دکتر حسینمراد محمدی
عضو هیات علمی گروه جغرافیای دانشگاه تهران
مهدی آسیایی
کارشناس ارشد پژوهشکده اقلیم‌شناسی
Email: mehdi12asiaee@yahoo.com

مطالعه‌ی امکان‌سنجی تعدیل آب و هوا با هدف بارورسازی ابرها در استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)

چکیده:

تعدیل آب و هوا با استفاده از بارورسازی ابرها جزء علوم جدید هواشناسی است که مرحله‌ی نوین خود را از سال ۱۹۴۶ میلادی آغاز کرده است، مهم‌ترین اهداف تعدیل آب و هوا شامل کنترل محدود و مقطعی زمان و مکان بارش، افزایش بارش، رفع مه و کاهش خسارات تگرگ است. در بارورسازی ابرها ابتدا نوع ابر براساس فرایند بارش و دمای متوسط داخل ابر، مشخص می‌گردد. در مرحله‌ی بعد متناسب با نوع ابر (که ابرهای سرد و گرم است) مواد مناسب بذرپاشی مشخص می‌گردد و در نهایت برای هر ماده با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مربوط و همچنین توپوگرافی منطقه یکی از روش‌های معمول بذرپاشی به کار گرفته می‌شود. در این مقاله پس از مطالعه‌ی شرایط اقلیمی و سینوپتیکی استان خراسان با

پهنه‌بندی ابرناکی و دیگر اطلاعات مورد نیاز محاسبه و استخراج شده است. سپس امکان‌سنجی فاز مکانی بارورسازی ابرها با استفاده از جداول امتیاز دهی، بر اساس معیارهای سازمان هواشناسی جهانی (PEP No.3)، بر روی حوضه‌های آبریز شش گانه استان خراسان مورد مطالعه قرار گرفت و بر اساس آن نقشه پهنه‌بندی امتیاز حوضه‌ها، به منظور بررسی تعیین مناسب‌ترین مکان جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها ترسیم گردیده است.

واژه‌های کلیدی

تعدیل آب و هوا، بارورسازی ابرها، امکان‌سنجی بارورسازی ابرها، ابرهای آبرسرد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱- مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و در نتیجه افزایش نیاز به منابع غذایی و انواع انرژی، آب ارزش خود را به طور چشمگیری به دست آورده است. براساس اهمیت منابع آب در قرن اخیر و پس از توسعه‌ی علم هواشناسی و تسلط بر کسب اطلاعات و پیش‌بینی‌های جوی، فکر دخالت در پدیده‌های جوی از عالم آرزو به قلمرو تحقیق و پژوهش تبدیل گردیده است که به تدریج و با تکامل و توسعه‌ی علوم مختلف، انسان توانسته است این پدیده‌ها را تحت کنترل خود درآورد. به طور کلی تعدیل یا کنترل آب و هوا شامل کلیه عملیات مربوط به افزایش باران، کاهش تگرگ، از بین بردن مه و جلوگیری از یخزدگی و غیره است که بارورسازی ابرها یکی از روش‌های موفق تعدیل آب و هواست. آزمایش‌های متعدد بارورسازی ابر و باران‌های مصنوعی به طور کلی در ۵۰ سال اخیر صورت گرفته است و بعضی از آنها نتایج موفقیت‌آمیزی را در برداشته؛ هرچند که تعدادی از آزمایش‌ها نیز اثر معکوس داشته است که این امر ناشی از عدم تسلط کافی و کامل دانشمندان به علم بارورسازی ابرها بوده است و نیاز به تحقیق بیشتر و رشد علمی در این زمینه دارد. کنترل و افزایش بارش با استفاده بارورسازی ابرها، با در اختیار گرفتن تجربه جدید انسان‌ها برای تولید باران در کشورهای مختلف جهان مورد آزمایش قرار گرفته است. اکثر کشورهای جهان این روش را یکی از راه‌های به دست آوردن آب می‌دانند و به طور کلی هر ساله و در فصول مناسب بر اساس یک برنامه‌ی منظم اقدام به اجرای عملیات بارورسازی ابر می‌کنند. با توجه به طول و عرض جغرافیایی ایران که بر اساس مطالعات اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود، به طوری که میانگین بارندگی سالانه در ایران ۲۴۰ میلی‌متر است، در حالی‌که این میانگین در کل جهان ۸۶۰ میلی‌متر تخمین زده می‌شود و طبق بررسی‌های به عمل آمده، خشکسالی‌های ایران از فراوانی زیاد و از شدت بالایی برخوردار است. (البته ویژگی‌های مذکور در مکان‌ها و مقیاس‌های زمانی مختلف یکسان نیست) که بر این اساس، این‌نوسانات خسارت‌های اقتصادی رابه دنبال خواهد داشت (رضایی/۱۳۷۷/ص۳۵).

استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) با وسعت بسیار بالایی که دارد و با توجه به بحران کمبود آب، کمی بارش و خشکسالی در سال‌های اخیر و عدم استفاده‌ی

صحیح و بدون برنامه از منابع آب‌های سطحی جاری و آب‌های زیرزمینی و عدم فعالیت فرهنگی در نحوه‌ی استفاده از آب با بحران مواجه شده است که این امر به محصولات کشاورزی و نیازهای غذایی سه استان فوق صدمه وارد خواهد کرد. میزان بارش در سه استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) به طور متوسط بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر است که به طور عمده در سه ماه از سال می‌بارد. بر اساس واقعیت‌های فوق‌الذکر فرصتی مناسب ایجاد شده است تا به موضوع امکان‌سنجی بارورسازی ابرها در استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) به طور جدی پرداخته شود و با استفاده از تجربیات موجود جهانی نسبت به غنی کردن دانش فن‌آوری بارورسازی ابرها در سطح استان (شمالی، رضوی و جنوبی) و یا در سطح کشور حرکات مثبتی انجام گیرد (آسیایی ۱۳۸۰/ / ص۴۰). به طور کلی در این تحقیق سعی بر آن شده است تا با استفاده از معیارهای زمان هواشناسی جهانی برای حوضه‌های شش گانه آبریز استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)، نقشه‌ی پهنه‌بندی امتیاز و مناسب‌ترین مکان را برای انجام عملیات بارورسازی انتخاب کنیم. (WMO, PEP No.3, 10-17, 1976)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه‌ی اقلیمی استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)

آب و هوای سه استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) به دلیل وسعت، عوامل طبیعی و عوامل محلی، متغیر و متنوع است. به طور کلی می‌توان آن را جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار آورد. در استان خراسان شمالی زمستان‌ها سرد و طولانی است، ولی تابستان‌ها گرم و معتدل است و در استان خراسان جنوبی در حواشی کویر، آب و هوای خشک و سرد حاکم است و به طوری که نوسان درجه حرارت هوا در این سه استان به حدود ۸۲oC می‌رسد. در عین حال وجود ارتفاعات در نقاط مختلف این سه استان باعث تغییرات موضعی و محلی درجه حرارت هوا نیز می‌شود. ماه‌های تیر و دی به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماههای سال در این سه استان است. میزان نزولات جوی نیز مانند درجه حرارت هوا در نقاط مختلف این سه استان متفاوت است. در شمال و شمال غرب میزان نزولات جوی بیشتر از جنوب است و میزان بارندگی در این منطقه ۳۰۰mm در سال می‌رسد. این در حالی است که در ایستگاه سینوپتیک طبس مقدار

بارش ۸۵mm گزارش می‌شود. به طور کلی میزان بارش در سطح این سه استان به طور متوسط ۱۸۰mm تا ۲۰۰mm است که بیش از ۵۰٪ نزولات درسه ماه اسفند، فروردین، اردیبهشت اتفاق می‌افتد. زمستان‌ها در ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متری این سه استان خصوصاً در استان خراسان شمالی نزولات آسمانی بیشتر بصورت برف است (فرخی،۱۳۷۹ص۳۰). اکنون با توجه به مطالب ذکر شده، به طبقه‌بندی اقلیمی پنج ایستگاه در سه استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) که آمار آنها بالای ۴۰ سال است، پرداخته شده است. این ایستگاه‌ها عبارتند از: بیرجند، تربت‌حیدریه، مشهد، سبزوار، بجنورد. اقلیم غالب مناطق ایستگاههای مورد مطالعه بر اساس جدول(۱) است؛ البته ذکر این نکته مهم است که نوع آب و هوای غالب بر اساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی کوپن، دمارتون، آمبرژه و تورنت‌وایت انجام شده است. (آسایی / ۱۳۸۰ / ص ۳۸)

جدول(۱)ـ نوع اقلیم پنج ایستگاه مورد مطالعه در استان خراسان (شمالی،رضوی‌وجنوبی)

