  $\bar{v}$  و  $\Delta'$  به ترتیب ضریب پخش، سرعت گرمایی و طول مسیر آزاد متوسط برای یک ذره هواویز با شعاع  $\bar{r} = \frac{\bar{r}_{gi} + \bar{r}_{gj}}{2}$  یا به عبارتی میانگین شعاع متوسط هندسی  $i$  و  $j$  است.

آهنگ برخورد و هم‌آمیزی ذرات هواویز تابعی از اندازه و غلظت تعداد ذرات است. در شرایط محیطی به‌طور متداول، مقیاس زمانی مشخصه برای برخوردهای برون‌مدی و درون‌مدی در مد تجمعی نامحلول و همه‌مدهای درشت، به اندازه کافی طولانی (در حد چند روز) است، به‌طوری‌که اثر این فرایند در این مدها قابل صرف‌نظر کردن است. برخورد درون‌مدی برای ذرات در مد آمیخته ایکن و برخورد برون‌مدی برای مد آمیخته تجمعی در نظر گرفته می‌شود. آهنگ تغییر تعداد ذرات هواویز در مدهای آمیخته ایکن و هسته‌بندی در اثر برخورد و هم‌آمیزی، از روابط زیر محاسبه می‌شود: (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴)

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. ذره جدید هسته‌بندی شده، جرم خشکی را به مد هسته‌بندی اضافه می‌کند. تغییر در غلظت سولفات گازی در اثر هسته‌بندی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d[SO_{4g}^{2-}]}{dt} = -n_c \alpha [SO_{4g}^{2-}]^\beta \quad (8)$$

که در آن  $n_c$  تعداد بحرانی مولکول‌های سولفات در هر خوشه هسته‌بندی است و  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای هسته‌بندی‌اند که در طرحواره‌های کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) و وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲) مقادیر متفاوتی دارند. مقدار  $n_c$  مطابق با ویلسون و همکاران (۲۰۰۱) برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۲-۲ برخورد و هم‌آمیزی

برخورد و هم‌آمیزی ذرات هواویز، فرایند دیگری است که می‌تواند منجر به تغییر توزیع اندازه ذرات شود. فرایند برخورد و هم‌آمیزی در M7 با در نظر گرفتن حرکت براونی برای ذرات هواویز وارد می‌شود. علاوه بر برخورد ذرات هواویز در مدهای متفاوت (برخورد برون‌مدی) در طرحواره M7 برخورد ذرات در یک مد (برخورد درون‌مدی) نیز در نظر گرفته شده است. آهنگ تغییر غلظت تعداد ذرات در مد هسته‌بندی در اثر برخورد و هم‌آمیزی از رابطه زیر محاسبه می‌شود: (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴)

تعادلی تنها برای ذرات در چهار مد آمیخته محاسبه می‌شود. برای ذرات شامل سولفات، محاسبه تعادل ترمودینامیکی با بخار آب بر مبنای شکل تعمیم یافته معادله کلون بیان می‌شود. محاسبه محتوای آب ذراتی که علاوه بر سولفات شامل مؤلفه‌های نامحلول از قبیل کربن سیاه و ذرات گرد و غبار نیز هستند، همانند ذرات سولفات خالص انجام می‌شود، با این تفاوت که در این حالت، شعاع خشک ذرات به کار برده می‌شود. با افزایش رطوبت نسبی محیط، ذرات هواویزی که شامل نمک دریا هستند خود به خود به واسطه آبدگیری از محیط اطراف، رشد می‌کنند. با کاهش رطوبت نسبی، هواویزهای نمک دریا، آب گرفته شده را آزاد می‌کنند. در واقع برای ذرات نمک دریای ایجاد شده از تبخیر، قطرات درشت‌تر فرض می‌شوند و این ذرات آب خود را تا قبل از رسیدن به رطوبت نسبی ۴۵ درصد آزاد نخواهند کرد. محتوای آب هواویزهای شامل ذرات نمک دریا در شرایط رطوبت نسبی کمتر از ۴۵ درصد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W = \sum_i \frac{C_i}{m_i}, \quad (11)$$

که در آن  $W$  محتوای آب هواویز بر حسب  $\text{gm}^{-3}$ ،  $C_i$  غلظت مؤلفه  $i$  ام هواویز و  $m_i$  مولالیته مؤلفه  $i$  است. روش مطرح شده زدانوسکی (۱۹۴۸) و استوکس و رایبسون (۱۹۶۶) معروف به روش ZSR برای محاسبه مقدار آب اضافه شده به ذرات استفاده می‌شود. بر مبنای این روش فرض می‌شود که محتوای آب مخلوطی از ذرات، معادل با مجموع محتوای آب هر مؤلفه است. مولالیته هر مؤلفه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$m_i = \left( \sum_{j=0}^7 Y_j (RH)^j \right)^2, \quad (12)$$

که در آن RH رطوبت نسبی و  $Y_j$  ضرایب تجربی بر اساس روش جاکوبسن و همکاران (۱۹۹۶) است.

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{1}{2} K_{22} N_2^2 - \sum_{j=3,4,6,7} K_{2,j} N_2 N_j, \quad (8)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\frac{1}{2} K_{33} N_3^2. \quad (9)$$

