



# شبیهسازی اثرات تابشی تغییر غلظت مولکولهای جوّی با اجرای RRTMG

مهشید کاویانی<sup>۱</sup>، فرهنگ احمدی گیوی<sup>۲</sup>، علیرضا محبالحجه<sup>۳</sup> اد*انشجوی دکتری، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، mahshid.kaviani@ut.ac.ir <sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ahmadig@ut.ac.ir <sup>3</sup>استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، amoheb@ut.ac.ir* 

### چکیدہ

افزایش غلظت گازهای گلخانهای و کاهش غلظت لایه ازون از مهم ترین رخدادهایی هستند که بر شارهای تابشی و آهنگ گرمایش جو ّ اثر می گذارند. هدف از پژوهش حاضر، شبیه سازی اثرات تابشی تغییر غلظت مولکول های CO2، 20و H20 بر آهنگ گرمایش در ترازهای مختلف جوّ است. برای این منظور، مدل انتقال تابش سریع به کار رفته در مدل گردش کلّی (RTMG) در محدوده طول موج کوتاه با کاهش غلظت O3 و در محدوده طول موج بلند با افزایش غلظت CO2، O3 و در محدوده طول موج کوتاه با کاهش غلظت O3 و در محدوده طول موج بلند با افزایش غلظت CO2، O3 در ترازهای زیرین پوشن سپهر می شود. از سوی دیگر، گرمایش ناشی از افزایش گازهای گلخانهای (H2O و H2O) در ترازهای زیرین پوشن سپهر می شود. از سوی دیگر، گرمایش ناشی از افزایش گازهای گلخانهای (CO2، O3 و H2O) در مجموع تقویت سرمایش متاثر از هر دو رخداد در ورد سپهر زبرین و پوشن سپهر زیرین مشهود است. **ور مجموع تقویت سرمایش متاثر از هر دو رخداد در ورد** سپهر زبرین و پوشن سپهر زیرین مشهود است. **ور مجموع تقویت سرمایش متاثر از هر دو رخداد در ورد** سپهر زبرین و پوشن سپهر زیرین مشهود است.

# Simulation of the radiative effects of changes in concentration of atmospheric molecules using RRTMG

Mahshid Kaviani<sup>1</sup>, Farhang Ahmadi-Givi<sup>2</sup>, Ali R. Mohebalhojeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. candidate, Space Physics Department, Institute of Geophysics-University of Tehran, mahshid.kaviani@ut.ac.ir <sup>2</sup>Associate professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics-University of Tehran, ahmadig@ut.ac.ir <sup>3</sup>Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics-University of Tehran, amoheb@ut.ac.ir

#### Abstract

Increase in the greenhouse gas (GHG) concentrations and decreasing of the ozone layer concentration are the most important events that affect the atmospheric radiative fluxes and heating (cooling) rates. The goal of this study is to simulate the radiative impacts of changes in  $O_3$ ,  $CO_2$  and  $H_2O$  concentrations on the radiative heating rates at different levels of the atmosphere. To this aim, the rapid radiative transfer model for General Circulation Models, RRTMG, has been implemented in short wavelength (SW) and long wavelength (LW) ranges for decrease in  $O_3$  concentrations and increase in  $CO_2$ ,  $O_3$  and  $H_2O$  concentrations, respectively. Results show that decreasing of the  $O_3$  concentrations in the SW range increases downward fluxes and weakens atmospheric heating at the lower stratospheric levels. On the other hand, the atmosphere. In addition, increase in  $CO_2$  and  $O_3$  concentrations leads to more cooling at the upper troposphere. Overall, the strengthening of atmospheric cooling due to the both events is evident at the upper troposphere and lower stratosphere.

Keywords: radiative flux, heating rate, radiative transfer, greenhouse gases, ozone, RRTMG

۱ مقدمه

در دههها و به ویژه در سالهای اخیر، تغییر غلظت مولکولهای جوّی به دنبال فعالیتهای انسانی نقش بسزایی در تغییر بودجه تابشی کره زمین و تغییر اقلیم داشته است. از اینرو مطالعات بسیاری در زمینه وضعیت اقلیم جهانی و شیمی جوّ، روند تغییرات غلظت مولکولهای جوّی و اثرات تابشی ناشی آنها را مورد بررسی قرار دادهاند (مانند هاگلوستین و همکاران، ۱۹۹۴). نتایج این پژوهشها نشان میدهد افزایش غلظت گازهای گلخانهای و کاهش غلظت لایه ازون از