نام شهرستان	نوع تیپ آب و هوا
بیرجند	نیمه خشک و سرد
تربت‌حیدریه	نیمه خشک و سرد
طبس	خشک و گرم
مشهد	نیمه خشک و سرد
سبزوار	خشک و سرد
بجنورد	خشک وسرد

۲-۲- جریان‌های هوای موثر بر استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)

جریان‌های هوایی که استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) را تحت تأثیر قرار می‌دهند، عبارتند از:

- **پرفشار سیبری:** توده هوای قطبی سیبری از اواخر فصل پاییز تا اوایل فصل بهار و از سمت شمال شرقی وارد استان خراسان می‌شود. این توده هوا در اثر برخورد با توده هوای مدیترانه‌ای که ازغرب وارد می‌شود، جبهه گسترده‌ای به وجود می‌آورد که اکثر نزولات سنگین در ارتفاعات کپه‌داغ و هزارمسجد نتیجه‌ی آنهاست. البته میزان بارندگی

به وضعیت قرار گرفتن مراکز فشار، مقدار فشار مرکزی، گرادیان دما و همچنین ناهمواری‌های زمین نیز بستگی دارد(علیجانی / ۱۳۷۴).

- **جریان‌های مدیترانه‌ای:** این توده هوا به دلیل جذب رطوبت از دریای مدیترانه به خصوص در فصل سرد از نظر رطوبت غنی می‌شود و یکی از عوامل اصلی رطوبت در منطقه‌ی خراسان است و در صورت تلفیق با آب و هوایی که از روی دریای خزر می‌گذرد، مقدار بارندگی هم افزایش می‌یابد. دامنه‌ی فعالیت سیکلون‌های مدیترانه‌ای از اواسط پاییز شروع و غالباً تا اواسط بهار به طول می‌انجامد (علیجانی / ۱۳۷۴).

- **جریان‌های شمالی و غربی:** این جریان‌ها در دوره‌های مختلفی از سال، کشور ایران و استان خراسان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و منشأ این جریان در اقیانوس اطلس شمالی است. رسیدن این توده‌ها به منطقه‌ی شمال شرقی ایران همراه با جبهه سیبری است که در فصل بهار و پاییز است و ایجاد رگبار در فصل زمستان و بارش‌های برفی را سبب می‌شود (علیجانی / ۱۳۷۴).

- **جریان‌های موسمی اقیانوس هند:** در فصل تابستان به دلیل وجود مرکز کم‌فشاری که منطقه‌ای از شمال غرب هندوستان تا خلیج‌فارس را در برمی‌گیرد، جریان‌هایی از اقیانوس هند که به نام بادهای موسمی معروف است، نواحی جنوبی و جنوب شرق ایران را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و مناطق جنوبی استان خراسان نیز از این تأثیر بی‌بهره نیستند. ولی این جریان‌ها در بارندگی‌های شمال استان خراسان تأثیر چندانی ندارد (علیجانی / ۱۳۷۴).

- **جریان‌های هوایی صحرایی:** منشأ این جریان‌ها عربستان، کویرها و صحراها است. این توده هوا به طور کلی نواحی جنوب و تا حدی مرکز استان خراسان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و همین امر باعث ایجاد تنوع در آب و هوای استان و تیپ غالب آب و هوا شده است، ولی به دلیل فقر شدید رطوبت هیچ‌گونه بارشی را باعث نمی‌شوند (علیجانی / ۱۳۷۴).

- **جریان‌های شمال شرقی موسوم به آرال:** در فصل تابستان به طور کلی امواج راسبی از شمال اروپا تا شمال روسیه گسترش پیدا کردند، اما در شرایطی به دلیل گسترش پرفشار جنب حاره‌ای که بر روی عربستان به سمت شمال اروپا مستقر است،

در بستر امواج راسبی عبوری از روی منطقه شمال دریای خزر، یک سیستم کم‌ارتفاع بسته‌ای (Cut off low) شکل می‌گیرد. در این هنگام جریانات هوا بر روی دریای خزر حالت شمالی به خود می‌گیرند و به دلیل وجود توپوگرافی منطقه (رشته ارتفاعات البرز شمال استان خراسان) بارندگی‌های به نسبت مناسبی را در این منطقه خواهیم داشت (آسیایی / ۱۳۸۰ / ص ۴۳).

اکنون با توجه به مطالعات اقلیمی و سینوپتیکی استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) اقلیم این سه استان از نوع اقلیم خشک و نیمه خشک است که هر چه از استان خراسان شمالی به طرف استان خراسان جنوبی حرکت می‌کنیم، از میزان رطوبت و بارندگی کاسته می‌شود و بر مقدار درجه حرارت افزوده می‌گردد.