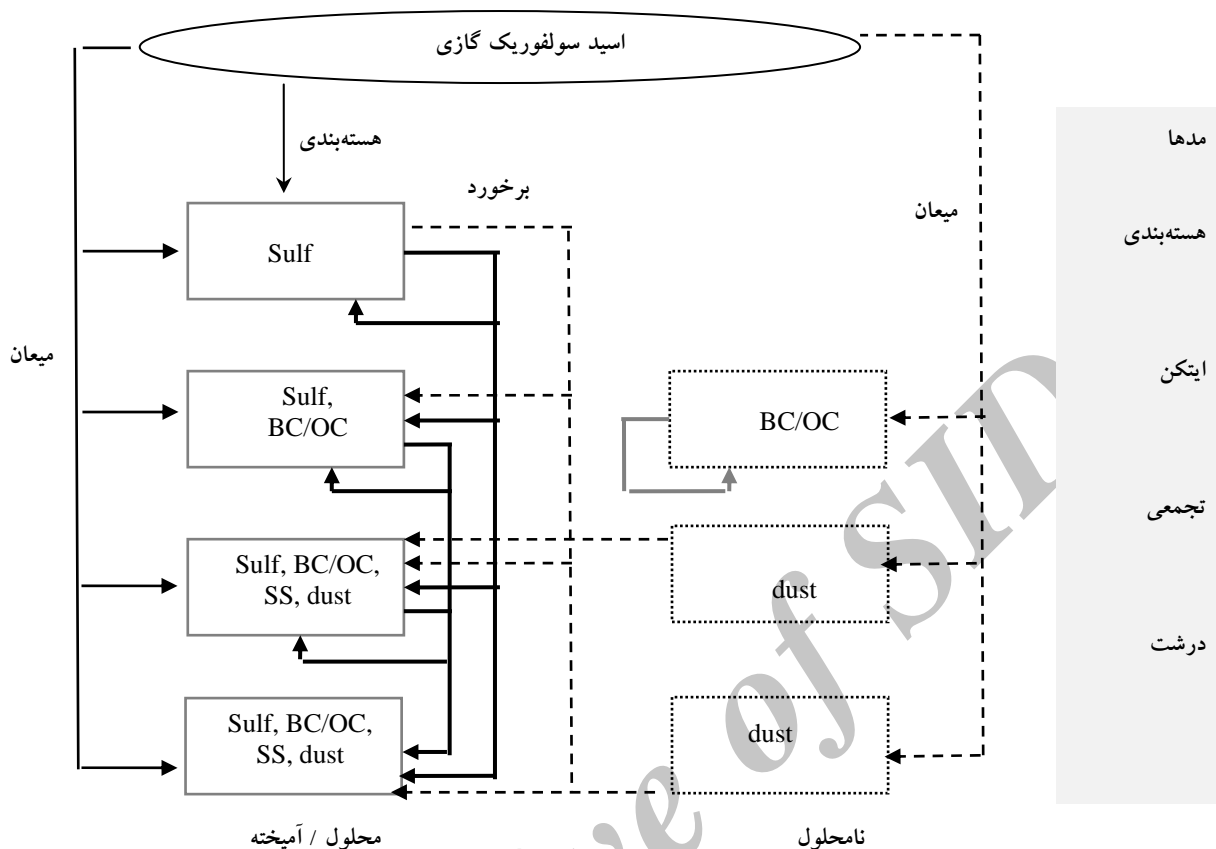
ذره حاصل از برخورد درون‌مدی در همان مد باقی می‌ماند، به گونه‌ای که غلظت جرمی کلی آن مد تغییر نمی‌کند، در حالی که تعداد ذرات در آن مد کاهش و جرم متوسط ذرات مد افزایش می‌یابد. برای برخورد برون‌مدی، هنگامی که ذره‌ای از مد  $i$  با ذره‌ای از مد  $j$  درشت‌تر برخورد کند، جرم متوسط مد  $i$  به مد  $j$  انتقال می‌یابد. انتقال تعداد و جرم سازگار است، به گونه‌ای که جرم متوسط ذرات در مد  $i$  بدون تغییر باقی می‌ماند، در حالی که جرم متوسط در مد  $j$  افزایش می‌یابد. تغییر در تعداد ذرات در مد ایستکن نامحلول در نتیجه برخوردهای درون‌مدی و برون‌مدی از رابطه زیر محاسبه می‌شود. (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴)

$$\frac{dN_5}{dt} = -\frac{1}{2} K_{55} N_5^2 - \sum_{j=2,3,4} K_{5,j} N_5 N_j. \quad (10)$$

غلظت تعداد ذرات در مدهای نامحلول تجمعی و درشت تنها در اثر برخورد برون‌مدی تغییر می‌کند. تغییر در جرم و تعداد ذرات هواویز در مدهای گوناگون و انتقال مدی ذرات هواویز در اثر فرایندهای میعان و برخورد و هم‌آمیزی در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ۲-۲-۴ تعادل ترمودینامیکی با بخار آب

همه ذرات هواویز، در تعادل با بخار آب در نظر گرفته می‌شوند. تنها ذرات در مدهای آمیخته، به صورت هیگروسکوپیک فرض می‌شوند. در نتیجه شعاع مرطوب



شکل ۱. مدهای متفاوت M7 و فرایندهای میکروفیزیکی مؤثر بر تغییر مدها. خطوط پر مربوط به فرایندهایی است که مدهای آمیخته را تحت تأثیر قرار می‌دهند و خط چین‌ها فرایندهایی هستند که مدهای نامحلول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یک ذره در مد هسته‌بندی که با ذره‌ای دیگر در مد هسته‌بندی برخورد می‌کند در همان مد هسته‌بندی قرار می‌گیرد، درحالی‌که وقتی با ذره‌ای در مد ایتکن برخورد می‌کند، ذره حاصل به مد ایتکن منتقل می‌شود.

میکروفیزیکی، ذرات هواویز بر اساس شعاع تغییر یافته جدید، مجدداً توزیع شوند. در این بخش از یک الگوریتم ادغام مدی (ویگناتی و همکاران، ۲۰۰۴) استفاده می‌شود که در هر گام زمانی مجدداً ذرات را توزیع می‌کند و شعاع میانه ذرات را برای هر مد، در محدوده‌ای مشخص شده برطبق جدول ۱ مقید می‌سازد.

### ۳ شبکه مورد بررسی و داده‌های اولیه

تفکیک افقی به کاررفته در شبیه‌سازی‌های این مقاله شبکه‌ای ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر برای منطقه‌ای شامل ایران، جنوب غرب آسیا، شمال افریقا و بخش‌هایی از

### ۲-۲-۵ توزیع مجدد ذرات هواویز

فرایندهای میکروفیزیکی توصیف شده در بالا منجر به تغییر در توزیع اندازه ذرات هواویز می‌شوند، به گونه‌ای که گاه ممکن است به ایجاد هم‌پوشانی در مدهای متفاوت منتهی شوند. برای مثال، ذرات در مد هسته‌بندی به واسطه فرایندهای میعان و برخورد و هم‌آمیزی رشد می‌کنند و به اندازه ذرات در مدهای ایتکن و یا حتی مدهای تجمعی می‌رسند. این فرایندها منجر به افزایش تدریجی شعاع میانه و انحراف معیار مدها می‌شوند و به این دلیل ممکن است موجب پخش عددی در محاسبات شوند. بنابراین لازم است که در هر گام زمانی، پس از اجرای فرایندهای

