

## مطالعه عددی تأثیر هسته یخی بر بارش ابر فاز آمیخته همرفتی: مطالعه موردی

سمانه اشرفی<sup>۱</sup>؛ امید علیزاده چوبری<sup>۲</sup>؛ علیرضا محب‌الحجه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>کارشناس ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [samaneh\\_ashrafi@ut.ac.ir](mailto:samaneh_ashrafi@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup>استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [omid.alizadeh@ut.ac.ir](mailto:omid.alizadeh@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup>دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [amoheb@ut.ac.ir](mailto:amoheb@ut.ac.ir)

### چکیده

ویژگی‌های ابر و بارش علاوه بر تأثیرپذیری از دینامیک جو، به‌طور پیچیده‌ای به تعداد، اندازه و ترکیب شیمیایی هواویزها نیز وابسته است. بخشی از هواویزهای جو (از جمله گردوخاک) می‌توانند به شکل هسته‌های یخ بر خردفیزیک ابر تأثیر بگذارند. در مطالعه حاضر تأثیر تغییر غلظت هسته‌های یخ بر تغییر میزان بارش ابرهای فاز آمیخته همرفتی در منطقه تهران با استفاده از مدل منطقه‌ای WRF مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سه آزمایش انجام شد، آزمایش کنترلی (آزمایش ۱) با مدل منطقه‌ای WRF که در آن غلظت هواویزها از مدل جهانی GOCART استخراج شده است، انجام می‌شود. در آزمایش دوم غلظت هواویزهای یخ‌دوست با ضریب ۵ افزایش یافت. در آزمایش سوم غلظت هر دو هواویزهای یخ‌دوست و آب‌دوست پنج برابر شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بارش در آزمایش دوم به میزان ۱۵/۷ درصد و در آزمایش سوم ۹/۸ درصد نسبت به آزمایش کنترلی افزایش یافت که این افزایش برای آزمایش ۲ مقدار بیشتری داشت. هم‌چنین نتایج تغییر در تعداد آب‌شهاب‌ها و شعاع موثر را نیز نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بارش، هسته یخ، خردفیزیک ابر، هواویزها، WRF

## Numerical investigation of ice nuclei effects on precipitation for a convective mixed-phase cloud: A case study

Samaneh Ashrafi<sup>1</sup>; Omid Alizadeh-Choobari<sup>2</sup>; Alireza Mohebohojeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc, Graduate of Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

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

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

### Abstract

Microphysical properties of clouds and precipitation formation are highly influenced by the atmospheric dynamics, but they also depend on the number concentration, size, and chemical composition of aerosols. Some aerosols (such as dust) which act as ice nuclei can influence microphysics of clouds. In the present study, using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, the impact of the number concentration of ice nuclei on precipitation for a convective mixed-phased cloud over Tehran is investigated. Three sensitivity experiments are conducted. The control experiment (experiment 1) is that for which the concentration of aerosols is extracted from the Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) model. In the second experiment, the number concentration of ice-friendly aerosols is increased by a factor of 5. In the third experiment, the number concentration of both water-friendly and ice-friendly aerosols is increased by a factor of 5. Simulation results indicate that precipitation increases in both experiments 2 and 3 compared to experiment 1, and the increment is higher for experiment 2. Indeed, compared to experiment 1 accumulated precipitation during the simulation period is increased by 15.67% and 9.83% in the experiment 2 and 3, respectively. Results also indicate that the effective radius and number of hydrometers are different in the three experiments.