۳- مروری بر بارورسازی ابرها

به طور کلی از هزاران سال پیش بشر سعی کرده است تا آب و هوا را در جهت خواسته‌هایش کنترل کند که در اکثر موارد هدف از آن افزایش باران بوده است. از آن جمله می‌توان به بابلی‌های قدیم که زمین‌های زیرکشت خود را پس از برداشت خرمن آتش می‌زدند تا سطح آن سیاه شود و برای کشت بعدی بارش بیشتری ایجاد کند، نام برد. همچنین «ماونز»[1] در قرن هجدهم در انگلستان به منظور تحریک رطوبت در ابرها، صدای زنگ کلیساها را به صدا درمی‌آورد. در نیمه قرن ۱۸میلادی آزمایش‌های تعدیل آب و هوا و باران مصنوعی در مناطق مختلف دنیا رواج پیدا کرد. بسیاری از سربازان که در جنگ شرکت می‌کردند عقیده داشتند که باران، بعد از انفجارهای سنگین به دلیل گلوله‌باران در آسمان و صدایی که ایجاد می‌کرد، افزایش می‌یابد. (نیکبخت / ۱۳۶۹) .در سال ۱۹۴۶ میلادی علم تعدیل آب و هوا به صورت مدرن ایجاد شد. «وینست شیفر»[2] که در آزمایشگاه ژنرال‌الکتریک در شمال ایالت نیویورک در حال تحقیقاتی در زمینه‌ی بارورسازی ابرها بود، سعی داشت، راهی برای ایجاد ابرهای مصنوعی به منظور تولید بارش در یک اتاقک سرد (فریزر) در آزمایشگاهش بیابد. شیفر نگران بود که شرایط دما بیش از حد گرم گردد؛ بنابراین یک قطعه یخ خشک را به درون اتاقک سرد وارد کرد،

---

[1].Mayans
[2].Vincent, Schafer

در کم‌تر از ۱۰ ثانیه ابر ابرسرد کاملاً به بلورهای یخ تبدیل شد. (شیفر / ۱۹۴۶). نتیجه مطالعات آزمایشگاهی در اتاقک سرد در طول تابستان ۱۹۴۶ میلادی انجام گرفت، اولین آزمایش در جو به وسیله‌ی شیفر در ۱۳ نوامبر ۱۹۴۶ انجام شد که در آن روز یک ابر استراتوس ابرسرد که دارای دمای ۱۸/۵oC- بود و هیچ نشانه‌ای از بلورهای یخ در آن وجود نداشت، به وسیله‌ی رها کردن ۳kg یخ خشک از یک هواپیمای سبک در ارتفاع ۴ کیلومتری بذرپاشی شد. بذرپاشی با این روش به طور موفقیت‌آمیزی ابرهای ابرسرد را به کریستال‌های یخ تبدیل کرد و تحت شرایط مناسبی سبب شد که رطوبت آنها به صورت برف و باران خارج شود. مدتی بعد، همکار شیفر، «برنارد ونگوت»[1] در سال ۱۹۴۷ میلادی تحقیقات زیادی انجام داد تا این‌که یک ماده شیمیایی به نام یدیدنقره یافت که می‌توانست به عنوان یک هسته برای تشکیل بلورهای یخ در ابر ابرسرد و در بخار آب فوق اشباع نسبت به یخ عمل کند. ونگوت متوجه شد که حداکثر درجه حرارت در جایی که ذرات یدیدنقره به صورت هسته عمل می‌کنند، در حدود ۴oC- برای ذراتی به قطر۱μm میکرون، ۸oC- برای ذراتی به قطر ۱۰۰oA است. که یدیدنقره تقریباً در ساختار بلورین آنها مشابه یخ است. (ونگرت / ۱۹۴۷). تریلات و لائوف نیز متوجه شدند که شکل بلوری شش‌گوشه یدیدنقره مشابه یخ است و کاربرد آن در مقایسه با یخ خشک بسیار ساده است. پس این عقیده که بارش می‌تواند به طور مصنوعی افزایش یابد، برای تحقیقات با یدیدنقره که زمینه‌ی جدیدی را در آینده ایجاد می‌کند، امیدوار شدند. در نتیجه‌ی این کار، تحقیقات در مورد تعدیل آب و هوا به منظور افزایش باران یا کاهش تگرگ و رفع مه در بسیاری از مناطق توسعه یافت.(تریلات و لائوف / ۱۹۴۹) از این زمان تحولی عظیم در زمینه‌ی عملیات تعدیل آب و هوا و بارورسازی ابرها در جهان اتفاق افتاد که به پروژه‌های متنوعی در بسیاری از کشورها، از جمله: استرالیا، کانادا، سوریه، سوئیس، ایالات متحده، ژاپن و... می‌توان اشاره کرد. دانش و فن بارورسازی براساس مکانیزم‌های مختلف بارش در انواع ابرها، استوار است. این بدان معنی است که نوع مواد و روش بذرپاشی انتخابی بستگی به نوع ابر دارد. در یک تقسیم‌بندی، ابرها از نظر درجه‌ی حرارت به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: ابرهای گرم، سرد و آبرسرد. معمولاً از آن جایی که فرایند بارش در ابرهای گرم که درجه حرارت قله ابر بالای صفر