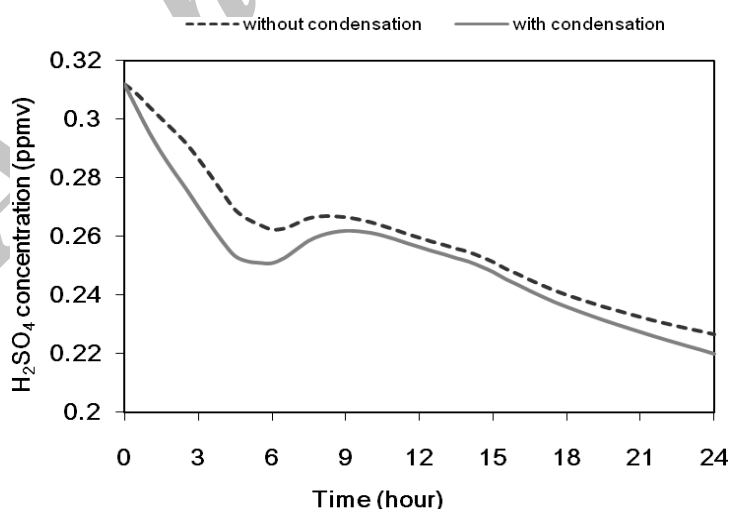


می‌پردازیم. مدل جفت شده جدید WRF-HAM برای یک دوره ۲۴ ساعته اجرا شده و آزمون‌های گوناگونی برای بررسی اثر هر یک از فرایندهای میکروفیزیکی، به صورت جداگانه انجام شده است. به منظور بررسی بهتر فرایندهای میکروفیزیکی، در این بخش شار گسیل ذرات تنها در اولین گام زمانی وارد می‌شود و این مقدار در سایر گام‌های زمانی برابر با صفر در نظر گرفته شده است. به عبارتی، فرض می‌شود که ذرات تنها در گام آغازی شبیه‌سازی‌ها در مدل وارد شده‌اند و پس از آن هیچ ذره‌ای از سطح زمین به جو وارد نمی‌شود. گسیل اولیه هواویزها با استفاده از بایگانی داده‌های سال ۲۰۰۰ AEROCOM و براساس تحقیق اشتیر و همکاران (۲۰۰۵) در نظر گرفته شده است. برای ذرات سولفات، گسیل اولیه در مدهای ایتکن، تجمعی و درشت، برای هواویزهای کربن سیاه تنها در مد نامحلول ایتکن، برای هواویزهای کربن آلی در مدهای آمیخته ایتکن و تجمعی و نیز مد نامحلول ایتکن، برای ذرات گرد و غبار در مدهای نامحلول تجمعی و درشت و برای ذرات نمک دریا در مدهای نامحلول تجمعی و درشت در نظر گرفته می‌شوند.

اروپا در محدوده ۱۶ تا ۵۷ درجه شمالی و ۱۳ تا ۶۷ درجه شرقی است. مدل دارای ۳۱ تراز در راستای قائم است و تا ارتفاع ۱۶ کیلومتری از تراز متوسط دریاها را پوشش می‌دهد. شرایط آغازی و شرایط مرزی برای میدان‌های هواشناختی از داده‌های بازتحلیل شده ۶ ساعته NCEP-GFS (قابل دسترس در: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>) استخراج شده است. اطلاعات مربوط به آهنگ گسیل ذرات هواویز از چشمه‌های گوناگون و توزیع افقی و قائم ذرات برای پنج نوع هواویز سولفات، کربن سیاه، کربن آلی، نمک دریا و ذرات گرد و غبار در این بررسی از داده‌های از پیش تعریف شده AEROCOM برای سال ۲۰۰۰ (قابل دسترس در: <http://nansen.ipsl.jussieu.fr/AEROCOM/>) (دنتز و همکاران، ۲۰۰۶) استخراج شده است.

#### ۴ بحث نتایج

در این بخش ابتدا به بررسی تحول زمانی هر یک از انواع ذرات هواویز در مدهای متفاوت، در اثر فرایندهای میکروفیزیکی میعان، هسته‌بندی و برخورد و هم‌آمیزی



شکل ۲. تحول زمانی غلظت اسید سولفوریک گازی انتگرال‌گیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی با وارد کردن اثر فرایند میعان (خط پر) در شبیه‌سازی‌ها و بدون این فرایند (خط چین).

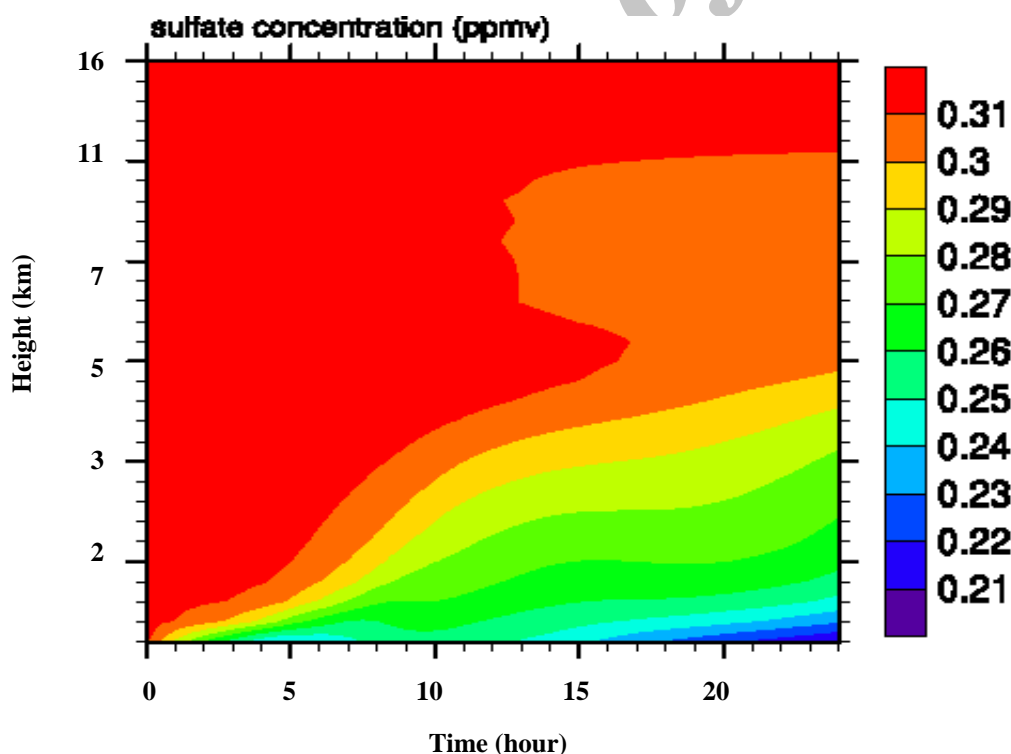
## ۴-۱ تغییر جرم در اثر فرایند میعان

برای بررسی تحول زمانی ذرات هواویز در اثر میعان اسید سولفوریک گازی بر سطح این ذرات، در نخستین آزمون اثر فرایندهای هسته‌بندی و برخورد و هم‌آمیزی در شبیه‌سازی‌های مدل حذف می‌شوند. در شکل ۲ مقایسه‌ای بین غلظت اسید سولفوریک انتگرال‌گیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی با در نظر گرفتن فرایند میعان در مدل و بدون این فرایند انجام گرفته است. غلظت اسید سولفوریک شبیه‌سازی شده با گذشت زمان کاهش می‌یابد. از ساعت ۵ به وقت گرینویچ پس از اندکی افزایش مجدداً به روند کاهشی خود با زمان، ادامه می‌دهد. این رفتار ناشی از کاهش دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) مورد نیاز برای تولید اسید سولفوریک در بخش شیمی مدل است. مطابق شکل ۲ ملاحظه می‌شود که با وارد کردن اثر

میعان سولفات گازی در شبیه‌سازی‌ها، بخشی از غلظت

اسید سولفوریک کاهش می‌یابد.

