

## Precipitation changes due to cloud seeding operations by WRF meso-scale model

Moradi, Sh.<sup>1</sup>  | Javanmard, S.<sup>2</sup>  | Ghader, S.<sup>3</sup>  | Azadi, M.<sup>4</sup>  | Gharaylou, M.<sup>5</sup> 

1. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: [moradi41291@gmail.com](mailto:moradi41291@gmail.com)

2. **Corresponding Author**, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: [sohailajavanmard2018@gmail.com](mailto:sohailajavanmard2018@gmail.com)

3. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [sghader@ut.ac.ir](mailto:sghader@ut.ac.ir)

4. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: [azadi68@hotmail.com](mailto:azadi68@hotmail.com)

5. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [gharaylo@ut.ac.ir](mailto:gharaylo@ut.ac.ir)

(Received: 6 March 2022, Revised: 18 April 2022, Accepted: 4 Oct 2022, Published online: 14 June 2023)

### Summary

Numerous numerical experiments have been performed to cloud model seeding over the last two decades. Silver iodide nucleation has been parameterized using different methods in these studies. The results of these studies indicate that cloud seeding can change the distribution of precipitation in most cases. Moreover, most of these numerical simulations have been used only in the field of convective cloud seeding and are incapable of complete simulation of atmospheric conditions. For this purpose, the governing equations should be parameterized in three dimensions for the general case and be used in the appropriate model.

In this study, the effect of cloud seeding, whether increasing or decreasing in rainfall, has been studied. For this purpose, the WRF numerical model has been developed to simulate the cloud seeding. Since, it is virtually impossible to repeat experiments under similar meteorological conditions, a model that can simulate the effect of cloud seeding on microphysical processes and precipitation could avoid many speculations or inaccurate estimates. The basic hypothesis of cloud seeding is based on the physical principle that at sub-freezing temperatures the equilibrium vapor pressure relative to ice is lower than the equilibrium vapor pressure relative to liquid water. Therefore, the saturated environment with 100% relative humidity relative to water (RHW = 100%) will be supersaturated relative to ice at temperatures below zero degrees Celsius (Pruppacher and Klett, 2010). As a result, in a cloud that is saturated with liquid water and composed of supercooled cloud water droplets, ice particles grow rapidly to form larger and heavier drops which could be fall as rain drops. In that environment, tiny, supercooled cloud droplets either grow in upward motion or evaporate to provide vapour for ice to grow. Therefore, in the cloud seeding with silver iodide, ice particles are expected to be produced and grow in the cold part of the cloud, and the liquid water of the cloud will be transformed into ice phase species more quickly.

The operational cloud seeding project has been carried out in the northwest area of Iran. At the time of operational project, the seeding target area was under the influence of the eastern Mediterranean low pressure center, this trough has caused the formation of divergence in its downstream in the upper levels of the atmosphere in the target area and has led to the formation of severe upward movements. Stable and thick clouds have formed in the area. Under the above mentioned environmental conditions, 44 pyrocatrons of 4% silver iodide were fired at the target area by a seeding aircraft. Silver iodide particles measuring 0.1 to 1 mm are very effective in freezing nuclei. In this study, the effect of seeding is coded based on the model of Meyers et. al (1995) and Seto et. al (2011) by applying the seeding conditions into the Morrison scheme code within the WRF model and changing the number density and mixing ratio of cloud ice due to the silver iodide injected into the atmosphere.

By simulating the effect of cloud seeding, meteorological quantities, including precipitation under seeding conditions, are estimated by changing the Morrison microphysical scheme in the WRF model. The WRF numerical model was also run in control mode (without applying cloud seeding relations). By comparing the output rainfall of the numerical model in seeding mode with the output rainfall of the numerical model in control mode, the amount of cloud seeding effect was determined.

The results showed that the changes resulting from seeding in the studied cloud seeding operation were not favorable in all stations, and in some cases, the decrease in precipitation was seen 2 hours after seeding. This decrease in some stations, such as Maragheh, Tabriz, Sahand, and Khoy, starts from seeding time and continues until the end. But in a station like Sarab, although the rainfall decreases slightly at the beginning of cloud seeding, over time, it increases to 7% after two hours. While seeding in Parsabad, and Ahar stations resulted in precipitation enhancement by 3%, 9%, and 27% two hours after seeding, respectively.

**Keywords:** Cloud seeding Modelling, WRF Meso-scale Model, precipitation, cloud seeding operation,, Morrison Scheme, Northwest of Iran.

**Cite this article:** Moradi, Sh., Javanmard, S., Ghader, S., Azadi, M., & Gharaylou, M. (2023). Precipitation changes due to cloud seeding operations by WRF meso-scale model. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(1), 171-187. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2022.339015.1007406>

## مطالعه موردی تغییرات بارش ناشی از عملیات بارورسازی ابر در منطقه شمال غرب ایران با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF

شقایق مرادی<sup>۱</sup> | سهیلا جوانمرد<sup>۲</sup> | سردمد قادر<sup>۳</sup> | مجید آزادی<sup>۴</sup> | مریم قزابلو<sup>۵</sup>

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [moradi41291@gmail.com](mailto:moradi41291@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [sohailajavanmard2018@gmail.com](mailto:sohailajavanmard2018@gmail.com)

۳. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [sghader@ut.ac.ir](mailto:sghader@ut.ac.ir)

۴. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [azadi68@hotmail.com](mailto:azadi68@hotmail.com)

۵. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [gharaylo@ut.ac.ir](mailto:gharaylo@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۲۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۷/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

### چکیده

در این مقاله اثر بارورسازی ابر سرد در یکی از عملیات‌های صورت گرفته توسط مرکز ملی بارورسازی ابرها در منطقه شمال غرب ایران بر بارش منطقه با استفاده از مدل میان‌مقیاس تحقیقات پیش‌بینی و وضع هوا (WRF) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور روابط فرایند خردفیزیک بارورسازی ابر پارامتره شد، سپس در طرح‌واره خردفیزیک موریسون موجود در مدل WRF پیاده‌سازی شد. با شبیه‌سازی بارورسازی ابر توسط این مدل توسعه یافته، مقدار بارش تولید شده بعد از بارورسازی محاسبه شد و با مقدار بارش تخمین زده شده توسط مدل WRF در حالت کنترلی (بدون بارورسازی ابر) مقایسه شد. از آنجاکه عمر ابر در زمان تزریق پیروپاترون‌ها و همچنین میزان آب سرد ابر در زمان برخورد با پیروپاترون‌های مشتعل شده تأثیر بسزایی در اثر بارورسازی ابر دارد و در زمان عملیات، عمر ابر و میزان آب سرد ابر در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده است، بارورسازی در نقاط مختلف تأثیر متفاوتی داشت. عملیات بارورسازی موجب افزایش بارش باران در ایستگاه‌های باران‌سنجی ارومیه (۳٪)، اهر (۲۷٪)، سراب (۷٪)، پارس‌آباد (۹٪) واقع در منطقه شمال غرب ایران شد و این در حالی است که در برخی ایستگاه‌ها، بارورسازی موجب کاهش بارش ۱۱٪، ۱٪، ۴٪، ۱۲٪ و ۱۰٪ ای به ترتیب برای ایستگاه‌های مراغه، تبریز، مهاباد، سهند و خوی دو ساعت پس از بارورسازی شد.

واژه‌های کلیدی: بارورسازی ابر، بارش، مدل میان‌مقیاس WRF، شمال غرب.

### ۱. مقدمه

بررسی‌های آماری، فیزیکی و عددی می‌باشند. در روش ارزیابی فیزیکی، تغییرات ایجاد شده در بعضی پارامترهای ابر از قبیل تعداد و شکل بلورها، طیف ذرات با استفاده از شمارشگرهای IN و CCN (هسته‌های یخ و هسته میعان ابر) و تجهیزات نمونه‌گیری قطرک‌های ابر اندازه‌گیری می‌شوند (پخارل و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸). اولین شاهد فیزیکی از اثر بارورسازی در یک محیط کوهستانی به‌وسیله هابز (۱۹۷۵) در سه مطالعه موردی از بارورسازی به‌وسیله هواپیما در ابرهای پوشش‌کومه‌ای و کومه‌ای در هر حالت افزایش غلظت ذرات یخ در ابر، تغییر شکل ذرات یخ، افزایش غلظت یدید نقره در برف

از نظر مدیریت منابع آب، بارورسازی ابرهای زمستانی می‌تواند به افزایش بارش کمک کند و روش مؤثری جهت تقویت مخازن طبیعی برف در کوهستان‌ها می‌باشد (رابر و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات اولیه ارزیابی بارورسازی ابرها در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ که شامل تحقیقات میدانی دقیق بود باعث پیشرفت در درک شرایطی شد که تحت آن بارورسازی ابرها می‌تواند بارش را افزایش دهد اما در آن زمان تعیین دقیق میزان این افزایش ممکن نبود (رابر و همکاران، ۲۰۱۹). تلاش‌های زیادی در سراسر جهان به‌منظور مطالعه اثر بارورسازی ابرها بر روی بارش انجام شده است. این مطالعات شامل

استناد: مرادی، شقایق؛ جوانمرد، سهیلا؛ قادر، سردمد؛ آزادی، مجید و قزابلو، مریم (۱۴۰۲). مطالعه موردی تغییرات بارش ناشی از عملیات بارورسازی ابر در منطقه شمال غرب ایران با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۱)، ۱۷۱-۱۸۷. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2022.339015.1007406>

سطح زمین و افزایش سرعت ریزش برف مشاهده شده نسبت به زمان و مکان با توجه به مسیر حرکت ذرات یخ گزارش شده است. بهترین مکانی که اثر بارورسازی دیده می‌شود بارش از ابرهای کوهستانی است که شامل آب ابرسرد کافی و تعداد کمی یخ هستند. این ابرها حتی در رادارها با طول موج کوتاه، به صورت طبیعی پژواک راداری ضعیفی دارند و یا اصلاً در رادار دیده نمی‌شوند. در نتیجه، غلظت ذرات یخ تولید شده به وسیله بارورسازی به خوبی قابل مشاهده است. هابز و همکاران (۱۹۸۱) و دشر و رینلدز (۱۹۹۰) نیز نتایج مشابهی را گزارش دادند. آن‌ها نشان دادند که آشکارترین اثر بارورسازی هنگامی است که ابر بسیار کم عمق و بارش برف طبیعی ناچیز باشد. دشر و همکاران (۱۹۹۰) در یک منطقه بدون پژواک راداری بعد از بارورسازی یک پژواک رادار گزارش کردند.