**Keywords:** precipitation, ice nuclei, cloud microphysics, aerosols, WRF

## ۱ مقدمه

بارش یکی از بنیادی‌ترین فرآیندهای بازگشت آب به زمین است و تغییر مقدار آن سبب تغییر وضع هوا و اقلیم در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌شود (منون و همکاران ۲۰۰۸). اگرچه تغییرپذیری زمانی و مکانی بارش به شدت تحت تأثیر دینامیک جو است (روگرز و یو ۱۹۸۹)، مطالعه‌های گذشته نشان می‌دهند فرآیندهای وابسته به خردفیزیک ابر که تا حدی تحت تأثیر هواویزها هستند نیز بر آن اثر دارند (تائو و همکاران ۲۰۱۲). افزایش فعالیت‌های بشر و رشد صنعتی شدن سبب تغییر توزیع اندازه و ترکیب هواویزهای طبیعی و مصنوعی در چند دهه اخیر شده است (گانتر و ۲۰۰۹). هم‌چنین، استفاده غیراصولی از زمین‌های کشاورزی سبب فرسایش خاک و افزایش غلظت گردوخاک معلق در جو شده است (لی و همکاران ۲۰۱۲). ذرات گردوخاک به همراه گیاهان پوسیده و پلانکتون‌هایی که در جو معلق هستند می‌توانند به‌عنوان هسته‌های یخ در شکل‌گیری بلورهای یخ نقش مهمی ایفا کنند (لوین و یانکوفسکی ۱۹۸۳). هواویزها با تغییر در روند شکل‌گیری قطره‌های ابر و بلورهای یخ نقش اساسی در خردفیزیک ابر ایفا می‌کنند (روزنفلد و همکاران ۲۰۰۸). افزایش غلظت هواویزها، کاهش شعاع مؤثر قطره‌های ابر و در نتیجه کاهش فرآیند برخورد و هم‌آمیزی را در پی دارد که به کاهش بارش در ابرهای گرم می‌انجامد (روزنفلد ۱۹۹۹)، اما در ابرهای فاز آمیخته به دلیل تقویت رشد قائم ابر در شرایط محیطی مناسب می‌تواند باعث افزایش کلی بارش شود (لی و همکاران ۲۰۱۱).

تأثیر هواویزهای ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. از آن‌جاکه بسیاری از نواحی ایران اقلیم خشک یا نیمه‌خشک دارند (علیزاده چوبری و نجفی ۲۰۱۸)، و کشور ایران در مجاورت چشمه‌های گردوخاک خارجی متعددی، به‌ویژه در غرب و جنوب‌غرب آن قرار گرفته است، انتظار می‌رود ذرات گردوخاک که می‌توانند به‌عنوان هسته یخ عمل کنند، نقش عمده‌ای در تغییر الگوی بارش در ایران داشته باشند. هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر افزایش تعداد هواویزهای یخ‌دوست بر میزان بارش است.