تحول زمانی توزیع قائم اسید سولفوریک انتگرال‌گیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی با در نظر گرفتن فرایند میعان در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که غلظت اسید سولفوریک مصرف شده در سطح زمین با زمان کاهش می‌یابد و این کاهش با گذشت زمان به ترازهای بالاتر نیز کشیده می‌شود. کاهش غلظت مشاهده شده در شکل‌های ۲ و ۳ بخشی از اسید سولفوریک است که بر سطح اجزای هواویز متفاوت در مدل، میعان یافته است. در شکل ۴-الف و شکل ۴-ب تحول زمانی جرم انتگرال‌گیری شده ذرات سولفات در کل حوزه شبیه‌سازی در مدهای آمیخته درشت و تجمعی با در نظر گرفتن فرایند میعان و بدون این فرایند مقایسه شده



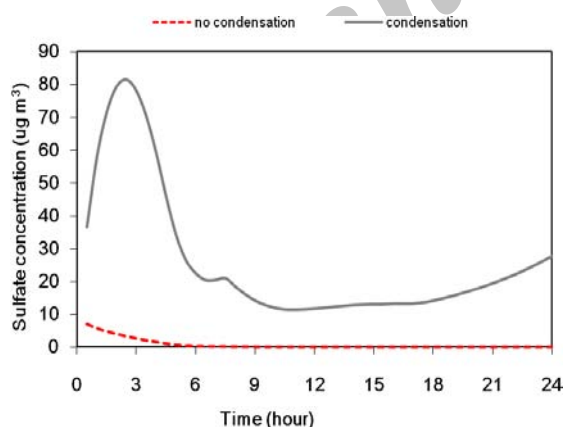
شکل ۳. تحول زمانی توزیع قائم غلظت اسید سولفوریک انتگرال‌گیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی با وارد کردن اثر فرایند میعان.

میعان اسید سولفوریک جرم ذرات کربن سیاه در مد نامحلول ایتکن به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این مسئله به تغییر ماهیت ذرات هواویز در مدل بازمی‌گردد.

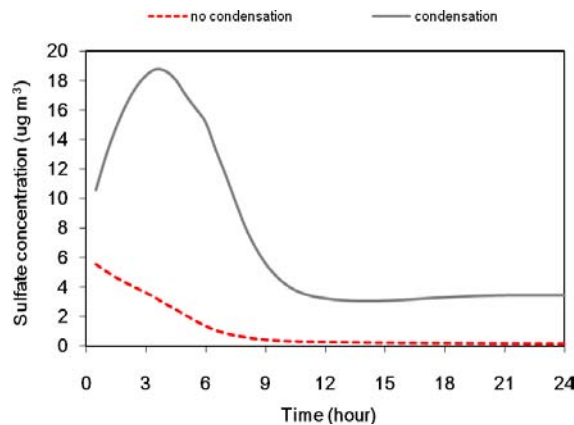
این انتقال جرم در شکل ۵-ب به خوبی دیده می‌شود. در این شکل تحول زمانی جرم انتگرالگیری شده ذرات کربن سیاه در کل حوزه شبیه‌سازی در مدهای آمیخته ایتکن و تجمعی با در نظر گرفتن فرایند میعان نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جرم کربن سیاه در این مدها بدون اثر میعان، بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است، زیرا همه جرم کربن سیاه گسیل شده اولیه، در مد نامحلول ایتکن فرض شده است. شکل ۵-ب نشان می‌دهد که میعان اسید سولفوریک منجر به رشد ذرات در مد ایتکن نامحلول و انتقال این ذرات به مدهای آمیخته ایتکن و همچنین مد تجمعی می‌شود. رشد ذرات کربن سیاه در اثر میعان سولفات گازی بر سطح آنها بسیار سریع است. به همین دلیل، فرایند میعان سولفات گازی می‌تواند ذرات کربن سیاه اولیه را به مد تجمعی نیز برساند.

است. مطابق این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که میعان اسید سولفوریک بر سطح ذرات سولفات در مدهای درشت و تجمعی منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در جرم این ذرات می‌شود. با وارد کردن میعان در شبیه‌سازی‌ها، جرم ذرات سولفات با زمان افزایش می‌یابد و تا ۳ الی ۴ ساعت پس از شروع شبیه‌سازی به بیشینه مقدار خود رسیده و سپس به سرعت کاهش می‌یابد. این رفتار به رشد اولیه سریع ذرات در اثر میعان، به دلیل زیاد بودن سولفات گازی در دسترس و کاهش اسید سولفوریک گازی در دسترس با گذشت زمان، بر می‌گردد. نکته جالب توجه دیگر در این شکل‌ها، کمتر بودن جرم ذرات سولفات در مد درشت نسبت به مد تجمعی، به دلیل رسوب‌گذاری گرانشی سریع‌تر ذرات در مد درشت نسبت به مد تجمعی در مدل است.

تأثیر وارد کردن فرایند میعان در شبیه‌سازی تغییرات زمانی جرم انتگرالگیری شده ذرات کربن سیاه در کل حوزه شبیه‌سازی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-الف ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن

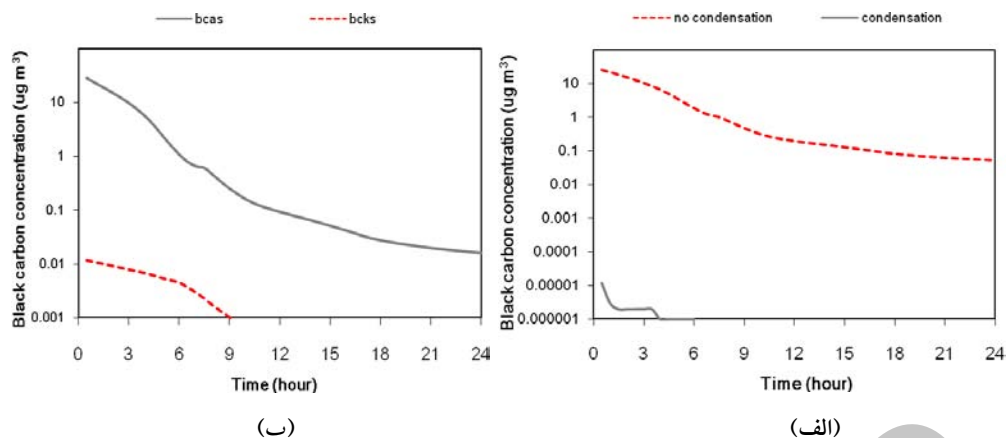


(ب)