[1].Bernard Vonnegut

است، بر اساس برخورد و همامیزی[1] بوده، به همین جهت ماده‌ی مورد استفاده در بارورسازی باید به گونه‌ای باشد که این فرایند را تقویت کند؛ به عبارت دیگر وارد کردن مواد جاذبه‌الرطوبه[2] موجب تولید قطرات باران بزرگ‌تر می‌شود که در فرایند بارش مؤثر است. در ابرهای آبرسرد که دمای پایه ابر زیر صفر است، یکی از مکانیزم‌های بارش بر اساس فرایند برژرون[3] است؛ بدین معنی که به علت اختلاف فشار بخار اشباع روی آب و یخ، قطرات ابر آبرسرد تبخیر شده و بر روی بلورهای یخ نهشت و بلور یخ رشد می‌کند. در این نوع ابرها، استفاده از مواد خنک‌کننده مانند یخ خشک[4] یا دی‌اکسید کربن مایع[5] و یا وارد کردن هسته انجماد مانند یدیدنقره[6] باعث افزایش تعداد بلورهای یخ و بزرگ شدن آن به اندازه کافی شده که در فرایند بارش مؤثر است. در ابرهای سرد که بخشی از ابر در دمای زیر صفر و بخشی دیگر در دمای بالای صفر قرار می‌گیرد، از هر دوروش که دربالا ذکرشد، استفاده‌می‌گردد (فوکرتا/۱۹۶۳/ص ۴۷۵). روش‌های بذرپاشی با توجه به نوع مواد و توپوگرافی و اقلیم منطقه به چند دسته تقسیم می‌شود. می‌توان از آن جمله به ژنراتورهای زمینی، راکت‌های زمین به هوا، پرتابه‌ها از طریق هواپیما در سطح فوقانی ابر و پخش‌کننده‌های مواد در کف ابر اشاره کرد.

۳-۱- بارورسازی ابرهای آبرسرد

چنان‌که گفته شد، ابرهای ابرسرد به ابرهایی گفته می‌شود که دمای پایه‌ی ابر زیر صفر درجه سانتی‌گراد است. به منظور تحریک و یا تقویت بارش از ابرهای ابرسرد که فاقد بارش و یا دارای بارش کافی نیستند، دو راه وجود دارد؛ یکی افزایش هسته‌های انجماد[7]، که با افزایش آنها تعداد بلورهای یخ افزایش یافته و مکانیزم هسته‌سازی یخ از نوع غیرهمگن[8] است؛ به عنوان مثال یدیدنقره و متالاید موادی هستند که هسته‌سازی آنها از نوع غیرهمگن است و دیگری استفاده از مواد خنک‌کننده است که در اثر ایجاد

---

1. Collision - Coalescence
2. Hygroscopic Particles
3. Bergeron Process
4. Solid Co2
5. Liquid Co2 (LC)
6. Silver Iodide (AgI)
7. ICE Nuclei (IN)
8. Heteregeneous

سرمای زیاد، در محدوده‌ای که این مواد پخش می‌شود، بخار آب به بلورهای یخ تبدیل شده سپس این بلورها رشد می‌کنند، به طوری‌که مکانیزم هسته‌سازی یخ از نوع همگن است؛ به عنوان مثال یخ خشک و دی‌اکسید کربن مایع موادی هستند که هسته‌سازی آنها از نوع همگن است. جهت بارورسازی ابرهای ابرسرد از مواد گوناگونی استفاده می‌شودکه‌درذیل‌به بعضی‌ازآنها اشاره شده است (مرکزتحقیقات‌ومطالعات‌بارورسازی‌ابر/۱۳۷۶).