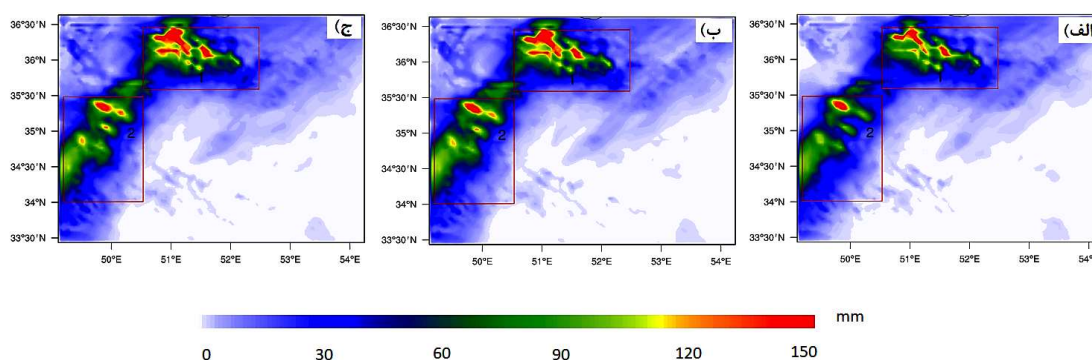
## ۲ توصیف مدل

در این پژوهش نسخه ۳/۷ مدل WRF شامل دو حوزه تودرتو با تفکیک‌های افقی ۲۵ و ۵ کیلومتر و ۴۵ تراز قائم در مختصات سیگما استفاده شده است. زمان اجرای مدل از ساعت ۱۸:۰۰ روز ۱۰ آوریل تا ساعت ۱۸:۰۰ روز ۱۲ آوریل ۲۰۱۵ است. شش ساعت نخست شبیه‌سازی‌ها به دلیل وجود خطای معمول در آغاز اجرای مدل حذف شده‌اند. شرایط اولیه و مرزی برای حوزه اول مدل از داده‌های تحلیل نهایی مرکز پیش‌بینی‌های محیطی NCEP/FNL با تفکیک افقی  $1^\circ$  و فاصله زمانی شش ساعت استخراج شده‌اند. داده‌های مربوط به کاربری زمین و عوارض سطح زمین داده‌های استاندارد USGS است. طرحواره‌های خردفیزیک شامل حل صریح فرآیندهای مرتبط با بخار آب، ابر و بارش در ساده‌ترین شرایط تا شرایط پیچیده فاز آمیخته هستند. از آن‌جاکه طرحواره‌های تک‌مؤلفه‌ای خردفیزیک ابر تنها نسبت آمیختگی جرمی آب‌شهاب‌ها را محاسبه می‌کنند و در به دست آوردن تعداد آب‌شهاب‌ها ناموفق‌اند، برای بررسی تأثیر تغییر غلظت هواویزها در میزان بارش نامناسب‌اند. به همین دلیل در این پژوهش از یک طرحواره دو‌مؤلفه‌ای که تامپسون و ایده‌م (۲۰۱۴) گسترش داده‌اند، استفاده می‌شود.

## ۳ نتایج

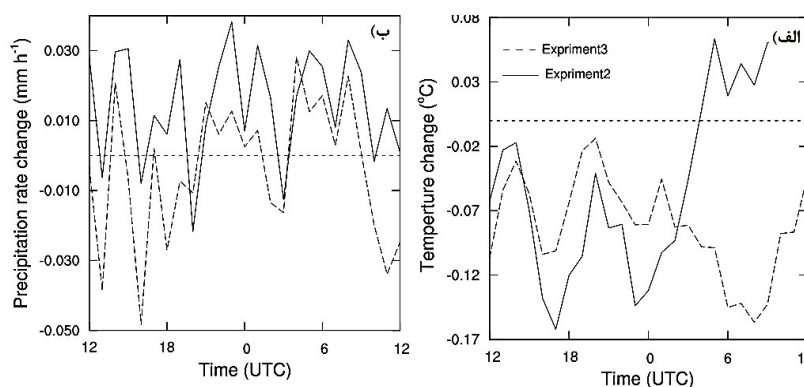
شکل ۱ بارش تجمعی رسیده به سطح زمین را در دوره شبیه‌سازی برای حوزه داخلی مدل نشان می‌دهد. با توجه به موقعیت جغرافیایی حوزه داخلی، بیشترین مقدار بارش در ارتفاع‌های شمال استان تهران در دامنه‌های رشته‌کوه البرز و ارتفاعات غرب استان مشاهده می‌شود که این دو منطقه با کادراه‌های قرمز رنگ، به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ در شکل مشخص شده‌اند. طبق گزارش سازمان هواشناسی ایران، بیشینه بارش استان تهران برای این رویداد در ایستگاه‌های لواسانات، شمیرانات و آبعلی ثبت شده است که هر سه ایستگاه در منطقه یک قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود الگوی مکانی بارش در هر سه آزمایش تقریباً مشابه یکدیگر است که این مسئله نشان می‌دهد توزیع بارش در آزمایش‌های ۲ و ۳ جابه‌جایی مکانی نداشته است و تنها مقدار بارش تغییر پیدا کرده است. برای درک بهتر میزان تغییر مقدار بارش، بارش تجمعی رسیده به سطح زمین روی تمام نقاط شبکه میانگین گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد بارش در آزمایش ۲ (شکل ۱ ب) نسبت به دیگر آزمایش‌ها

ها بیشتر بوده است و آزمایش ۳ و ۱ از نظر میزان بارش تجمعی به ترتیب در رتبه دوم و سوم قرار گرفته‌اند. بارش در آزمایش ۲ به میزان ۱۵/۶۷ درصد و آزمایش ۳ به میزان ۹/۸۳ درصد نسبت به آزمایش ۱ افزایش پیدا کردند.