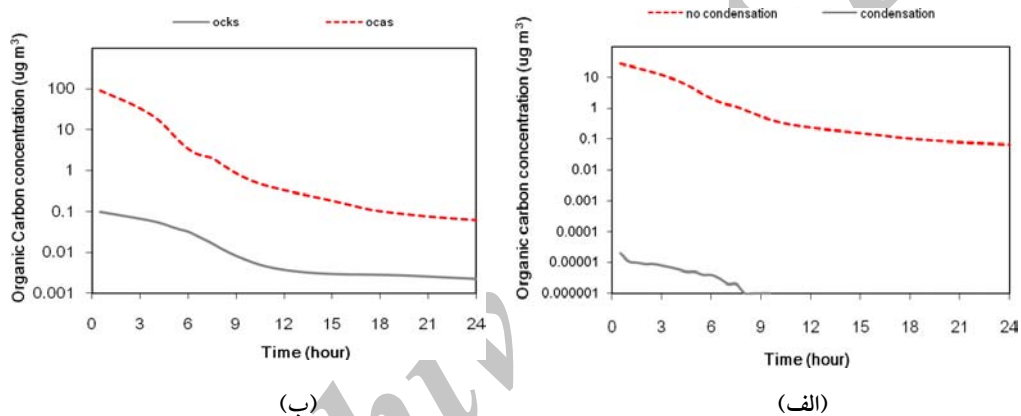


(الف)

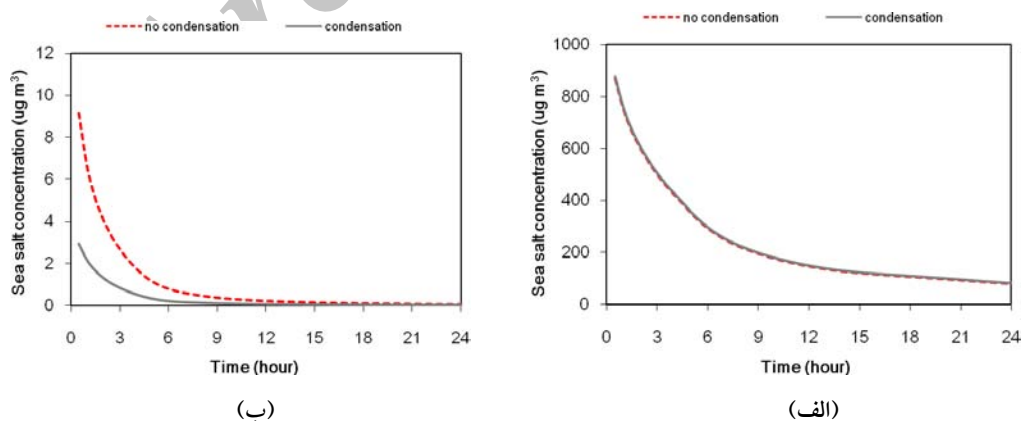
شکل ۴. تحول زمانی جرم انتگرالگیری شده ذرات هواویز سولفات سطحی در کل حوزه شبیه‌سازی در مد (الف) آمیخته درشت و (ب) آمیخته تجمعی با در نظر گرفتن میعان (خط پر) و بدون آن (خط چین).



شکل ۵. تحول زمانی جرم انتگرال‌گیری شده ذرات هواویز کربن سیاه سطحی در کل حوزه شبیه‌سازی در مد (الف) نامحلول ایکن با در نظر گرفتن میعان (خط پر) و بدون آن (خط‌چین) و (ب) آمیخته تجمعی (خط پر) و آمیخته ایکن (خط‌چین) با وارد کردن اثر میعان.



شکل ۶. مشابه شکل ۵ برای ذرات هواویز کربن آلی.



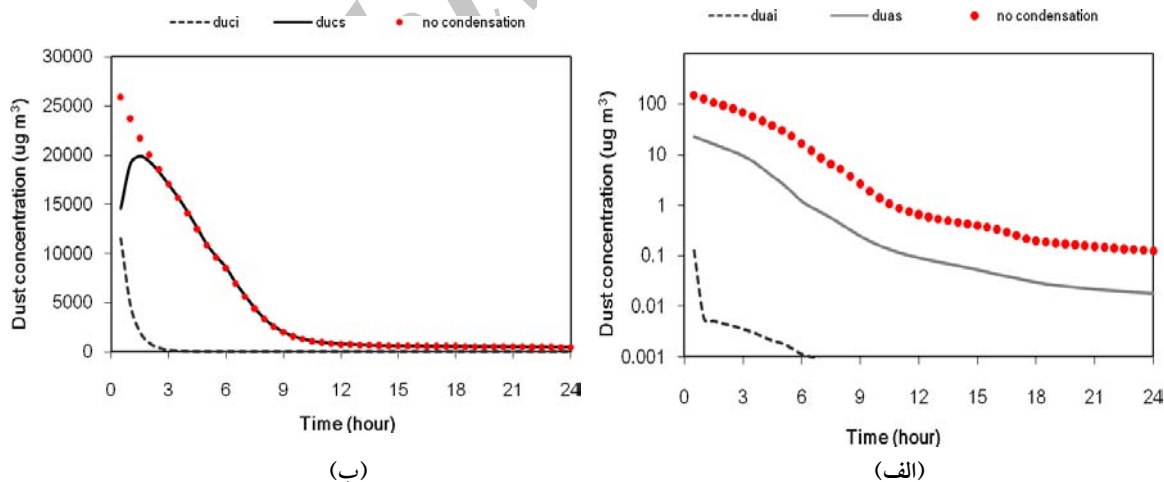
شکل ۷. تحول زمانی جرم انتگرال‌گیری شده ذرات هواویز نمک دریای سطحی در کل حوزه شبیه‌سازی در مد (الف) آمیخته درشت و (ب) آمیخته تجمعی، با در نظر گرفتن میعان (خط پر) و بدون آن (خط‌چین).

می‌شوند.

برای ذرات نمک دریا در مد درشت ملاحظه می‌شود که فرایند میعان، تغییر قابل ملاحظه‌ای در جرم ایجاد نکرده است که این مسئله به جرم زیاد این ذرات در مدهای درشت، در مقایسه با جرم اسید سولفوریک گازی اضافه شده در اثر میعان باز می‌گردد.

در نهایت، در شکل ۸ تأثیر میعان بر جرم انتگرالگیری شده ذرات گرد و غبار در کل حوزه شبیه‌سازی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که گسیل اولیه ذرات گرد و غبار تنها در مدهای نامحلول صورت می‌گیرد. با توجه به شکل‌ها مجدداً کاهش جرم ذرات در مدهای نامحلول در اثر میعان و انتقال جرم به مدهای آمیخته مربوطه، به خوبی مشاهده می‌شود. با گذشت سه ساعت از زمان شبیه‌سازی، تقریباً همه ذرات گرد و غبار در مد نامحلول درشت، از جو حذف می‌شوند و در این زمان جرم ذرات گرد و غبار در مد آمیخته درشت به بیشینه مقدار خود می‌رسد و پس از آن، رو به کاهش می‌گذارد.