بذرپاشی توسط یخ خشک: این بذرپاشی بعد از موفقیت شیفر در سال ۱۹۴۷ میلادی در زمینه‌ی ایجاد بارش برف از ابرهای ابرسرد، توسط «کراس» و «اسکیورز» در سال ۱۹۴۷ انجام شد که با موفقیت همراه بود. البته دانشمندان دیگری نظیر «برژرون» و «لانگمیر» نیز تحقیقات زیادی را در این زمینه انجام داده‌اند که باعث افزایش بارندگی در منطقه مورد مطالعه خود شده است (شیفر/۱۹۴۷).

بذرپاشی توسط یدیدنقره: تکنیک بارورسازی ابرها با ذرات یدیدنقره مانند روش بارورسازی با یخ خشک در آزمایشگاه تحقیقاتی جنرال الکتریک انجام گرفت و دانشمندانی از قبیل شیفر، ونگوت و «براهام» و غیره آزمایش‌هایی را در این خصوص انجام داده‌اند. به عنوان مثال براهام در سال ۱۹۶۰ با استفاده از رادار در آریزونا مطالعات زیادی کرد و این موضوع را مورد بررسی قرار داد و مشاهده کرد که در نواحی مورد مطالعه تنها در حدود ۳۰ درصد ابرها برای بارورسازی مناسب بوده است. این ابرها به مدت ۳۰ دقیقه دوام یافته و عملیات بارورسازی توسط یدیدنقره انجام گرفت که نتایج مطلوبی را به همراه داشته است (آسیایی / ۱۳۸۰ / ص ۷۰).

بذرپاشی توسط متالاید: این نوع بذرپاشی توسط «فوکوتا»[1] در سال ۱۹۶۳ میلادی انجام شد. وی در سال ۱۹۷۱ میلادی تکنولوژی ژنراتور هسته یخ مواد عالی را توسعه داد. همچنین او بذرپاشی با متالاید را بر روی ابرهای کومولوس تابستانی برای چهار روز به وسیله این ژنراتورها انجام داد که این امر نتایج بسیار مثبتی را به دنبال داشت (فوکوتا / ۱۹۶۳ / ص ۴۷۵).

بذرپاشی توسط دی‌اکسیدکربن مایع: به طور کلی دی‌اکسیدکربن مایع LC دارای یک مجموعه ویژگی‌ها و خصوصیت‌هایی است که به شرح زیر است:

---

[1].Fukuta

۱- هزینه پایین (حدود نصف هزینه یخ خشک)، ۲- اثر تخریبی پایین بر روی محیط زیست، ۳- غیرآتش‌زا بودن، ۴- امکان ذخیره‌سازی و نگهداری آن برای دوره زمانی بلندمدت، ۵- به علت ایجاد ناگهانی سرمای زیاد، LC توان هسته‌سازی بسیار بالایی رادارد و برای‌بذرپاشی سطح‌پایین ابربه‌کاربرده‌شده‌است (فوکوتا / ۱۹۹۶ / ص ۱۶۴).

در تحقیقاتی که فوکوتا در دهه ۱۹۹۰ انجام داد، این بذرپاشی را در منطقه سالت لیک‌سیتی[1] ایالت یوتا در آمریکا به کار برد، که برای اولین بار معرفی این روش در دنیا انجام می‌گرفت و نتایج خوبی را هم به دنبال داشت.

۴- انتخاب مکان مناسب جهت بارورسازی ابر

براساس گزارش PEP No.3 سازمان جهانی هواشناسی در سال ۱۹۷۶میلادی، پرسشنامه‌ای جهت ارزیابی و طبقه‌بندی مناطق مختلف پیشنهاد شد که طی آن مراحل انتخاب سایت را در سه مرحله معرفی کرد.

۱- پرسشنامه و انتخاب اولیه (مرحله اول)،

۲- بازدید از سایت‌ها، مطالعات اقلیمی و غیره (مرحله دوم)،

۳- جزئیات تحقیقات میکروفیزیکی و دیگر مطالعات در این زمینه (مرحله سوم).