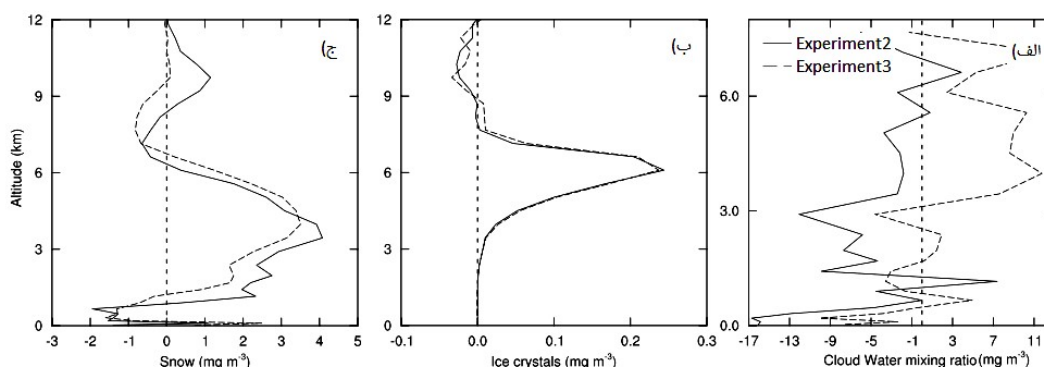
شکل ۱. بارش تجمعی (mm) (مقیاس رنگ) حوزه داخلی برای الف) آزمایش ۱ (کنترلی)، ب) آزمایش ۲ و ج) آزمایش ۳.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شد، در آزمایش‌های ۲ و ۳ مقدار بارش تجمعی افزایش پیدا کرده است، اما از این شکل اطلاعات دقیقی در مورد تفاوت زمانی و مقدار بارش‌ها به دست نمی‌آید. به همین دلیل، اختلاف آهنگ بارش در هر ساعت و همچنین دمای هوا در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین در آزمایش‌های ۲ و ۳ نسبت به آزمایش ۱ رسم شده‌اند (شکل ۲). شکل ۲-الف نشان می‌دهد که در کل دوره شبیه‌سازی، دمای هوا در آزمایش ۳ همواره کمتر از آزمایش ۱ بوده است، که این اختلاف تا ۰/۱۷ درجه سلسیوس در ساعت ۰۸:۰۰ UTC روز ۱۲ آوریل می‌رسد. در آزمایش ۲، از ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز یازدهم آوریل تا ساعت ۰۰:۰۰ UTC روز بعد دمای هوا نسبت به آزمایش ۱ پایین‌تر و در ادامه تا ساعت ۱۲:۰۰ دمای هوا بالاتر از آزمایش ۱ بوده است. کاهش تابش طول‌موج کوتاه خورشیدی رسیده به سطح زمین به دلیل افزایش سطح مقطع ابر در این آزمایش در طول روز و کاهش اتلاف تابش طول‌موج بلند زمینی به هنگام شب، به ترتیب سبب کاهش دمای سطح زمین در ابتدای دوره و افزایش آن در انتهای دوره شده است. بارش فرین ۰۰:۰۰ UTC در آزمایش ۲ سبب کاهش ابرناکی و افزایش دما در این آزمایش شده است. شکل ۲-ب که مربوط به آهنگ بارش است به خوبی نشان می‌دهد که در آزمایش ۲ نسبت به آزمایش ۳ مقدار بارش افزایش یافته است. با توجه به قله‌های نمودار در دو آزمایش مشاهده می‌شود که قله‌های آزمایش شماره ۲ نسبت به آزمایش شماره ۳ جابه‌جایی زمانی دارند. همچنین، ارتفاع قله‌های آزمایش شماره ۲ بیشتر است، که نشان‌دهنده این هستند که علاوه بر تأخیر در زمان بارش (به دلیل جابه‌جایی قله‌ها)، در آزمایش ۲ مقدار بارش (افزایش ارتفاع قله‌ها) نیز افزایش یافته است.