مهمترین رخدادهایی هستند که بر مقادیر شارهای تابشی و آهنگ گرمایش جوّی در ترازهای مختلف جوّ مؤثرند (مانند ریگبای و همکاران، ۲۰۱۴؛ بایس و همکاران، ۲۰۱۵). لازم به ذکر است این رخدادها علاوه بر فعالیتهای انسانی، تحت تاثیر فرایندهای فوتوشیمیایی جوّ و زنجیرهای از بازخوردها (feedback) قرار دارند و اثرات تابشی آنها تابعی از این فرایندها نیز میباشد. در پژوهش حاضر، در سادهترین شکل، با صرفنظر از پیچیدگی فرایندهای جوّی و بازخوردها، اثر تابشی تغییر غلظت مولکولهای CO2، CO و CP در ترازهای مختلف جوّ شبیهسازی شده است. هدف از این پژوهش بررسی چگونگی اثر کاهش غلظت مولکول CO در برهمکنش با تابش خورشیدی در محدوده طول موج کوتاه و همچنین مطالعه اثر افزایش غلظت مولکولهای CO2، CO و CPH (به عنوان مهمترین گازهای گلخانهای) در برهمکنش با تابش مطالعه اثر افزایش غلظت مولکولهای CO2، SO و O2H (به عنوان مهمترین گازهای گلخانهای) در برهمکنش با تابش رومینی در محدوده طول موج بلند است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع RTMG ( معایش در دو محدوده طول موج زمینی در محدوده طول موج بلند است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع و آهنگ سرمایش در دو محدوده طول موج بلند و کوتاه استفاده شده است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع و آهنگ سرمایش در دو محدوده طول موج زمینی در محدوده طول موج بلند است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع و آهنگ سرمایش در دو محدوده طول موج زمینی در محدوده طول موج بلند است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع و آهنگ سرمایش در دو محدوده طول موج زمینی در محدوده طول موج بلند است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع و آهنگ سرمایش در دو محدوده طول موج زمینی در محدوده طول موج بلند است. از این رو، مدل انتقال تابش سریع و آهنگ سرمایش در دو محدوده طول موج روش تو ان استفاده شده است. روش محاسبات در RTTMG میتنی بر رهیافت توزیع k همبسته است که دقت و سرعت انجام محاسبات در تعادل با یکدیگر قرار دارند (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷). لازم به ذکر است. RRTMG علاوه بر کاربرد در مدل های گردش کلی جوّان اثرات تابشی مؤلفهای جوّی را در مدل ساده شده مورد بررسی قرار داد. داده ها و روش تحقیق در بخش ۲ ارائه شده و بخش ۳ به نتایج پژوهش و نتیجه گیری اختصاص دارد.

## ۲ دادهها و روش تحقیق

همانطور که پیش تر اشاره شد، در این پژوهش، بهمنظور شبیهسازی فرایند انتقال تابش و انجام آزمایشهای مربوطه RRTMG بهصورت تکستونی اجرا شده است. برای محاسبه شارهای تابشی و آهنگ سرمایش در محدوده طولموج کوتاه و بلند بهترتیب روابط (۱) و (۲) به کار رفته است (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷):

$$F_{Net,SW} = F_{SW}^{\uparrow} - F_{SW}^{\downarrow} , \quad F_{Net,LW} = F_{LW}^{\uparrow} - F_{LW}^{\downarrow}$$

$$(1)$$

$$HR_{SW} = \frac{g}{C_p} \frac{F_{Net,SW}^{i} - F_{Net,SW}^{i-1}}{p^{i-1} - p^{i}} , \quad HR_{LW} = \frac{g}{C_p} \frac{F_{Net,LW}^{i-1} - F_{Net,LW}^{i}}{p^{i-1} - p^{i}}$$
(Y)

که در آن  $F_{SW} = F_{SW}$  و  $F_{SW}^{\downarrow}$  بهترتیب شار خالص در محدودههای طول موج کوتاه و بلند،  $F_{SW} = F_{SW}$  و  $F_{Net,LW}$  شارهای بالاسو و پایین سوی موج بلند،  $C_p$  خرفیت گرمایی ویژه، g شتاب گرانی و  $F_{LW}^{\downarrow}$  و  $F_{LW}^{\uparrow}$  شارهای بالاسو و پایین سوی موج بلند،  $F_{p}$  خرفیت گرمایی ویژه، g شتاب گرانی و  $F_{SW}$  و  $HR_{LW}$  و  $HR_{LW}$  و  $HR_{SW}$  و  $HR_{SW}$  و بالانویس i شماره ترازها در ستون جو از بالا به پایین است.