اولین مرحله تنظیم جدول امتیاز دهی در محل مورد مطالعه است. جدول شماره (۲) بیان‌کننده‌ی مشخصات مکان بر اساس معیارهای WMO است. مشخصاتی چون‌اندازه سایت، درجه همگنی، مقدار بارش، رژیم بارندگی با تاکید بر فاز یخ، درصد بارندگی مایع، طول فصول بارندگی، تراکم شبکه باران‌سنجی، طول دوره آماری، داده‌های دیگر (رادار، رادیوسوند و...)، هواپیما و ادوات پشتیبانی پرواز، نبود و موانع پرواز، ارتباطات و شرایط کار. با استفاده از مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی، نقشه خطوط هم باران، نقشه پراکنش ایستگاه‌ها، نقشه خطوط هم‌دما، نقشه خطوط هم ضریب برف، نقشه هم ضریب همبستگی و جداول امتیاز دهی، می‌توان امتیاز کل مربوط به هر مکان را به دست آورد. جدول شماره (۲) بیانگر امتیازدهی هر سایت و جدول شماره (۳) امتیاز نهایی سایت را با احتساب وزن ۱و۲و۳ نشان می‌دهد. با توجه به آن‌چه که در بالا

[1].Salt Lake City

ذکر شد، این پژوهش در شرق ایران یعنی استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)، بر روی ۶ حوضه آبریز به عنوان یک تحقیق آزمایشی انجام گرفت.

جدول (۲)- امتیازبندی سایت

معیـــار	۰	۱	۲	۳	٤	٥	امتیاز
۱- اندازه سایت (برحسب هزارکیلومتر مربع)	20>	20-25	25-30	30-40	40-50	50≥	
۲- درجه همگنی:	F+u+h+m	۰m	H+m	.u+h	H	F,u	
f- مسطح u- مسطح با کمی پستی و بلندی h- تپه‌ای m- کوهستانی	F+u+m F +m F+h+m	F+u+h u+m u+h+m	F+h 1m			F+u	
۳- بارندگی سالانه (برحسب میلی‌متر)	25≥ 100≤	25-30 91-99	31-35 86-90	35-40 81-85	41-50 71-80	51-70	
٤- رژیم بارندگی:	a(گرم)	.d	a (سرد)	b (سرد)	c+b+a	.c	
a-کوهساری، b- همرفتی، c- جبهه‌های جنب حاره ای d- سیکلون‌های حاره‌ای، e- مونسونی، f- استوایی	b(گرم)			.a+b .e+f		.c+a	
٥- درصد بارش مایع	60>	60-70	70-80	80-85	85-90	90<	
٦- طول فصل بارش (بر حسب ماه)	8<	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	
۷- تراکم ایستگاه‌های باران‌سنجی(تعداد در هر هزار کیلومتر مربع)	0.1>	0.1-0.5	0.5-2	2-4	4-6	6<	
۸- طول دوره آماری (بر حسب سال)	10>	10-15	15-20	20-30	30-40	40<	

۹- دیگر اطلاعات							
a- داده‌های رادیوسوند b- داده‌های هواپیما c- داده‌های راداری		.b,c	A<5	5<a<10 (a<5)+b (a<5)+c	a>10 (5<a<10)+b (5<a<10)+c	(a>10)+b (a>10)+c	
۱۰- محدودیت‌های پروازی	D,	.b+x,	b+y,	a+x,			
a- بدون محدودیت b- محدودیت کم، c- محدودیت زیاد، d- ممنوع، امکانات، x- ضعیف، y- متوسط، z- عالی	.c+x	.c+y	C+z	b+z	a+y	A+z	
۱۱- ارتباطات		.c	B,	c+d+e,	a+d,	a+d+e	
a- ارتباطات جاده‌های خوب b- ارتباطات جاده‌های رضایت‌بخش c- ارتباطات جاده‌ای بد،d- دارای امکانات پستی،e- دارای تلفن			c+d, c+e	b+d, b+e,a	a+e, b+d+e		
۱۲- شرایط کار:							
a- پشتیبانی و تدارکات رضایت‌بخش b- پشتیبانی و تدارکات ضعیف c- امکانات بیمارستانی d- امکانات فرهنگی e- برق		.b	b+c, b+c, b+c	a+c, a+d, a+e b+c+d, b+c+e, b+d+e	a+c+d, a+d+e, a+c+e, b+c+d+e	a+c+d+e	

جدول (۳)ـ امتیازات کلی سایت (منبع: WMO, PEP No.3 , 10-17 , 1976)