در ارزیابی آماری، به منظور تعیین میزان بارش استحصال شده ناشی از اجرای پروژه‌های باروری ابرها، بارندگی منطقه هدف (منطقه‌ای که بسته به ابرهای قابل بارور در یک دوره خاص، تحت تأثیر مواد باروری قرار می‌گیرد) با بارندگی منطقه شاهد (منطقه‌ای مجاور منطقه هدف و مشابه از نظر اقلیمی، کوهساری، شرایط باد و غیره که تحت تأثیر مواد باروری قرار نمی‌گیرد) با روش‌های مختلف (روش نسبت‌ها، روش وایازش تاریخی و غیره) مقایسه می‌شود (برید و همکاران، ۲۰۱۴؛ ویو و همکاران، ۲۰۱۸). در روش نسبت‌ها که یکی از روش‌های آماری است، به دلیل آن که فقط از یک کمیت (میانگین) استفاده می‌شود، نتایج حاصل همراه با ریسک بالایی از احتمال خطا در تخمین می‌باشد. روش آماری دیگر یعنی روش وایازش تاریخی نیز دارای محدودیت‌ها و نواقصی است. یکی از محدودیت‌های این روش این است که آمار تاریخی بارش بایستی نرمال باشد. نرمال نبودن داده‌های واقعی، فرض تبعیت انحرافات حول خط وایازش از توزیع نرمال را زیر سؤال می‌برد. محدودیت دیگر این روش آن است که بایستی روند سری‌های زمانی بارش مربوط به

مناطق شاهد و هدف یکسان باشند. مشابه نبودن روند در این دوسری زمانی باعث تضعیف همبستگی و برآوردهای نامطمئن خواهد شد. در ارزیابی بارورسازی به وسیله مدل عددی، بارورسازی ابرها به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود و اثر بارورسازی بر بارش مورد بررسی قرار می‌گیرد. از میان روش‌های ارزیابی بارورسازی، تنها مطالعات عددی، توانایی شبیه‌سازی هر دو حالت بارورسازی و حالت طبیعی را دارا هستند. در طی دو دهه اخیر، آزمایش‌های عددی زیادی به منظور مدل‌سازی باروری ابر انجام شده است (از جمله میرز و همکاران، ۱۹۹۵؛ بین و همکاران، ۲۰۰۰؛ جو و همکاران، ۲۰۰۶؛ چن و خیائو، ۲۰۱۰؛ جوانمرد و پیر حیات، ۲۰۱۲؛ چپو و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعات با استفاده از روش‌های مختلف، هسته‌زایی یدید نقره پارامترسازی شده است. نتایج این مطالعات گویای آن است که بارورسازی ابر می‌تواند توزیع بارش را در بیشتر مواقع تغییر دهد. ضمن اینکه بیشتر این شبیه‌سازی‌های عددی، تنها در زمینه بارورسازی ابرهای همرفتی به کار برده شده است و در شبیه‌سازی کامل شرایط جوئی ناتوان هستند. بدین منظور باید روابط حاکم به شکل سه بعدی و برای حالت کلی پارامترسازی شده و در مدل مناسب از آن‌ها استفاده شود. خو و همکاران (a, b, c, d, ۲۰۱۳، b, ۲۰۱۶a و ۲۰۱۷) توانستند مدل عددی توسعه یافته خود را با طرح‌واره پارامترسازی خردفیزیک تامپسون در مدل WRF به صورت جفت شده استفاده کنند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که بارورسازی می‌تواند باعث افزایش باران شود. گرسدی و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۲۰) نیز این مدل را با کمی تغییرات به صورت ذره‌ای نوشته و بارش حاصل از بارورسازی را مورد ارزیابی قرار دادند. ارزیابی عملیات بارورسازی یکی از حساس‌ترین مراحل کار پروژه‌های افزایش بارش به وسیله بارورسازی ابرها است. برای محاسبه مقدار آب اضافی استحصال، چالش‌های زیادی پیش روی ماست؛ بین مقدار بارش در یک منطقه مشخص و منطقه دیگر در یک فصل معین، تغییرات طبیعی بزرگی

طرح بارورسازی ابر در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ در فلات مرکزی ایران، افزایش بارش ۴۶٪ در طرح بارورسازی ابر در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹ در حوضه گاوخونی.

در این مطالعه به منظور ارزیابی بارورسازی از روش شبیه سازی عددی استفاده شده است. بدین منظور اثر بارورسازی در حالتی که ابرها توسط دید نقره در شمال غرب ایران بارور شده اند به صورت سه بعدی شبیه سازی شده و معادلات ناشی از بارورسازی ابرها در طرح واره پارامترسازی خردفیزیک موریسون در مدل WRF اضافه شده است. در ادامه طراحی و صحت سنجی مدل بارورسازی برای عملیات منتخب نشان داده خواهد شد و در نهایت نتایج شبیه سازی عددی، بارش مشاهداتی و بارش طبیعی شبیه سازی شده ارائه خواهد شد.

## ۲. داده ها و روش تحقیق

پروژه بارورسازی مورد مطالعه در مناطق عملیاتی در شمال غرب ایران در تاریخ ۳۰ آذر ۱۳۹۱ در ساعت ۱۴:۰۰ تا ۱۶:۰۰ UTC انجام شده است. در این زمان در منطقه هدف بارورسازی (شمال غرب ایران) ابرهای پایدار و ضخیمی در منطقه شکل گرفته اند. شکل ۱ گمانه زنی شبیه سازی شده توسط مدل WRF قبل از بارورسازی در ایستگاه تبریز را نشان می دهد که مقدار انرژی پتانسیل دسترس پذیر همرفتی (CAPE Convective Available) (Potential Energy) صفر است و در نتیجه عدد ریچاردسون کپه ای (Bulk Richardson Number) BRN نیز صفر است - BRN نسبت شناوری به چپش قائم است و به منظور ارزیابی پایداری دینامیکی استفاده می شود (بلواشتاین، ۱۹۹۲). در نتیجه احتمال کمی برای ایجاد ناپایداری شدید وجود دارد. با توجه به نمودار هتروگراف مشخص است که باد با ارتفاع در جهت عقربه های ساعت می چرخد (پیشگردی) و در نتیجه منجر به فرافرت گرم و صعود دینامیکی می شود. دو ساعت پس از اجرای عملیات بارورسازی ابر، ابرهای پوشنی (Stratus) در روز ۳۰ آذر ۱۳۹۱ ساعت ۱۸ UTC زیر لایه وارونگی مشاهده

وجود دارد. از طرف دیگر به دلیل این که افزایش بارش حاصل از باروری ابرها در بازه تغییرپذیری بارش طبیعی می باشد و یا حتی اثرات یک پروژه افزایش بارش عموماً از تغییرات موجود در بستر طبیعی بارندگی می تواند کوچک تر باشد، بنابراین محاسبه افزایش بارش نسبت داده شده به بارورسازی ابرها پیچیده است. در واقع تعیین اثرات این نوع پروژه ها همانند جستجو برای یافتن یک سیگنال ضعیف در میان امواج تصادفی است (خو و همکاران، ۲۰۱۲). بیشتر روش های موجود و مورد استفاده در ارزیابی عملیات از جمله روش های آماری دارای نواقص و خطای بسیاری است، ولی در این میان، روش شبیه سازی عددی بارورسازی نواقص کمتر و ویژگی های بارزتری دارد (خو و همکاران، ۲۰۱۶a).

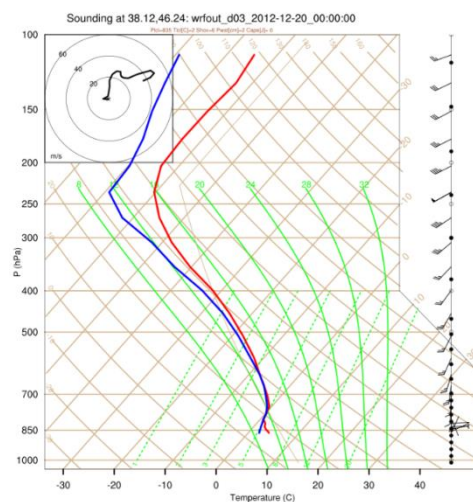
بارورسازی ابر در ایران تاریخچه ای ۵۰ ساله دارد که به وسیله مرکز ملی مطالعات و تحقیقات باروری ابر در یزد شروع شد. روش ارزیابی در ایران روش آماری وایزش تاریخی است؛ اما پروژه های انجام شده در ایران ویژگی های منحصر به فردی دارند، منطقه عملیات بسیار بزرگ و شامل مناطقی با تنوع اقلیمی زیاد می باشد؛ بنابراین ارزیابی بایستی در مناطق با ایستگاه های هم بارش به صورت جداگانه انجام شود و همچنین به دلیل عدم وجود منطقه ثابت هدف، منطقه شاهد در هر ماه متغیر بوده است (برادران و همکاران، ۱۳۹۳). مجومرد و همکاران (۱۳۹۵) نیز در پژوهشی با استفاده از وایزش تاریخی به بررسی تأثیر بارورسازی ابرها بر روی بارش در استان فارس پرداختند. نتایج تحقیق آن ها، افزایش ۱۵ درصدی بارش را در استان فارس در دوره چهار ماهه مورد بررسی نشان می دهد. آن ها همچنین نتایج برخی از پروژه های ارزیابی انجام شده توسط مرکز ملی مطالعات و تحقیقات باوری یزد که با روش وایزش تاریخی انجام شده است را بیان کرده اند، از جمله افزایش بارش ۲۸٪ در طرح بارورسازی ابر در سال آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۸ در استان یزد، افزایش بارش ۵۴٪ در طرح بارورسازی ابر در سال آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۸ در استان گیلان، افزایش بارش ۱۹/۵٪ در

باد، نسبت اختلاط هوا آب‌های مختلف و غیره را در بردارند.