شکل ۲. تغییرات زمانی الف) دمای هوا در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین (°C) و ب) آهنگ بارش ( $\text{mm h}^{-1}$ ) که در حوزه داخلی مدل میانگین گرفته شده است. تغییرات معرف تفاضل هر یک از متغیرها در آزمایش ۱ نسبت به آزمایش‌های ۲ و ۳ است.

نیمرخ‌های قائم میانگین مکانی و زمانی چگالی جرمی آب شهاب‌ها در آزمایش‌های ۲ و ۳ نسبت به آزمایش ۱ در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. جرم قطرک‌های ابر در آزمایش شماره ۳ نسبت به دو آزمایش دیگر بیش‌تر است (شکل ۳-الف). افزایش غلظت هواویزهای آب‌دوست در آزمایش شماره ۳ منجر به میعان بیشتر بخار آب روی آنها می‌شود؛ بنابراین محتوای آب ابر افزایش می‌یابد. اختلاف محتوای آب ابر در آزمایش ۳ دارای دو مقدار بیشینه به میزان  $11 \text{ mg m}^{-3}$  در ارتفاع‌های چهار و هفت کیلومتر است. با وجود این‌که در آزمایش شماره ۲ غلظت هواویزهای آب‌دوست مشابه آزمایش شماره ۱ است، کاهش میزان محتوای آب ابر در این آزمایش (شکل ۳-الف) به دلیل افزایش تعداد هواویزهای یخ‌دوست و در نتیجه افزایش تعداد بلورهای یخ در این آزمایش است. این موضوع نشان می‌دهد که بخشی از قطرک‌های آب ابر تبخیر شده‌اند و بدین ترتیب بخار آب لازم برای رشد پخشی بلورهای یخ فراهم شده است. چگالی جرمی بلورهای یخ در آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ تقریباً یکسان است (شکل ۳-ب) که با توجه به مقدار برابر هواویزهای یخ‌دوست در هر دو آزمایش قابل انتظار است. در این دو آزمایش، بخار آب موجود در جو و هم‌چنین قطرک‌های آب ابر سرد می‌توانند از طریق انواع هسته‌زایی‌های ناهمگن به بلور یخ تبدیل شوند. در آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ تعداد هواویزهای یخ‌دوست افزایش پیدا کرده‌اند؛ در نتیجه هسته‌زایی ناهمگن بیشتری روی سطح آنها انجام شده است، که پیامد آن کاهش مقدار بخار آب موجود در ابر نسبت به آزمایش شماره ۱ است. از آنجاکه در ارتفاع‌های بالاتر که هوا سردتر است هسته‌زایی همگن غالب است، در آزمایش شماره ۱ بخار آب کافی برای هسته‌زایی همگن در دسترس است و بلورهای یخ از طریق هسته‌زایی همگن تولید شده‌اند که افزایش جرم بلورهای یخ را در این آزمایش در پی داشته است (شکل ۳-ب). چگالی جرمی برف در آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ به هم نزدیک و بیشتر از آزمایش شماره ۱ است. مقدار برف در ارتفاع‌های پایین‌تر از شش کیلومتر قابل توجه است که بیشینه مقدار آن در حدود ۴ کیلومتر با اختلاف ۲ کیلومتر پایین‌تر از ارتفاع بیشینه بلورهای یخ رخ داده است (شکل ۳-ج).