در مدهای نامحلول در اثر میعان اسید سولفوریک و در نتیجه انتقال جرم این ذرات به مدهای آمیخته مربوطه مشابه شکل ۵ برای جرم ذرات کربن آلی انتگرال‌گیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی در شکل ۶ رسم شده است. در این مورد نیز رشد ذرات در مد ایکن نامحلول و انتقال جرم این ذرات به مدهای آمیخته، به خوبی دیده می‌شود. در شکل ۷ نیز تحول زمانی جرم انتگرال‌گیری شده ذرات نمک دریا در کل حوزه شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن فرایند میعان و بدون این فرایند مقایسه شده است. شکل ۷-الف اثر میعان اسید سولفوریک بر سطح ذرات نمک دریا را در مد آمیخته درشت و شکل ۷-ب در مد آمیخته تجمعی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که جرم ذرات نمک دریا در مد تجمعی در اثر میعان سولفات گازی بر سطح این ذرات، کاهش می‌یابد. دلیل این است که ذرات نمک دریا در حضور سولفات گازی به دلیل افزایش سریع آبدگیری، به سرعت قابل ملاحظه‌ای رشد می‌کنند و به مدهای درشت منتقل



شکل ۸ تحول زمانی جرم انتگرال‌گیری شده ذرات هواویز گرد و غبار سطحی در کل حوزه شبیه‌سازی در مد (الف) تجمعی و (ب) درشت، برای مد نامحلول بدون اثر میعان (خط‌چین) و مد نامحلول با در نظر گرفتن اثر میعان (دایره) و نیز مد محلول (خط پر).

#### ۲-۴ تغییر جرم در اثر هسته‌بندی

آن در فرایند میعان بیشتر است. تحول زمانی جرم انتگرالگیری شده ذرات سولفات تشکیل شده در اثر هسته‌بندی، در کل حوزه شبیه‌سازی در ارتفاع ۷ کیلومتری از سطح، با استفاده از دو طر حواره هسته‌بندی متفاوت، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ملاحظه می‌شود که جرم ذرات سولفات در مد هسته‌بندی با زمان کاهش می‌یابد، یعنی با گذشت زمان، تعداد ذراتی که در اثر هسته‌بندی سولفات گازی تشکیل می‌شوند به دلیل کاهش غلظت اسید سولفوریک در دسترس، کم می‌شود. مقایسه دو طر حواره نشان‌دهنده وجود مقادیر به مراتب بیشتر جرم سولفات ثانویه هسته‌بندی شده در طر حواره وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲) نسبت به طر حواره دیگر است.

بخشی از اسید سولفوریک گازی علاوه بر میعان بر سطح ذرات هواویز، صرف هسته‌بندی و تشکیل ذرات سولفات جدید می‌شود. در دومین آزمون از میعان اسید سولفوریک بر سطح ذرات و برخورد ذرات هواویز چشم‌پوشی و تنها تشکیل ذرات ثانویه در اثر فرایند هسته‌بندی در نظر گرفته شده است.

شکل ۹ تحول زمانی توزیع قائم غلظت اسید سولفوریک شبیه‌سازی شده را در حضور فرایند هسته‌بندی، با استفاده از دو طر حواره کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) و وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲) به صورت جداگانه نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که کاهش غلظت اسید سولفوریک در اثر فرایند هسته‌بندی در هر دو طر حواره در ارتفاعات بالاتر از سطح زمین اتفاق می‌افتد. این ارتفاعات منطبق بر منطقه ابری انتگرالگیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی است. به عبارت دیگر، هسته‌بندی و تشکیل ذرات سولفات جدید در مد هسته‌بندی در داخل ابر اتفاق می‌افتد.

#### ۳-۴ تغییر جرم در اثر برخورد و هم‌آمیزی ذرات

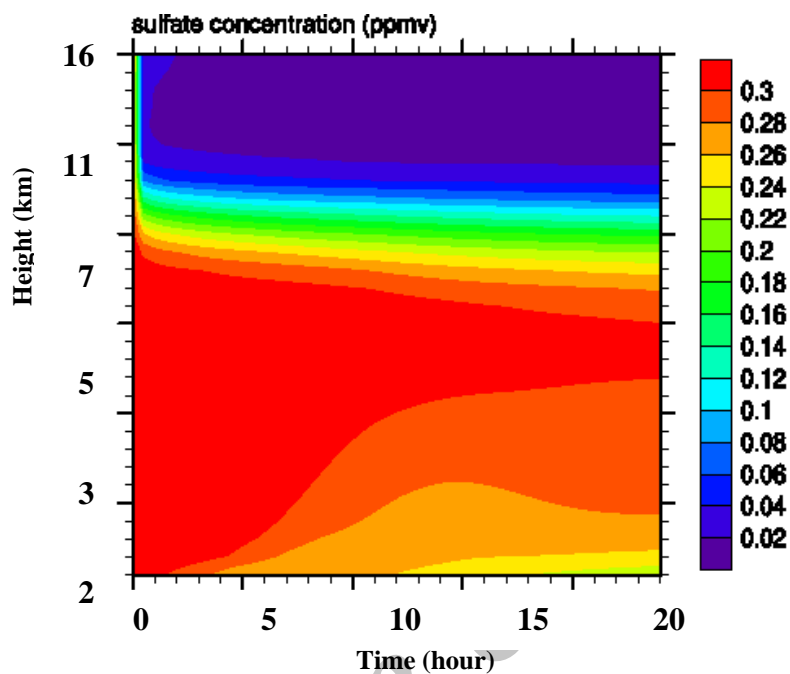
در این بخش به بررسی تحول ذرات هواویز در مدهای متفاوت در اثر فرایند برخورد و هم‌آمیزی ذرات پرداخته می‌شود. جرم و تعداد ذرات هواویز در مدهای متفاوت، در اثر برخورد با یکدیگر و در نتیجه انتقال ذرات به مدهای درشت‌تر می‌تواند دستخوش تغییر شود. به منظور بررسی این فرایند، در سومین آزمون از رشد ذرات در اثر میعان و نیز تشکیل ذرات سولفات جدید در اثر فرایند هسته‌بندی در شبیه‌سازی‌ها چشم‌پوشی و به ذرات تنها اجازه برخورد و هم‌آمیزی و انتقال به مدهای درشت‌تر داده می‌شود. در جدول ۲ تغییر جرم مؤلفه‌های هواویز متفاوت در اثر فرایند برخورد و هم‌آمیزی آورده شده است. با مقایسه مقادیر جدول، ملاحظه می‌شود که جرم مؤلفه‌های متفاوت هواویز، در اثر برخورد ذرات با مدهای درشت‌تر کاهش می‌یابد. علاوه بر برخورد و هم‌آمیزی، تغییر جرم مؤلفه‌های متفاوت هواویز در اثر فرایند میعان نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر تغییر جرم در اثر دو فرایند متفاوت، ملاحظه می‌شود که فرایند

مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که غلظت اسید سولفوریک مصرف شده در اثر هسته‌بندی در روش وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲) بیشتر از روش کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) است. تحول زمانی سولفات گازی انتگرالگیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی در ارتفاع ۷ کیلومتری، در حضور فرایند هسته‌بندی و با استفاده از دو طر حواره هسته‌بندی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