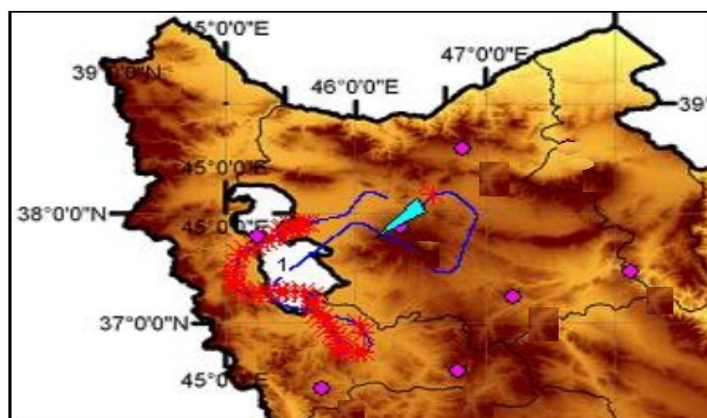
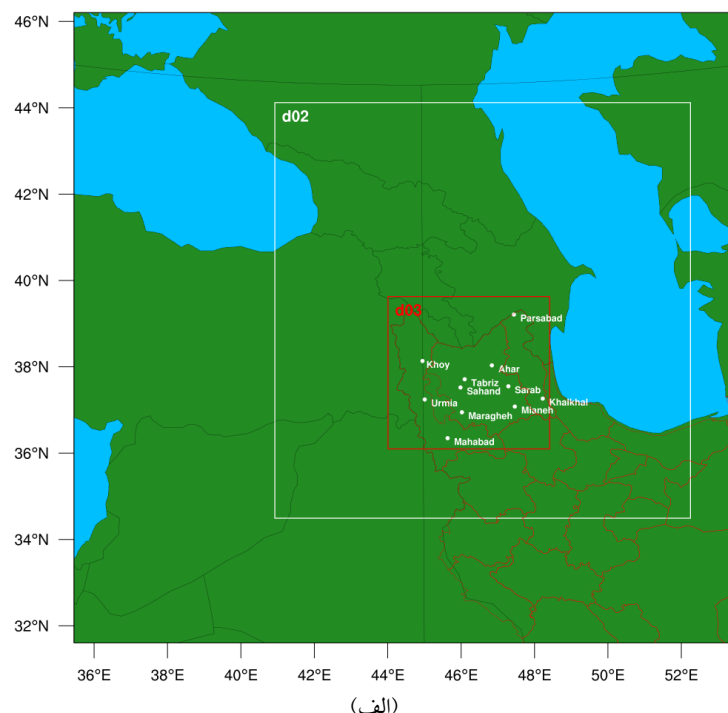
مرادی و همکاران (۱۳۹۹)، به‌منظور پیدا کردن کم‌خطاترین پیکربندی برای برآورد بارش طبیعی زمستانی در شمال غرب، بین هفت طرح‌واره همرفت، چهار طرح‌واره خردفیزیک، سه طرح‌واره تابش موج کوتاه، سه طرح‌واره تابش موج بلند، چهار طرح‌واره لایه مرزی و دو طرح‌واره لایه سطحی با توجه به حالت‌های مختلف پیکربندی با کنار هم قرار گرفتن طرح‌واره‌های متفاوت، در ۴۷ حالت، مقایسه انجام دادند. آن‌ها با بررسی آماری اجرای مدل با پیکربندی‌های مختلف، در نهایت طرح‌واره‌های، Similarity Eta، MYJ، RRTM و Dudhia را به‌عنوان طرح‌واره‌های بهینه به‌ترتیب در پارامترسازی، لایه سطحی، لایه مرزی، تابش طول موج بلند و کوتاه در شبیه‌سازی بارش زمستانی روی شمال غرب ایران پیشنهاد کردند. در این مطالعه از پیکربندی بهینه پیشنهاد شده در تحقیق مرادی و همکاران (۱۳۹۹) استفاده شده است. سپس اثر بارورسازی شبیه‌سازی شده و به‌گد طرح‌واره موریسون موجود در مدل WRF اضافه شد. این مدل بارورسازی اجرا شد و نتایج بارش آن به‌منظور به‌منظور صحت سنجی با داده‌های مشاهداتی و به‌منظور به‌منظور بررسی اثر بارورسازی با نتایج مدل در حالت طبیعی (کنترلی) مقایسه شد.

می‌شوند، درحالی‌که ابرهای سطح میانی فرازکومه‌ای (Altostratus) و فرازپوشنی (Altostratus) گزارش شده‌اند.

تحت این شرایط ۴۴ عدد پروپاترون ۴٪ (محتوی ۴٪ یدید نقره) توسط هواپیمای مخصوص بارورسازی در محدوده هدف شلیک شده است. ذرات یدید نقره با اندازه‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر، هسته‌های انجماد بسیار مؤثری هستند. منطقه محاسباتی در این مطالعه شامل سه محدوده است که محدوده سوم (داخلی‌ترین محدوده) در بردارنده شمال غرب ایران شامل قسمت‌هایی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل با  $79 \times 85$  نقطه شبکه‌ای با فاصله شبکه‌ای ۵ کیلومتر است (شکل ۲). مدل WRF برای این مطالعه ۱۸ ساعت از ساعت ۰۰ روز ۳۰ ام تا ساعت ۱۸ روز ۳۰ ام اجرا شده است. گام زمانی برای این محاسبات ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. برای شرایط مرزی از داده‌های FNL با تفکیک مکانی یک درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی و بازه زمانی ۶ ساعته استفاده شده است. این داده‌ها توسط مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) بر روی ۲۶ تراز از سطح زمین تا بام جو به کمک سامانه داده‌گذاری جهانی (GDAS) تهیه می‌شوند و پارامترهایی نظیر فشار سطح، فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما، دمای سطح دریا، مقادیر داده‌های خاک، پوشش یخ، رطوبت نسبی، مؤلفه‌های افقی میدان



شکل ۱. گمانه‌زنی شبیه‌سازی شده در ایستگاه تبریز از خروجی کنترلی (قبل از بارورسازی) در ساعت ۱۴:۰۰ UTC. منحنی‌های قرمز و آبی به ترتیب دمای هوا و دمای نقطه شبنم بر حسب درجه سلسیوس که توسط رادیوسوند اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند.



شکل ۲. (الف) آشیانه‌های اجرای مدل. نقاط سفیدرنگ، ایستگاه‌های باران‌سنجی را نشان می‌دهند. (ب) منطقه هدف بارورسازی مورد مطالعه در این مطالعه، ستاره‌های قرمز محل توزیع پیروپاترون‌ها در حین حرکت هواپیمای بارورسازی را نشان می‌دهند.

محاسبه می‌کند.

در طرح‌واره موریسون نیز همانند طرح‌واره‌های دیگر مدل، بین متغیرهای پیش‌یابی و متغیرهای پیش‌بینی تفاوت وجود دارد. متغیرهای پیش‌یابی در طول واکنش‌های دینامیکی (فرارفت‌ها و واکنش‌های خردفیزیکی زیرشبکه‌ای) پایسته (ثابت) هستند و در مقابل، متغیرهای پیش‌بینی تغییرات محلی نسبت به زمان و مکان دارند و به‌طور مستقیم از متغیرهای پیش‌یابی به دست می‌آیند. نسبت چگالی عددی ۵ گونه آبی (قطرات ابر، یخ، برف،

سیستم معادلات برای طرح‌واره‌های دو مؤلفه‌ای WRF، شامل معادلات انرژی برای نسبت اختلاط و چگالی عددی برای هر نوع آب‌وهوا است. طرح‌واره موریسون (موریسون و همکاران، ۲۰۰۵) به کار رفته در مدل نیز از طرح‌واره‌های دو مؤلفه‌ای است که نسبت اختلاط، چگالی عددی گونه‌های آبی مختلف را در حالت طبیعی (بدون اعمال بارورسازی) با پارامتره کردن فرایندهای خردفیزیکی، جملات چشمه و چاهه برای  $q$  (نسبت اختلاط جرمی) و  $N$  (چگالی عددی) در معادلات انرژی

ساده‌سازی‌ها، افزایش چگالی عددی یخ ابر ( $N_i$ ) و نسبت اختلاط یخ ابر ( $Q_i$ ) در اثر بارورسازی ابر با عامل بارورسازی یدید نقره بر طبق معادلات زیر به دست می‌آیند و کاهش نسبت اختلاط و چگالی عددی قطرات ابر برابر  $Q_i$  و  $N_i$  خواهد بود:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{dp}{dt} (R_{pv} n_{pv} \alpha_{act} Z) \quad (1)$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{dN_i}{dt} \left( \frac{M}{\rho V} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه  $n_{pv}$ ،  $R_{pv}$  و  $dp/dt$  به ترتیب تعداد پیروپاترون آزاد شده، جرم یدید نقره در هر پیروپاترون و سرعت تزریق پیروپاترون در جو هستند. در این مطالعه، عملیات بارورسازی با یدید نقره با افزایش نسبت اختلاط و چگالی عددی یخ ابر و کاهش نسبت اختلاط و چگالی عددی آب ابر در منطقه هدف به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود و با اجرای مدل در حالت بارورسازی بارش پس از بارورسازی ابر محاسبه خواهد شد.