به منظور دسترسی به کدهای RRTMG در محدودههای طولموج کوتاه و بلند بهترتیب فایلهای RRTMG\_SW و RRTMG\_LW از وبگاه (download) شده و مطابق با دستورالعملهای موجود، پس از ویرایش فایل دادههای ورودی، آزمایشهای مورد نظر اجرا شدهاند. در فایل ورودی (INPUT\_RRTM)، مقادیر فشار، دما، ارتفاع و غلظت مولکولهای جوّی در هر تراز جوّ تعیین می گردد (شکل ۱). علاوه بر این، تعداد لایههای مدل، وضعیت هواویزها، ابرناکی، روش انجام محاسبات، موقعیت جغرافیایی، متغیرهای خورشیدی، گسیلندگی و بازتاب سطح و نحوه ذخیره خروجی مدل برای هر یک از مدلهای RRTMG\_SW و RRTMG\_LW به صورت جداگانه تنظیم می شود.

پس از ویرایش فایلهای ورودی، ابتدا بهمنظور بررسی اثرات تابشی گازهای مورد آزمایش، مقادیر غلظت تمامی گازهای جوّی صفر در نظر گرفته شده و RRTMG یک بار به ازای مقادیر غلظت مولکول O3 در محدوده طولموج کوتاه و بار دیگر به ازای مقادیر غلظت هر یک از مولکولهای CO2، O3 و H<sub>2</sub>O در محدوده طولموج بلند بهطور جداگانه اجرا شده است. پس از بررسی اثرات خالص تابشی هر یک از مولکولهای فوق، آزمایشهای مربوط به تغییر غلظت گازهای جوّی انجام شده است. در آزمایش اول برای بررسی اثرات کاهش غلظت O3







شکل ۱. نیمرخهای قائم دما برحسب K (الف)، فشار برحسب hPa (ب) و غلظت مولکولهای CO2 ،H2O و O3 برحسب ppmv (بهترتیب ج، د

و ہ).

# **۳ بحث و نتیجهگیری**

ژئوفيزيک ايران

شکل ۲ نتایج توزیع قائم آهنگ گرمایش جو به ازای غلظتهای O<sub>3</sub> و گازهای گلخانهای CO<sub>2</sub>، O<sub>6</sub> و H<sub>2</sub>O ا نشان میدهد. مطابق شکل ۲-الف، جذب تابش خورشیدی توسط O<sub>3</sub>مرایش قابل ملاحظه در وردسپهر فوقانی و پوشنسپهر زیرین را به دنبال دارد. از سوی دیگر، گازهای CO<sub>2</sub>، O<sub>6</sub> و H<sub>2</sub>O با دریافت تابش زمینی (در محدوده طول موج بلند) و بازانتشار آن در محیط موجب سرمایش در ستون جو میشوند (شکل ۲-ب). در واقع، به علت بالاتر بودن چگالی جو در ترازهای زیرین و جذب تابش بازانتشار یافته توسط گازهای گلخانهای به وسیله مولکول های جوی، اثر گلخانهای موجب گرمایش و افزایش دما میشود. از سوی دیگر، به دلیل کاهش چگالی جو با افزایش ارتفاع، تابش بازانتشار یافته توسط گازهای گلخانه ای از محیط خارج شده و سرمایش در ترازهای فوقانی غالب می شود. شایان ذکر است از آنجا که در شکل ۲-ب غلظت سایر مولکول ها صفر درنظر گرفته شده است، فقط اثر سرمایش در ستون جو مشاهده می شود.



شکل ۲. توزیع قائم آهنگ گرمایش (سرمایش) جوّ به ازای الف) غلظت O3 در طول موج کوتاه و ب) غلظت O3، O2 و H2O و H2O در طول موج بلند. در شکل ۳، اختلاف مقادیر آهنگ گرمایش برای O3(1/4) و O3(1/4)-HRO3(1/4) با اجرای RRTMG\_SW ارائه شده است. مطابق شکل، گرمایش ناشی از جذب تابش خور شیدی توسط O3 با کاهش غلظت این





مولکول تضعیف شده است. همچنین نتایج شبیهسازی نشان میدهد که کاهش غلظت O<sub>3</sub>، موجب افزایش شار پایینسو در ترازهای میانی و زیرین جوّ میشود (برای رعایت اختصار نتایج مربوط به آزمایش (O<sub>3</sub>(1/2 و مقادیر شارهای تابشی آن ارائه نشده است).