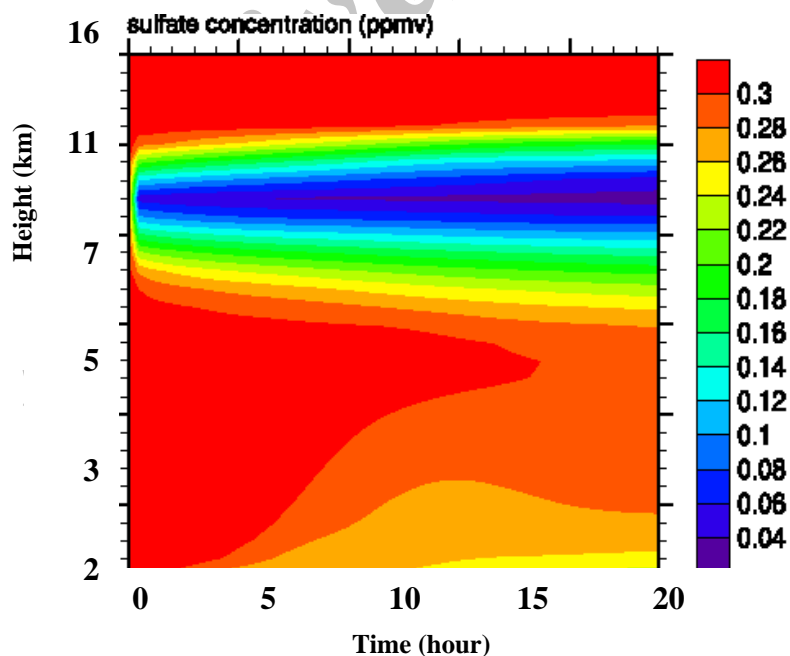
مقدار اسید سولفوریک مصرف شده در اثر فرایند میعان نیز در این شکل نشان داده شده است. در این شکل نیز کاهش غلظت اسید سولفوریک در اثر هسته‌بندی ذرات جدید سولفات با زمان، به‌ویژه در روش وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲) ملاحظه می‌شود. مقایسه دو فرایند میعان و هسته‌بندی، نشان می‌دهد که میزان اسید سولفوریک مصرف شده در فرایند هسته‌بندی، از مقدار

منجر به کاهش جرم ذرات در مدهای کوچک‌تر و افزایش ناچیزی در جرم مؤلفه‌های هواویز در مدهای درشت‌تر می‌شود.

میعان در تغییر جرم مؤلفه‌های هواویز و انتقال از مدهای نامحلول به مدهای آمیخته مربوطه نقش برجسته‌تری نسبت به برخورد و هم‌آمیزی ایفا می‌کند. برخورد ذرات هواویز



(الف)



(ب)

شکل ۹. تحول زمانی توزیع قائم اسید سولفوریک مصرف شده در فرایند هسته‌بندی ذرات هواویز با استفاده از طرحواره (الف) کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) و (ب) وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲).

جدول ۲. جرم انتگرال‌گیری شده مؤلفه‌های متفاوت ذرات هواویز در کل حوزه شبیه‌سازی و تغییرات جرم ایجاد شده در اثر هریک از فرایندهای میکروفیزیکی.

نوع هواویز	مد	جرم کل با گسیل اولیه (Mg)	جرم کل تغییر یافته با سه فرایند (Mg)	تغییر جرم در اثر برخورد و هم‌آمیزی (Mg)	تغییر جرم در اثر میعان (Mg)
سولفات SO <sub>4</sub>	هسته‌بندی آمیخته	-	۸۱۰۰۰	-۱۲۰۰	۲۹۰۰۰
	اینکن آمیخته	۱۵/۳	۹۲۰۰	۱۲۰۰	۸۰۰۰
	تجمعی آمیخته	۹۲	$۰/۳۸ \times ۱۰^۶$	$۰/۲۷ \times ۱۰^۶$	$۰/۱۱ \times ۱۰^۶$
کربن سیاه BC	درشت آمیخته	۲۳۵	۲۶۸۰	۵	۲۴۴۰
	اینکن نامحلول	۵۰۲	$۰/۲۴ \times ۱۰^{-۳}$	-۰/۹	-۵۰۱/۱
	اینکن آمیخته	-	۲۴۰	۵	۲۳۵
	تجمعی آمیخته	-	۳۶۲	۰/۰۲	۳۶۱/۹
کربن آلی OC	درشت آمیخته	-	۰/۵۲	۰/۰۱	۰/۵۱
	اینکن نامحلول	۵۸۲	$۰/۶۹ \times ۱۰^{-۳}$	-۰/۱	-۵۸۱/۹
	اینکن آمیخته	۱۰۸۰	۱۵۰	-۲	-۱۴۸
	تجمعی آمیخته	۱	۱۲۱۰	۱۰	۱۲۰۰
نمک دریا SS	درشت آمیخته	-	۴/۱۷	۴	۴/۱۳
	تجمعی آمیخته	۱۷۱	۲۳/۹	-۰/۱	-۴۳/۸
گرد و غبار Du	درشت آمیخته	۴۵۶۰۰	۴۶۱۰۰	۴۰۰	۱۰۰
	تجمعی نامحلول	۲۶۴۰	۰/۵۳	۱	-۲۶۳۹
	تجمعی آمیخته	-	۳۳۷	۰/۰۰۸	۳۳۷
	درشت نامحلول	۱۰ <sup>۶</sup>	۳۹۵۰۰	۰	$-۹/۶ \times ۱۰^۵$
	درشت آمیخته	-	$۰/۹۷ \times ۱۰^۶$	۰	$۰/۹۶ \times ۱۰^۶$

## ۵ نتیجه‌گیری

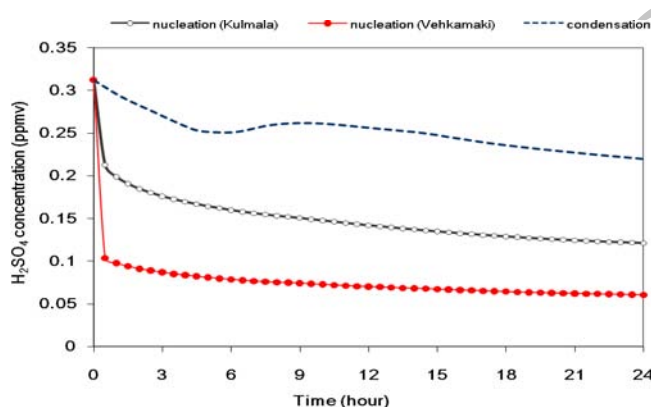
هسته‌بندی و برخورد و هم‌آمیزی در یک چارچوب شبه‌مدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های شبیه‌سازی برای دوره زمانی ۲۴ ساعته نشان داد که غلظت اسید سولفوریک گازی مورد استفاده برای فرایند هسته‌بندی و تشکیل ذرات سولفات ثانویه از مقدار اسید سولفوریک مصرفی در فرایند میعان بیشتر است. از سوی