### ۳. نتایج و بحث

خروجی بارش تجمعی ۶ ساعته اجرای مدل در حالت بارورسازی برای ساعت ۱۸ (دو ساعت پس از بارورسازی) به منظور صحت سنجی مدل بارورسازی برای روز ۳۰ آذر ۱۳۹۱ با مقادیر بارش مشاهده شده در ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه هدف مقایسه شد سپس خطای مدل در ایستگاه‌های مختلف محاسبه شد. آماره‌های مربوط به خطای مدل در جدول ۱ ارائه شده است. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانه و میانگین خطای بارش شبیه‌سازی شده نشان دادند که مدل توسعه یافته به خوبی بارش را پس از بارورسازی برآورد کرده است و مقادیر مشاهداتی بارش برای بیشتر ایستگاه‌ها با مقادیر مشاهده شده مطابقت دارد. در ۶۷٪ موارد خطای برآورد بارش مدل توسعه یافته کمتر از ۲ میلی‌متر است و در ۵۰٪ موارد خطا کمتر از ۱/۳ میلی‌متر است.

به منظور مقایسه نتایج خروجی بارش مدل با داده‌های مشاهداتی ماهواره، نقشه بارش تجمعی خروجی مدل در

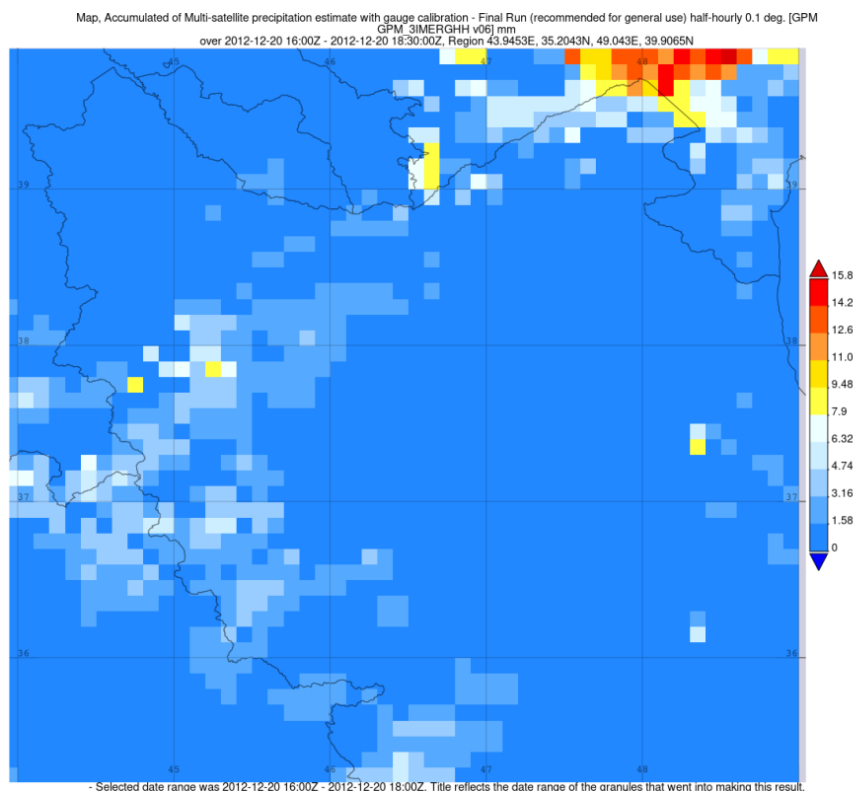
باران و گویچه برف) و نسبت اختلاط جرمی ۴ گونه آبی (یخ، برف، باران و گویچه برف) در طرح‌واره موریسون پیش‌بینی می‌شوند و چگالی جرمی قطرات ابر به عنوان متغیر پیش‌یابی در نظر گرفته می‌شود. فرضیه اساسی بارورسازی ابرها بر این اصل فیزیکی استوار است که در دمای زیر انجماد فشار بخار تعادلی نسبت به یخ کمتر از فشار بخار تعادلی نسبت به آب مایع است؛ بنابراین، در دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد محیط اشباع با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ نسبت به آب ( $RH_w = 100\%$ )، آب اشباع نسبت به یخ خواهد بود (پروپچر و کلت، ۲۰۱۰). در نتیجه، در یک ابر که نسبت به آب مایع اشباع است و از قطرات آب ابرسرد تشکیل شده است، با اعمال بارورسازی ذرات یخ به سرعت رشد می‌کنند تا به اندازه قطرات قابل بارش برسند. در آن محیط قطرات کوچک و ابرسرد ابر نیز یا در حرکات بالاسو رشد می‌کنند و یا برای تأمین بخار برای رشد یخ، تبخیر می‌شوند. از این رو در بارورسازی یک ابر با یدید نقره انتظار می‌رود که ذرات یخ در بخش ابرسرد ابر تولید شوند و رشد کنند و آب مایع ابر با سرعت بیشتری به گونه‌هایی با فاز یخی تبدیل شود. با تزریق پیروپاترون‌های یدید نقره به درون ابر، پیروپاترون می‌سوزد و ذرات یدید نقره آزاد شده در اندازه‌های مختلف در ابر پراکنده می‌شوند. میرز و همکاران (۱۹۹۵) یک تابع توزیع گاما برای تابع توزیع اندازه ذرات یدید نقره تزریق شده در جو پیشنهاد دادند. آن‌ها همچنین ذرات تولید شده به ازای هر گرم یدید نقره ( $Z$ ) را که به وسیله هواپیما آزاد می‌شود را بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی دیموت و همکاران (۱۹۸۳)  $4 \times 10^{15}$  برآورد کردند. در پروژه بارورسازی ابر انجام شده در تاریخ ۳۰ آذر ۱۳۹۱ پیروپاترون ۴٪ با سرعت ۰/۰۳ (n/s) (عدد پیروپاترون بر ثانیه) توسط هواپیما در جو تزریق شد که بنابر یافته‌های مارکولی و همکاران (۲۰۱۶) نسبت فعال‌سازی آن‌ها ( $\alpha_{act}$ ) کمتر از ۵۰٪ است.

با توجه به مطالعات ستو و همکاران (۲۰۱۱)، دیموت و همکاران (۱۹۸۳)، میرز و همکاران (۱۹۹۵) و برخی

حالت بارورسازی (شکل ۴) و نقشه بارش تجمعی توسط داده‌های ماهواره‌ای GPM (۰/۱ درجه) (شکل ۳) برای زمان بین ۱۶ تا ۱۸ در تاریخ مورد نظر رسم شد. همان‌طور که از شکل‌ها مشهود است الگوی بارش در منطقه مورد مطالعه با تقریب خوبی به درستی پیش‌بینی شده است.

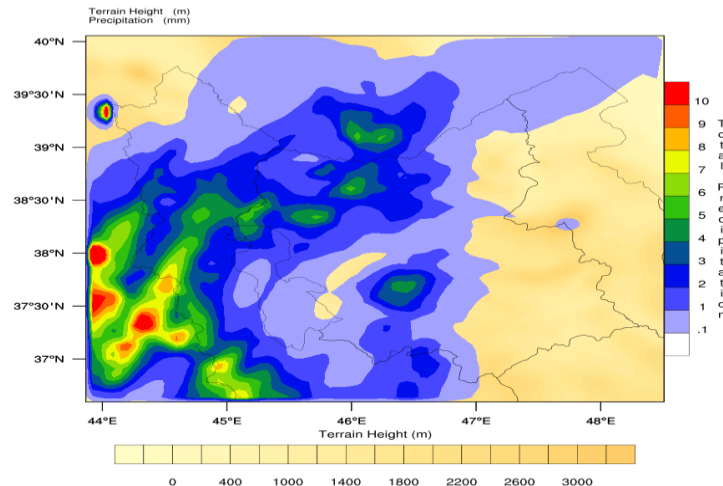
جدول ۱. آمار توصیفی خطای پیش‌بینی بارش (میلی‌متر) مدل بارورسازی که در این مطالعه توسعه یافته است.

| آماره‌های مربوط به خطای مدل  |        |
|------------------------------|--------|
| میانگین                      | -۱/۹۵  |
| بازه اطمینان ۹۵٪ (سطح بالا)  | -۵/۷۳  |
| بازه اطمینان ۹۵٪ (سطح پایین) | ۱/۹۱   |
| میانه                        | -۰/۶۵  |
| واریانس                      | ۳۷     |
| کمینه                        | -۱۶/۸۷ |
| بیشینه                       | ۶/۷۵   |
| جذر میانگین مربعات           | ۶/۱۴   |
| خطا کمتر از ۱/۳ میلی‌متر     | ٪۵۰    |
| خطا کمتر از ۲ میلی‌متر       | ٪۶۷    |



شکل ۳. بارش تجمعی بین زمان ۱۶ الی ۱۸ UTC در تاریخ ۲۰۱۲-۱۲-۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره GPM.

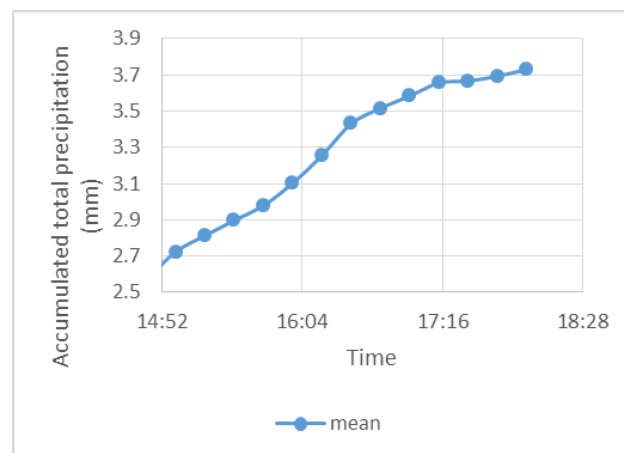




شکل ۴. بارش تجمعی بین زمان ۱۶ الی ۱۸ UTC در تاریخ ۲۰-۱۲-۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های خروجی مدل WRF در حالت بارورسازی.