شکل ۳. اختلاف آهنگ گرمایش به ازای مقادیر استاندارد و کاهشیافته O<sub>3</sub> (()(HRO<sub>3</sub>(1)) (HRO<sub>3</sub>(1)) در محدوده طولموج کوتاه. در شکلهای ۴-لف تا ۴-ج نتایج مربوط به اختلاف مقادیر آهنگ گرمایش به ازای مقادیر غلظت استاندارد و ۴ برابر آن برای هر یک از گازهای گلخانهای CO<sub>2</sub> ، CO<sub>2</sub> و CO با اجرای RTTMG\_LW ارائه شده است. اگرچه اثرات بازخورد و سایر مؤلفههای جوّی در این شبیهسازی لحاظ نشده است، در این شکلها اثر گازهای گلخانهای (گرمایش در ترازهای زیرین و میانی جوّ) در حضور سایر مولکولهای جوّی نشان داده شده است (برخلاف شکل ۲). شکلهای ۴-ب و ۴-ج راکی از آن است، تقویت سرمایش در ترازهای فوقانی جوّ به موجب افزایش CO<sub>2</sub> و CO است که با توجه به ساختار مولکولی CO<sub>2</sub> و ویژگیهای تابشی آن سهم بیشتری در سرمایش نسبت به CO دارد. در شکل ۴-د اثر ترکیبی هر سه گاز گلخانهای با ۴ برابر کردن غلظت آنها دیده میشود (()HR<sub>GHG(4</sub>)-HR<sub>GHG(4</sub>) که نمایانگر مجموعی از اثرات افزایش گازهای گلخانهای با ۴ برابر کردن غلظت آنها دیده میشود (()HR<sub>GHG(4</sub>)-HR<sub>GHG(4</sub>)) که نمایانگر مجموعی از اثرات افزایش گازهای گلخانهای با ۴ برابر کردن غلظت آنها دیده میشود (()Hr<sub>GHG(4</sub>)-HR<sub>GHG(4</sub>)) که نمایانگر مجموعی از اثرات افزایش گازهای گلخانهای با ۴ برابر کردن غلظت آنها دیده میشود () تا و ۴-د میتوان نتیجه گرفت که هر دو رخداد افزایش تان میتوان بتیجه گرفت که هر در پروهش های ۳ و ۴ - دمیتوان نتیجه گرفت که هر دو رخداد افزایش زیری میتوان بتیجه گرفتی در برازهای مختلف جوّ است. براساس شکلهای ۳ و ۴ - دمیتوان نتیجه گرفت که هر دو رخداد افزایش زیره میتوان به تغییر در ساختار ترمودینامیکی جوّ، نیمرُخ قائم دمای جوّ و تغییر ارتفاع وردایست اشاره کرد. در پژوهشهای آن میتوان جنیایت اثرات تابشی غلظت مولکولهای جوّ بر ساختار ترمودینامیکی و دینامیکی جوّ را مورد مطالعه قرار داد.



HR<sub>CO2(4)</sub>- ) CO<sub>2</sub> (ب (HR<sub>H2O(4)</sub>- HR<sub>H2O(1</sub>)) H<sub>2</sub>O (شکل ۴. اختلاف آهنگ گرمایش به ازای مقادیر استاندارد و افزایشیافته برای الف) H<sub>2</sub>O (ب) (ب) H<sub>2</sub>O(4)- ب) ب) CO<sub>2</sub> (ب) بندر الحکاف (ب) (ب) H<sub>2</sub>O(4)- H<sub>2</sub>O

#### منابع

Hauglustaine, D. A., et al., 1994, The importance of atmospheric chemistry in the calculation of radiative forcing on the climate system. J. Geophys. Res., 99, 1173–1186.

Mlawer, E. J., et al., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J. Geophys. Res., 102, 663–682.

Rigby, M., et al., 2014, Recent and future trends in synthetic greenhouse gas radiative forcing. Geophysical Research Letters, 41, 2623–2630.

Bais, A. F., et al., 2015, Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. Photochem. Photobiol. Sci., 14, 19-52.