در این مقاله با استفاده از مدل جفت شده جدید WRF-HAM، به بررسی فرایندهای میکروفیزیکی مؤثر بر تغییر توزیع اندازه ذرات هواویز، پرداخته شد. تحول زمانی تغییرات جرم ذرات هواویز سولفات، کربنات‌ها، نمک دریا و ذرات گرد و غبار در اثر فرایندهای میعان،

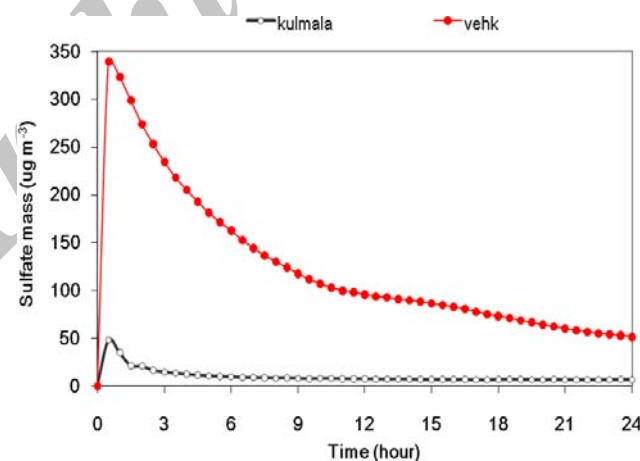


هوایز در مدهای نامحلول به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و این ذرات به مدهای آمیخته مربوطه منتقل می‌شوند. برخورد و هم‌آمیزی ذرات هوایز نیز منجر به تغییر جرم این ذرات و انتقال یافتن آنها به مدهای درشت‌تر می‌شود که این تغییر جرم، نسبت به تغییر جرم حاصل از فرایند میعان، به مراتب کمتر است.

دیگر، ذرات سولفات ثانویه در مد هسته‌بندی، عمدتاً در ارتفاعات ۷ کیلومتری از سطح دریا و در محیط ابری تشکیل می‌شوند. میعان اسید سولفوریک بر سطح ذرات هوایز، علاوه بر رشد این ذرات در هر دو مد آمیخته و نامحلول، منجر به تغییر ماهیت ذرات هوایز در مدهای نامحلول و در نتیجه انتقال این ذرات به مدهای آمیخته مربوطه می‌شود. به عبارتی در اثر فرایند میعان جرم ذرات



شکل ۱۰. تحول زمانی غلظت انتگرالگیری شده اسید سولفوریک در کل حوزه شبیه‌سازی در ارتفاع ۷ کیلومتری از سطح، با در نظر گرفتن فرایند میعان (خط چین) و فرایند هسته‌بندی با استفاده از دو طرحواره کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) و وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲).



شکل ۱۱. تحول زمانی جرم انتگرال‌گیری شده در کل حوزه شبیه‌سازی سولفات در مد هسته‌بندی در ارتفاع ۷ کیلومتری از سطح، با در نظر گرفتن فرایند هسته‌بندی با استفاده از دو روش کلمالا و همکاران (۱۹۹۸) و وهکامائیکی و همکاران (۲۰۰۲).

- IPCC, 2001, Climate change 2001- The scientific basis, Houghton, J. T., (Ed.): Cambridge Univ. Press.
- Jacobson, M. Z., 2001, Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols: *J. Geophys. Res.*, **106**, 1551-1568.
- Jacobson, M. Z., Tabazadeh, A., and Turco, R. P., 1996, Simulating equilibrium within aerosols and nonequilibrium between gases and aerosols: *J. Geophys. Res.*, **101**, 9079-9091.
- Kulmala, M., Laaksonen, A., and Pirjola, L., 1998, Parameterizations for sulfuric acid/water nucleation rates: *J. Geophys. Res.*, **103**, 8301-8307.
- Raes, F., and Van Dingenen, R., 1992, Simulations of condensation and cloud condensation nuclei in the remote marine boundary layer: *J. Geophys. Res.*, **97**, 12901-12912.
- Ramanathan, V., and Vogelmann, A. M., 1997, Greenhouse effect, atmospheric solar absorption, and the Earth's radiation budget: From the Arrhenius-Langely era to the 1990's: *Ambio*, **26**, (1), 38-46.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., and Rosenfeld, D., 2001a, Aerosols, climate, and the hydrological cycle: *Science*, **294**, 2119-2124.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Lelieveld, L., Mitra, A. P., Althausen, D., Anderson, J., Andreae, M. O., Cantrell, W., Cass, G. R., Chung, C. E., Clarke, A. D., Coakley, J. A., Collins, W. D., Conant, W. C., Dulac, F., Heintzenberg, J., Heymsfield, A. J., Holben, B., Howell, S., Hudson, J., Jayaraman, A., Kiehl, J. T., Krishnamurti, T. N., Lubin, D., McFarquhar, G., Novakov, T., Ogren, J. A., Podgorny, I. A., Prather, K., Priestley, K., Prospero, J. M., Quinn, P. K., Rajeev, K., Rasch, P., Rupert, S., Sadourny, R., Satheesh, S. K., Shaw, G. E., Sheridan, P., and Valero, F. P. J., 2001b, Indian ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze: *J. Geophys. Res.*, **106**, 28371-28398.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Korbblueh, 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.
- تشکر و قدردانی
- نویسندگان مقاله از مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک در کشور آلمان، بابت فراهم آوردن اطلاعات، داده‌ها و کدهای مورد نیاز در اجرای این طرح تحقیقاتی، تشکر و قدردانی می‌کنند.
- 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.
- Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O., and Warren S. G., 1987, Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate: *Nature*, **326**, 655-661.
- 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.
- 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 Aero Com: *J. Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 4321-4344.
- 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., Leaitch, 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., 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.

- size resolved aerosol mixture module for the use in global aerosol models: *J. Geophys. Res.*, **109**, D22202, doi: 10.1029/2003JD004485.
- Whitby, E. R., and McMurry, P. H., 1997, Modal aerosol dynamics modeling: *Aerosol Sci. Technol.*, **27**, 673-688.
- Williams, M. M. R., and Loyalka, S. K., 1991, *Aerosol science: Theory and Practice*: Pergamon, New York.
- Wilson, J., Cuvelier, C., and Raes, F., 2001, A modeling study of global mixed aerosol fields: *J. Geophys. Res.*, **106**, 34081-34108.
- 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.
- Zdanovskii, A. B., 1948, New methods for calculating solubilities of electrolytes in multicomponent systems: *Zhur. Fiz. Khim.*, **22**, 1475-1485.
- 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.
- 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, A., 2005, The aerosol-climate model ECHAM5-HAM: *J. Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1125-1156.
- Stokes, R. H., and Robinson, R. A., 1966, Interactions in aqueous nonelectrolyte solutions. I. Solute-solvent equilibria: *J. Phys. Chem.*, **70**, 2126-2130.
- 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

Archive