مشاهده می‌شود که تغییرات حاصل از بارورسازی در عملیات بارورسازی ابر مورد مطالعه، در تمامی ایستگاه‌ها رضایت‌بخش نبوده و در برخی موارد به کاهش بارش ۲ ساعت پس از بارورسازی منجر شده است. این کاهش در برخی ایستگاه‌ها مانند مراغه، سهند، مهاباد، تبریز و خوی از ابتدای بارورسازی آغاز و تا انتها ادامه دارد (شکل ۶)؛ اما در ایستگاهی مانند سراب گرچه بارش در ابتدای بارورسازی کمی کاهش می‌یابد (شکل ۶)، اما با گذشت زمان پس از دو ساعت به ۷٪ افزایش پیدا می‌کند و این در حالی است که بارورسازی در ایستگاه‌های ارومیه، پارس‌آباد و اهر در تمام دوره افزایشی بوده (شکل ۶) و به ترتیب موجب افزایش ۳٪، ۹٪ و ۲۷٪ بارش دو ساعت پس از بارورسازی می‌شود.

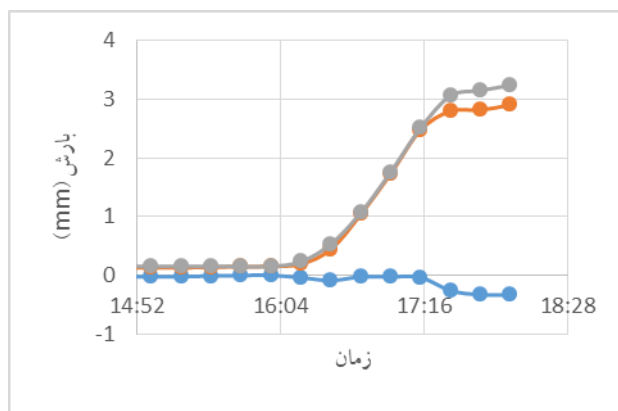
شکل ۵ تغییرات زمانی میانگین بارش رسیده به زمین در کل منطقه هدف در هر ۱۵ دقیقه بعد از بارورسازی تا دو ساعت پس از بارورسازی را نشان می‌دهد. این شکل گویای آن است که بارش بعد از ساعت ۱۵:۴۵ UTC تقریباً با یک شیب ثابت افزایش می‌یابد. بارش مؤثر به صورت نسبت تفاضل بارش در حالت بارورسازی با بارش در حالت کنترلی بر بارش کنترلی برای هر ایستگاه محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است. از آنجا که تأثیر عملیات بارورسازی بسته به دما، نوع و طول عمر ابر، ارتفاع، یخ و آب ابر در هر منطقه متفاوت است (چنگ نون و همکاران، ۱۹۷۸؛ ویو و همکاران، ۲۰۱۸)، بارش مؤثر (افزایش و کاهش بارش) پس از عملیات بارورسازی دارای تغییراتی در مناطق مختلف شمال غرب خواهد بود. از محاسبات بارش مؤثر



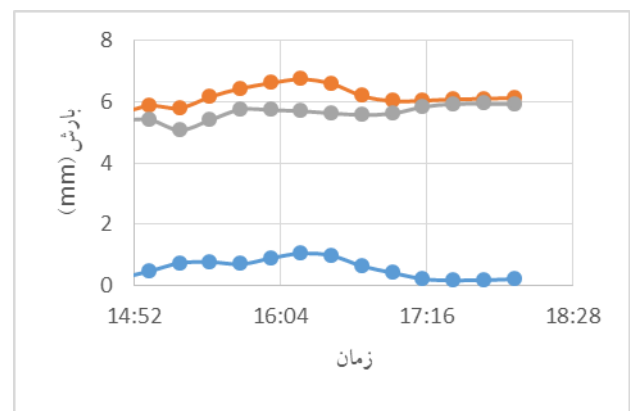
شکل ۵. میانگین بارش در کل منطقه هدف.

جدول ۲. تغییرات بارش بر اثر بارورسازی ابر در ایستگاه‌های مورد مطالعه در منطقه هدف (خروجی بارش مدل در حالت بارورسازی P، خروجی بارش مدل در حالت کنترل Pctrl (بدون بارورسازی))

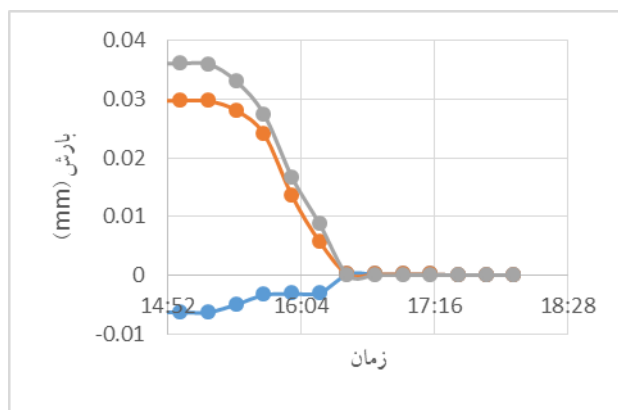
| نام ایستگاه | بارش مشاهده شده (میلی‌متر) | تفاضل بارش خروجی مدل بارورسازی با مدل کنترل (میلی‌متر) (P-Pctrl) | بارش اجرای کنترل Pctrl (میلی‌متر) | بارش مؤثر (نسبت تفاضل بارش بارورسازی با بارش کنترل بر بارش کنترل) (P-Pctrl)/Pctrl | تغییرات بارش (%) |
|-------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| خوی         | ۷                          | -۰/۳۳۴۹۶                                                         | ۳/۲۴۱۶۰۱                          | -۰/۱۰۳۳۳                                                                          | -۱۰              |
| ارومیه      | ۲۳                         | ۰/۲۰۱۰۵                                                          | ۵/۹۳۴۱۵۵                          | ۰/۰۳۳۷۲۱                                                                          | ۳                |
| میانه       | ۰                          | ۰                                                                | ۰                                 | ۰                                                                                 | ۰                |
| مهاباد      | ۸                          | -۰/۲۴                                                            | ۵/۴۸                              | -۰/۰۴۳                                                                            | -۴               |
| سهند        | ۱۰                         | -۰/۳۷۲۵۳                                                         | ۲/۸۷۰۵۸۶                          | -۰/۱۲۹۷۸                                                                          | -۱۲              |
| مراغه       | ۷                          | -۰/۳۴۴۵۱                                                         | ۲/۸۵۷۶۲                           | -۰/۱۱۹۳۸                                                                          | -۱۱              |
| تبریز       | ۱۱                         | -۰/۲۱۳۱۷                                                         | ۱۰/۷۳۰۹۴                          | -۰/۰۱۹۸۶                                                                          | -۱               |
| اهر         | ۱                          | ۰/۰۳۷۰۴                                                          | ۰/۱۳۶۵۲۱                          | ۰/۲۷۱۳۱۴                                                                          | ۲۷               |
| سراب        | ۰/۰۱                       | ۰/۰۰۰۴۹۱                                                         | ۰/۰۰۶۵۳۳                          | ۰/۰۷۵۱۵۷                                                                          | ۷                |
| پارس آباد   | ۲                          | ۰/۰۶۷۹۲۱                                                         | ۰/۷۱۸۷۲۷                          | ۰/۰۹۴۵۰۲                                                                          | ۹                |
| خلخال       | ۰                          | ۰                                                                | ۰                                 | ۰                                                                                 | ۰                |



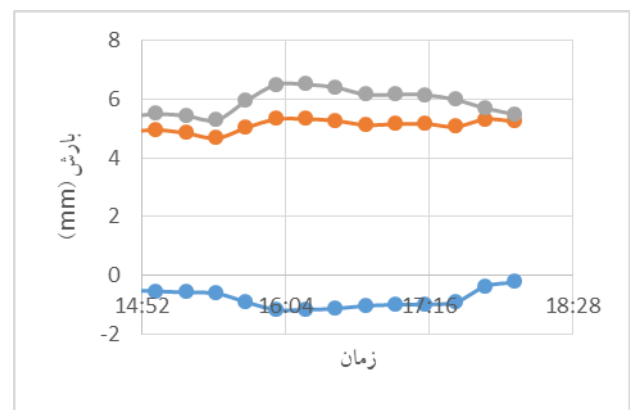
(ب)



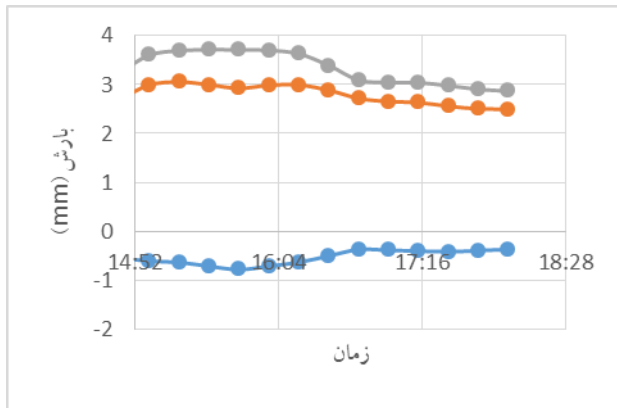
(الف)



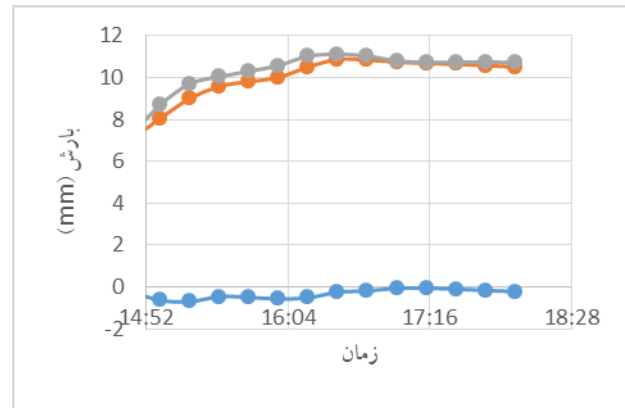
(د)