شکل ۳. نیمرخ‌های قائم اختلاف چگالی جرمی (الف) قطرک ابر ( $\text{mg m}^{-3}$ )، (ب) بلور یخ ( $\text{mg m}^{-3}$ )، (ج) برف ( $\text{mg m}^{-3}$ ) در آزمایش‌های ۲ (خط توپر) و ۳ (خط چین) نسبت به آزمایش ۱ که روی حوزه داخلی مدل در دوره شبیه‌سازی میانگین گرفته شده است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

تحلیل بارش تجمعی رسیده به سطح زمین نشان از عدم جابه‌جایی مکانی الگوی بارش، افزایش مقدار بارش در آزمایش‌های ۲ و ۳ در مقایسه با آزمایش ۱ و اختلاف ناچیز بین میزان بارش آزمایش‌های ۲ و ۳ داشت. هم‌چنین، آهنگ بارش ساعتی نشان داد که در آزمایش ۲ تأخیر در وقوع بارش رخ داده است. افزایش غلظت هواویزهای یخ‌دوست سبب چگالش بیشتر بخار آب می‌شود؛ در نتیجه گرمای نهان بیشتری آزاد می‌شود که با تقویت فراهنج‌ها و فروهنج‌های داخل ابر، رشد قائم ابر را در پی دارد. با افزایش رشد قائم ابر و افزایش ابراشباع محیط، زمان رشد آب‌شهاب‌ها طولانی‌تر و اندازه آنها بزرگ‌تر می‌شود. در نتیجه در کنار تأخیر در وقوع بارش، مقدار بارش رسیده به سطح زمین نیز افزایش می‌یابد. تحلیل نقشه‌های توزیع مکانی چگالی جرمی آب‌شهاب‌ها نشان از تفاوت در فرآیند بارش دو منطقه مشخص شده روی حوزه داخلی دارد. در منطقه ۱ بلورهای یخ، برف و گویچه‌برف مقدار بیشتری نسبت به سایر مناطق داشت و در منطقه ۲ مقدار قطره باران و قطرک ابر بر دیگر آب‌شهاب‌ها غلبه می‌کرد؛ در نتیجه رشد آب‌شهاب‌ها و وقوع بارش در منطقه ۱ طی فرآیند بارش سرد و در منطقه ۲ طبق فرآیند بارش

گرم صورت گرفته است. ارتفاع بیشتر منطقه ۱ و به دنبال آن کاهش دما و فشار هوا می‌تواند در نوع بارش در این مناطق نقش مهمی ایفا کرده باشد.

#### منابع

- Alizadeh-Choobari O, Najafi S (2018) Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Clim.Dyn.* 50:249-260.
- Gunturu, U.B. (2010), Aerosol-Cloud Interactions: A New Perspective in Precipitation Enhancement, Submitted to the Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy at the Massachusetts Institute of Technology.
- Levin, Z. and Yankofsky, S. (1983) Contact versus immersion freezing of freely suspended droplets by bacterial ice nuclei. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22:1964–1966.
- Li, Z., Niu, F., Fan, J., Liu, Y., Rosenfeld, D. and Ding, Y. (2011) Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nat. Geosci.* 4:888–894.
- Menon, S, et.al. (2008) Climate effects of Black Carbon aerosols in China and India, *Science* 297:2250-2253.
- Rogers R.R., and M.K. Yau, (1989) *A Short Course in Cloud Physics*, 304 pp., Pergamon, Tarrytown, N.Y.
- Rosenfeld, D. (1999), TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 26:3105–3108.
- Rosenfeld D., et al. (2008) [Flood or drought: how do aerosols affect precipitation?](#), *Science* 321:1309-1313.
- Tao, P., et al. (2012) Impact of aerosols on convective clouds and precipitation. *Rev. Geophys.* 50:RG2001/2012.
- Thompson, G., Eidhammer, T., (2014) A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *J. Atmos. Sci.* 71(10):3636–3658.