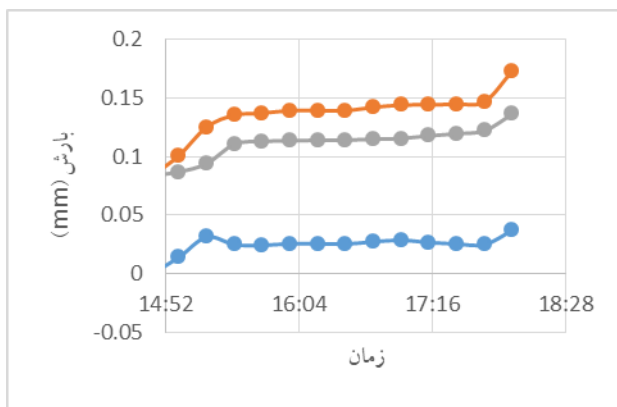
(ج)



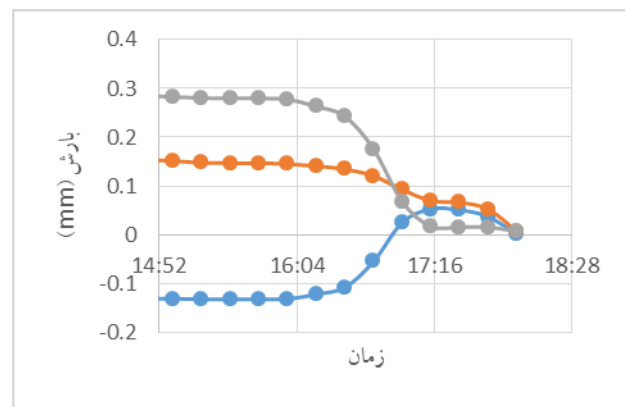
(و)



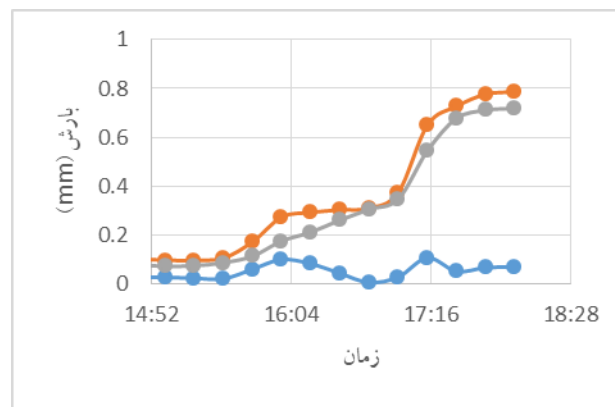
(ه)



(ح)



(ز)



(ط)

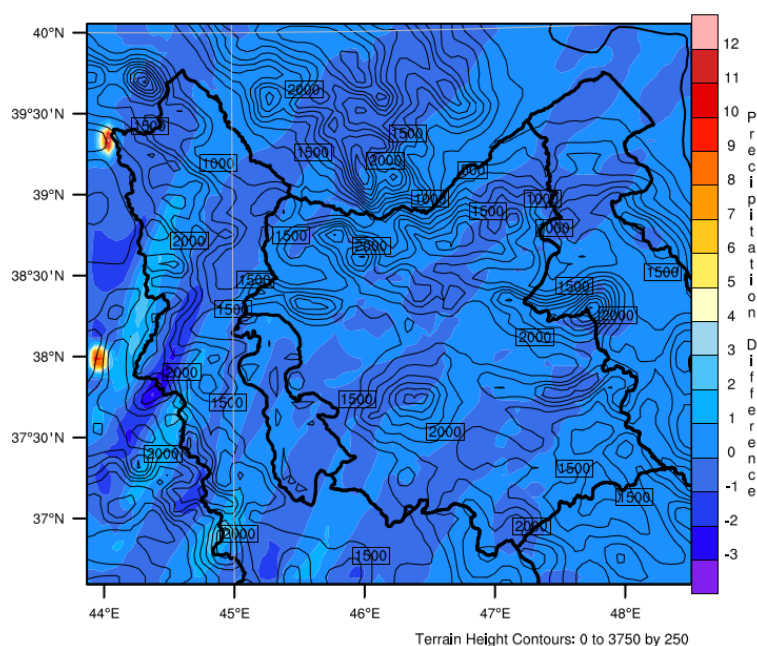
شکل ۶. خروجی بارش مدل عددی در ایستگاه‌های (الف) ارومیه، (ب) خوی، (ج) مهاباد، (د) میانه، (ه) تبریز (و) سهند (ز) سراب (ح) اهر و (ط) پارس‌آباد. در هر زیرشکل، منحنی نارنجی‌رنگ در حالت بارورسازی، منحنی خاکستری‌رنگ در حالت طبیعی و منحنی آبی‌رنگ تغییرات بارش (تفاضل بارش بارورسازی با بارش کنترلی) در اثر بارورسازی است. نمودارها بر حسب زمان برای ایستگاه‌هایی که تغییرات بارش بیشتر از ۰/۰۱ میلی‌متر دارند، ترسیم شده‌اند.

نقاط مختلف تغییر چندانی را پس از بارورسازی نشان نمی‌دهد. تغییرات زمانی و مکانی بارش در یک برش قائم در منطقه هدف در شکل ۹ بررسی شده است (موقعیت قرارگیری برش قائم در شکل ۸ نشان داده شده است). این

شکل ۷ میانگین بارش را در کل منطقه هدف، ۲ ساعت پس از عملیات بارورسازی در حالت بارورسازی نشان می‌دهد. اگرچه شاهد تغییرات بارش در زمان و مکان‌های خاصی در منطقه هدف بوده‌ایم، میانگین زمانی بارش در

گزارش کرده است. این افزایش یخ در ابر به طور میانگین بین ساعت ۱۶ الی ۱۸ نیز این افزایش در یخ در موقعیت برش قائم شمالی-جنوبی نیز دیده می شود (شکل ۱۰ الف) اما در کل منطقه عمومیت نداشته و در موقعیت برش های قائم دیگر با کاهش یخ به طور میانگین نیز مواجه هستیم (شکل ۱۰ ج، ه). این در حالی است که در تمام موقعیت های برش های زده شده جابه جایی مقدار بارش به طور میانگین مشهود است (شکل ۱۰ ب، د، و).

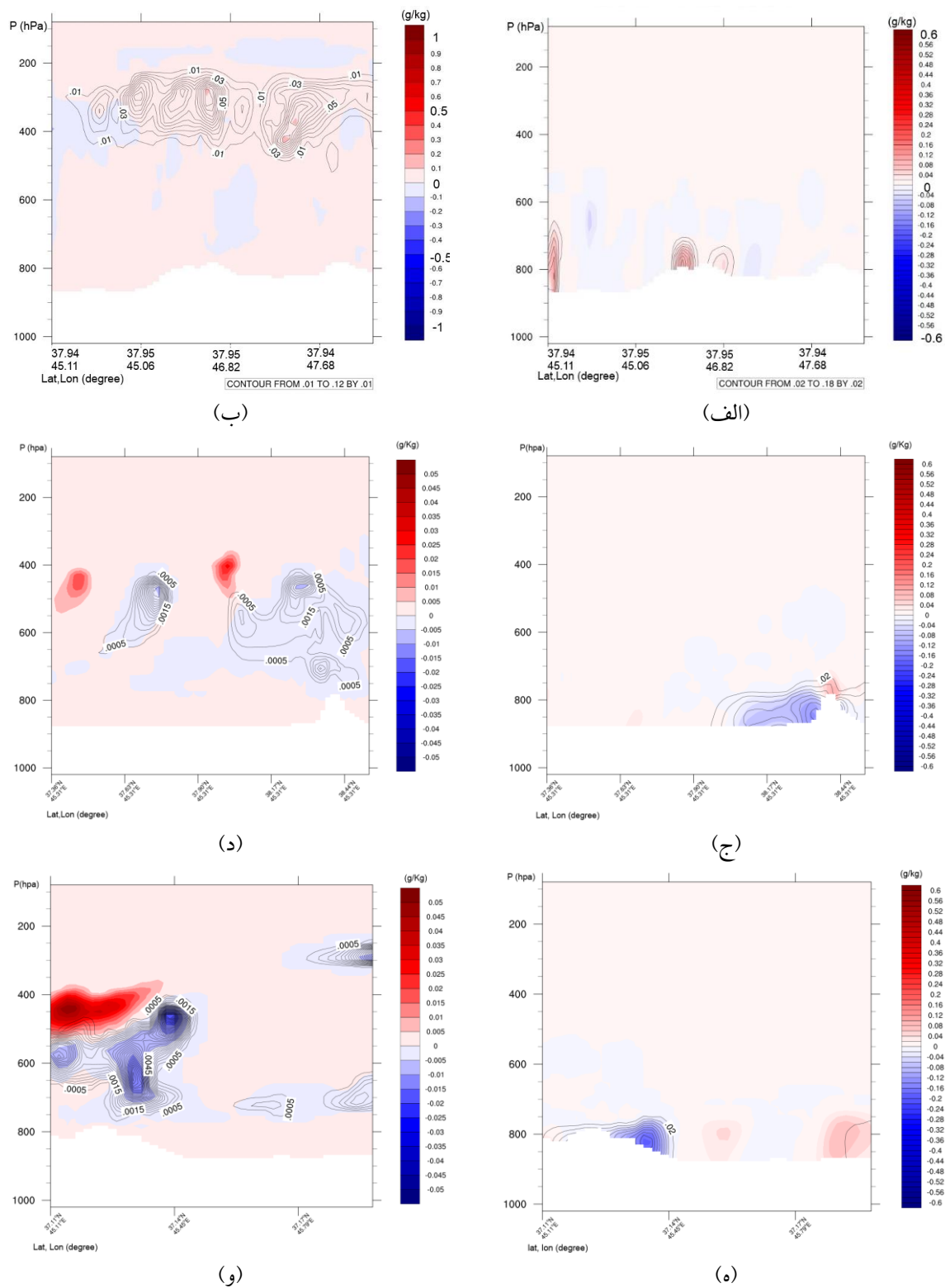
شکل نشان می دهد که با گذشت ۲ ساعت پس از بارورسازی نسبت اختلاط آب باران در مناطقی افزایش و در مناطقی کاهش داشته است (شکل ۹. الف، ج، ه). همچنین ۲ ساعت پس از بارورسازی افزایش یخ ابر را در ارتفاعات نشان می دهد (شکل ۹. ب، د) البته این افزایش در مناطقی همراه با کاهش یخ در ارتفاعات پایین تر نیز بوده است (شکل ۹ و). هابز (۱۹۷۵) نیز در مطالعه موردی در اثر بارورسازی به وسیله هواپیما در ابرهای پوشش کومه ای افزایش غلظت ذرات یخ در ابر را



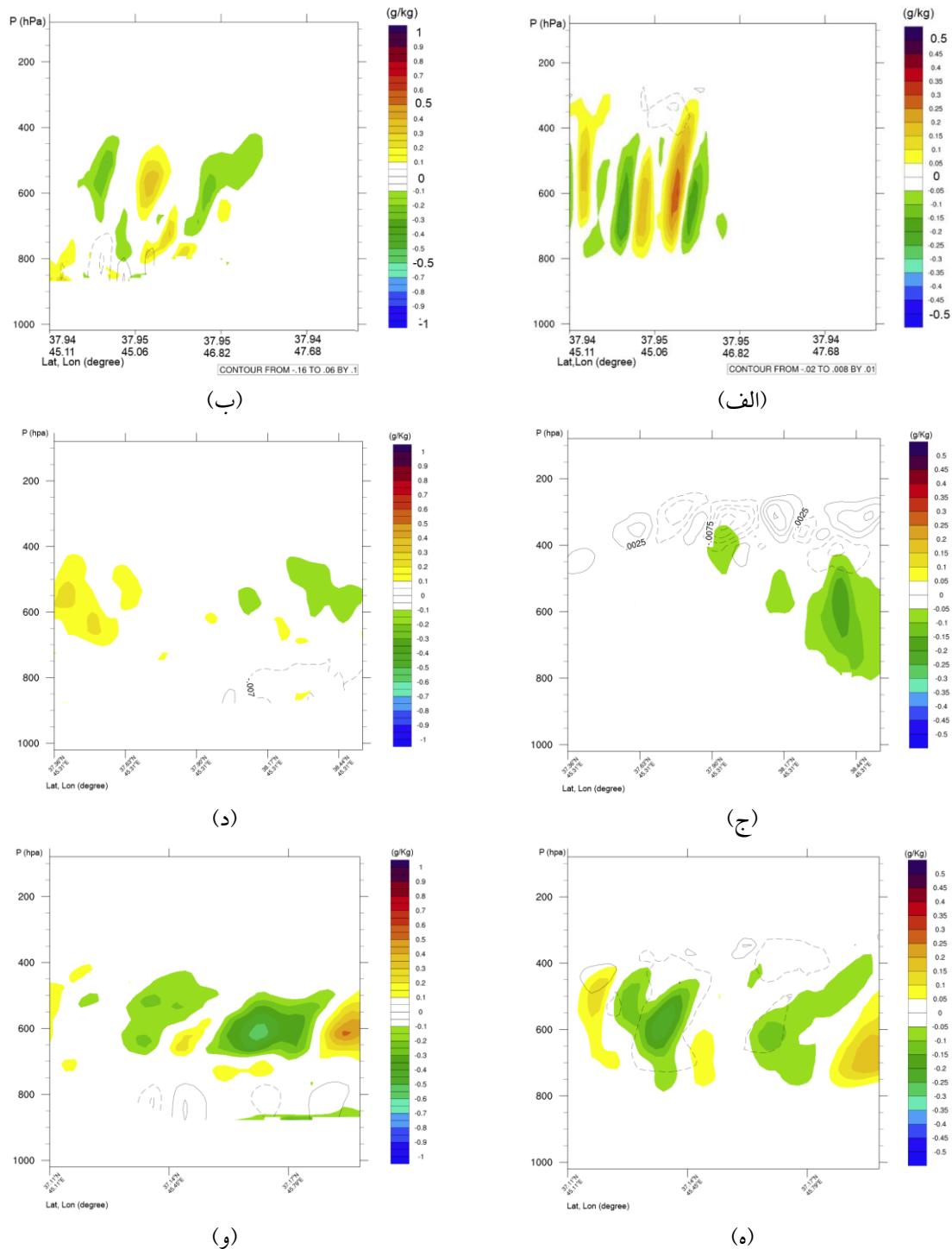
شکل ۷. توزیع فضایی میانگین زمانی بارش در بین ساعت ۱۶۰۰ الی ۱۸۰۰ UTC تفاضل مقدار بارش در اجرای کنترل و اجرای بارورسازی.



شکل ۸. خط سفید رنگ نقطه چین موقعیت برش قائم مورد استفاده در شکل های ۹ و ۱۰ را نشان می دهند.



شکل ۹. برش قائم در ساعت ۱۸ UTC (۲ ساعت پس از بارورسازی) برای (الف) نسبت اختلاط آب باران برش قائم در راستای شرقی، غربی و (ب) نسبت اختلاط یخ ابر در راستای شرقی، غربی، (ج) نسبت اختلاط آب باران برش قائم شمالی و جنوبی، (د) نسبت اختلاط یخ برش قائم در راستای شمالی و جنوبی (ه) نسبت اختلاط آب باران برش قائم در راستای شمال شرق و جنوب غربی (و) نسبت اختلاط یخ ابر در راستای شمال شرق و جنوب غربی. پربندهای رنگی تفاضل خروجی اجرای بارورسازی با اجرای کنترلی هستند و پربندهای مشکی خروجی در حالت کنترلی است.



**شکل ۱۰.** برش قائم میانگین زمانی بین ساعت ۱۶ تا ۱۸ UTC برای تفاضل خروجی اجرای بارورسازی با اجرای کنترلی (الف) نسبت اختلاط برف (پربند رنگی) و نسبت اختلاط یخ (پربند سیاه‌رنگ) در موقعیت برش قائم در راستای شمالی - جنوبی (ب) نسبت اختلاط بخار آب (پربند رنگی) و نسبت اختلاط باران (پربند سیاه‌رنگ) در موقعیت برش قائم در راستای شمالی - جنوبی. (ج) نسبت اختلاط برف (پربند رنگی) و نسبت اختلاط یخ (پربند سیاه‌رنگ) در موقعیت برش قائم در راستای شرقی - غربی (د) نسبت اختلاط بخار آب (پربند رنگی) و نسبت اختلاط باران (پربند سیاه‌رنگ) در موقعیت برش قائم در راستای شرقی - غربی. (ه) نسبت اختلاط برف (پربند رنگی) و نسبت اختلاط یخ (پربند سیاه‌رنگ) در موقعیت برش قائم در راستای شمال شرقی - جنوب غربی (و) نسبت اختلاط بخار آب (پربند رنگی) و نسبت اختلاط باران (پربند سیاه‌رنگ) در موقعیت برش قائم در راستای شمال شرقی - جنوب غربی. (موقعیت برش‌های قائم در راستاهای ذکر شده در شکل ۸ نشان داده شده‌است) پربندهای نقطه چین نمایانگر مقادیر منفی هستند.

## ۴. نتیجه گیری

تا به امروز ارزیابی بارورسازی ابرها در ایران با بهره گیری از روش های آماری و با صرف وقت و هزینه بسیار در حال انجام بوده است. این در حالی است که مدل های عددی با شبیه سازی جو در حالت بارورسازی این امکان را به ما می دهند که با دقت بالاتر و سرعت بیشتر بارورسازی ابرها را ارزیابی کنیم. در این مطالعه، تأثیر بارورسازی اعم از افزایش یا کاهش بارش در روز ۳۰ آذر ۱۳۹۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور تغییراتی در طرح واره خردفیزیک موریسون موجود در مدل WRF برای شبیه سازی جو در حالت بارورسازی اعمال شده است. از این جهت که تکرار آزمایش تحت شرایط هواشناسی مشابه در واقعیت غیرممکن است، مدلی که بتواند اثر بارورسازی ابرها را بر فرایندهای خردفیزیک و بارش شبیه سازی کند می تواند از بسیاری حدس و گمان ها و یا تخمین های نادقیق جلوگیری کند. بررسی رفتار نسبت اختلاط گونه های آبی در طی فرایند بارورسازی و محاسبه آماره های مرتبط به تخمین بارش نشان داد که مدل توسعه یافته می تواند خردفیزیک اثر بارورسازی بر روی توزیع ذرات و بارش را پارامتره و شبیه سازی کند. با شبیه سازی اثر بارورسازی، با تغییر طرح واره خردفیزیک موریسون موجود در مدل WRF، کمیت های هواشناسی از جمله بارش تحت شرایط بارورسازی تخمین زده شد. مدل عددی WRF در حالت کنترلی (بدون اعمال روابط بارورسازی) نیز اجرا شد. با مقایسه بارش برون داد اجرای مدل عددی در حالت بارورسازی با بارش برون داد اجرای مدل عددی در حالت کنترلی، مقدار تأثیر بارورسازی مشخص شد. نتایج این روش شبیه سازی نشان داد که بارش در ایستگاه های ارومیه، پارس آباد، اهر و سراب در اثر بارورسازی ابر افزایش یافته و در ایستگاه های خوی، سهند، مراغه و تبریز کاهش یافته است. تأثیر عملیات بارورسازی بسته به دما، نوع و طول عمر ابر، ارتفاع، یخ و آب ابر در هر منطقه متفاوت است و از آنجا که منطقه

هدف در عملیات بارورسازی وسیع انتخاب شده است و در نقاط مختلف منطقه هدف ابرها در حالات مختلف و با طول عمرهای مختلف و دارای شرایط متفاوت هستند، به بارورسازی پاسخ های متفاوت خواهند داد. برای جلوگیری از این امر اجرای مدل بارورسازی قبل از عملیات بارورسازی پیشنهاد می شود.

همچنین نتایج مطالعه گویای آن است که بارورسازی ابرها می تواند باعث افزایش یا کاهش آب باران و یخ ابر حتی پس از گذشت دو ساعت از بارورسازی در قسمت هایی از منطقه هدف شود و یا می تواند موجب تغییر مکان و شدت بارش در قسمت هایی از منطقه هدف شود. از آنجا که امکان شبیه سازی شرایط جو قبل از اجرای پروژه بارورسازی، توسط مدل عددی وجود دارد، با بررسی دقیق تر و به دنبال آن تعیین شرایط بهینه بارورسازی، می توانیم شاهد افزایش بارش در تمام منطقه هدف باشیم.

## منابع

- برادران، ر.؛ نیکخواه، م. و مریدی، م. (۱۳۹۳). گزارش ارزیابی پروژه های باروری ابرها در سال آبی ۱۳۹۱-۹۲ ایران مرکزی. مطالعات طرح پروژه ارزیابی، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها.
- مرادی، ش.؛ جوانمرد، س.؛ قادر، س.؛ آزادی، م. و قرایلو، م. (۱۳۹۹). مؤثرترین طرح واره در بهبود عملکرد مدل WRF جهت پیش بینی بارش در منطقه شمال غرب ایران - مطالعه موردی. هواشناسی و علوم جو، ۳(۳)، ۱۸۸-۲۰۰.
- مجمومرد م.؛ زارع م. و پورمحمدی س. (۱۳۹۵). ارزیابی نقش بارورسازی ابرها در افزایش استحصال آب در استان فارس با استفاده فنون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، ۷(۲)، ۷۷-۸۵.

- Bluestein, H. B. (1992). Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Oxford University Press, 431 pp.
- Breed, D., Rasmussen, R., Weeks, C., Boe, B., & Deshler, T. (2014). Evaluating winter orographic cloud seeding: Design of the Wyoming weather modification pilot project (WWMPP). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(2), 282–299, doi: 10.1175/JAMC-D-13-0128.1.
- Chen, B., & Xiao, H. (2010). Silver iodide seeding impact on the microphysics and dynamics of convective clouds in the high plains. *Atmos. Res.*, 96, 186–207, doi: 10.1016/j.atmosres.2009.04.001.
- Chu, X., Geerts, B., Xue, L., & Pokharel, B. (2017a). A case study of cloud radar observations and large-eddy simulations of a shallow stratiform orographic cloud, and the impact of glaciogenic seeding. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 56, 1285–1304, doi: 10.1175/JAMC-D-16-0364.1.
- DeMott, P. J., Finnegan, W. G., & Grant, L. O. (1983). An Application of Chemical Kinetic Theory and Methodology to Characterize the Ice Nucleating Properties of Aerosols Used for Weather Modification. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22(7), 1190–1203. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1190:AAOCKT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1190:AAOCKT>2.0.CO;2).
- Deshler, T., & Reynolds, D. W. (1990). The persistence of seeding effects in a winter orographic cloud seeded with silver iodide burned in acetone. *J. Appl. Meteor.*, 29, 477–488. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1990\)029<0477:TPOSEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1990)029<0477:TPOSEI>2.0.CO;2).
- Geresdi, I., Xue, L., & Rasmussen, R. (2017). Evaluation of Orographic Cloud Seeding Using a Bin Microphysics Scheme: Two-Dimensional Approach. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(5), 1443–1462. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/56/5/jamc-d-16-0045.1.xml>.
- Geresdi, I., Xue, L., Sarkadi, N., & Rasmussen, R. (2020). Evaluation of Orographic Cloud Seeding Using a Bin Microphysics Scheme: Three-Dimensional Simulation of Real Cases. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(9), 1537–1555. doi: 10.1175/JAMC-D-19-0278.1.
- Guo, X., Zheng, G., & Jin, D. (2006). A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. *Atmos. Res.*, 79, 183–226.
- Hobbs, P. V. (1975). The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seed- ing. Part III: Case studies of the effects of seeding. *J. Appl. Meteor.*, 14, 819–858, <https://www.jstor.org/stable/26176600>.
- Hobbs, P. V., Lyons, J. H., Locatelli, J. D., Biswas, K. R., Radke, L. F., Weiss Sr, R. R., & Rangno, A. L. (1981). Radar detection of cloud-seeding effects. *Science*, 213, 1250–1252, doi: 10.1126/science.213.4513.1250.
- Javanmard, S., & Pirhayati, M. K. (2012). AgI cloud seeding modeling for hail suppression of cold clouds. *Journal of Geography and Geology*, 4(2), 81. <https://doi.org/10.5539/jgg.v4n2>
- Seto, J., Tomine, K., Wakimizu, K., & Nishiyama, K. (2011). Artificial cloud seeding using liquid carbon dioxide: comparisons of experimental data and numerical analyses. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1417–1431, <https://www.jstor.org/stable/26174102>.
- Changnon Jr, S. A., Farhar, B. C., & Swanson, E. R. (1978). Hail Suppression and Society: Assessment of future hail suppression technology reveals its development should be sizable or ignored. *Science*, 200(4340), 387–394.
- Marcolli, C., Nagare, B., Welti, A., & Lohmann, U. (2016). Ice nucleation efficiency of AgI: review and new insights, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8915–8937, <https://doi.org/10.5194/acp-16-8915-2016>.
- Meyers, M. P., Demott, P. J., & Cotton, W. R. (1995). A comparison of seeded and nonseeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model. *J. Appl. Meteor.*, 34, 834–846. <https://www.jstor.org/stable/26187222>.
- Morrison, H., Curry, J. A., & Khvorostyanov, V. I. (2005). A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(6), 1665–1677, doi: 10.1175/JAS3446.1.
- Pokharel, B., & Geerts, B. (2016). A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part I: Project description. *Atmos. Res.*, 182, 269–281, doi: 10.1016/j.atmosres.2016.08.008.
- Pokharel, B., Geerts, B., & Jing, X. (2018). The impact of ground-based glaciogenic seeding on a shallow stratiform cloud over the Sierra Madre in Wyoming: A multi-sensor study of the 3 March 2012 case. *Atmos. Res.*, 214, 74–90, doi: 10.1016/j.atmosres.2018.07.013.
- Pokharel, B., Geerts, B., Jing, X., Friedrich, K., Ikeda, K., & Rasmussen, R. (2017). A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and



- precipitation over mountains in Wyoming. Part II: Seeding impact analysis. *Atmos. Res.*, 183, 42–57, doi: 10.1016/j.atmosres.2016.08.018.
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (2010). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Springer, 852 pp.
- Rauber, R. M., Geerts, B., Xue, L., French, J., Friedrich, K., Rasmussen, R. M., Tessendorf, S. A., Blestrud, D. R., Kunkel, M. L., & Parkinson, S. (2019). Wintertime Orographic Cloud Seeding—A Review. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(10), 2117–2140. Retrieved Dec 18, 2021, doi: 10.1175/JAMC-D-18-0341.1.
- Wu, X., Yan, N., Yu, H., Niu, S., Meng, F., Liu, W., & Sun, H. (2018). Advances in the evaluation of cloud seeding: Statistical evidence for the enhancement of precipitation. *Earth and Space Science*, 5, 425–439. doi: 10.1029/2018EA000424.
- Xue, L., Teller, A., Rasmussen, R. M., Geresdi, I., & Liu, X. (2012). Effects of aerosol solubility and regeneration on mixed-phase orographic clouds and precipitation. *J. Atmos. Sci.*, 69, 1994–2010. doi:10.1175/JAS-D-11-098.1.
- Xue, L., Tessendorf, S., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., & Blestrud, D. (2013a). Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D real case simulations and sensitivity tests. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 52, 1458–1476. doi:10.1175/JAMC-D-12-0149.1.
- Xue, L., Tessendorf, S., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., & Blestrud, D. (2013b). Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 52, 1433–1457, doi:10.1175/JAMC-D-12-0148.1.
- Xue, L., Tessendorf, S., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., & Blestrud, D. (2013c). AgI cloud seeding effects as seen in WRF simulations. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 52, 1433–1457, doi:10.1175/JAMC-D-12-0148.1.
- Xue, L., Tessendorf, S., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., & Blestrud, D. (2013d). AgI cloud seeding effects as seen in WRF simulations. Part II: 3D real case simulations and sensitivity tests. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 52, 1458–1476, doi: 10.1175/JAMC-D-12-0149.1.
- Xue, L., Tessendorf, S., & Geerts, B., (2016a). A Case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part II: AgI dispersion and seeding signals simulated by WRF. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 55, 445–464, doi: 10.1175/JAMC-D-15-0115.1.
- Xue, L., Chu, X., Rasmussen, R., Breed, D., & Geerts, B. (2016b). A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part II: AgI dispersion and seeding signals simulated by WRF. *J. Appl. Meteor. Climatology*, 55, 445–464, doi:10.1175/JAMC-D-15-0115.1.
- Xue, L., Edwards, R., Huggins, A., Lou, X., Rasmussen, R., Tessendorf, S., Holbrook, P., Blestrud, D., Kunkel, M., Glenn, B., & Parkinson, S. (2017). WRF large-eddy simulations of chemical tracer deposition and seeding effect over complex terrain from ground- and aircraft-based AgI generators. *Atmos. Res.*, 190, 89–103. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.02.013.
- Yin, Y., Levin, Z., Reisin, T. G., & Tzivion, S., (2000). Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics. *J. Appl. Meteor.*, 39, 1460–1472, <https://www.jstor.org/stable/26184345>.