خصوصیات فیزیکی سایت		
۱-اندازه	۱۰	
۲- درجه همگنی	۵	۱۵
خصوصیات بارندگی		
۳- مقدار بارندگی	۱۰	
٤- رژیم بارندگی با اهمیت دادن به ریزش‌های جامد	۱۵	
۵- بارندگی مایع یا جامد روی زمین	۱۰	
٦- طول فصل بارندگی	۵	٤۰
قابلیت دسترسی به داده‌های هواشناسی		
۷- تراکم شبکه بارانسنجی	۱۰	
۸- طول دوره آماری	۱۰	
۹- داده‌های دیگر (رادار، رادیوسوند، غیره)	۵	۲۵
تسهیلات		
۱۰- هواپیما، ادوات پشتیبانی پرواز، محدودیت‌ها و موانع پرواز	۱۰	
۱۱- ارتباطات	۵	
۱۲- شرایط کار	۵	۲۰
جمع		۱۰۰

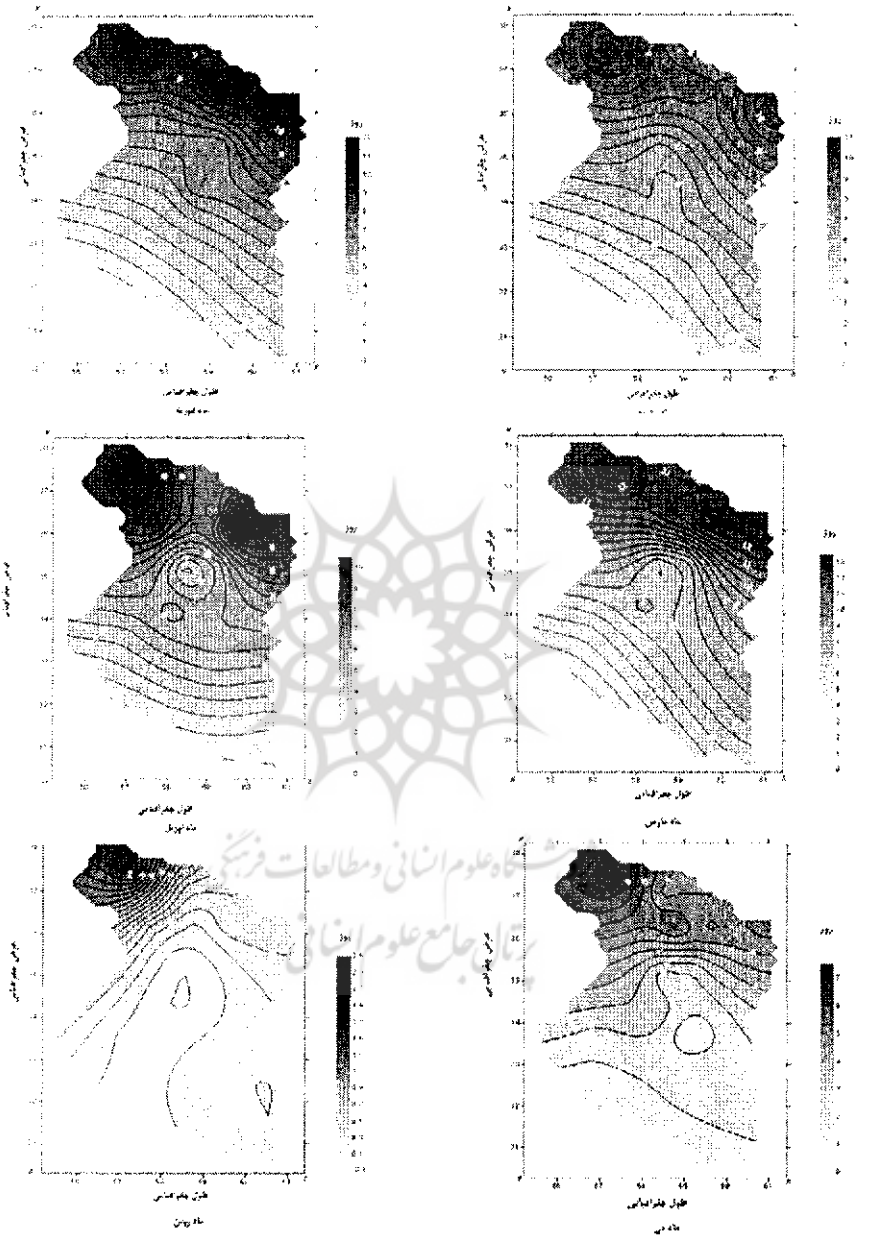
۵ - نتایج

۵-۱- نتایج به دست آمده با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک و جو بالای استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)

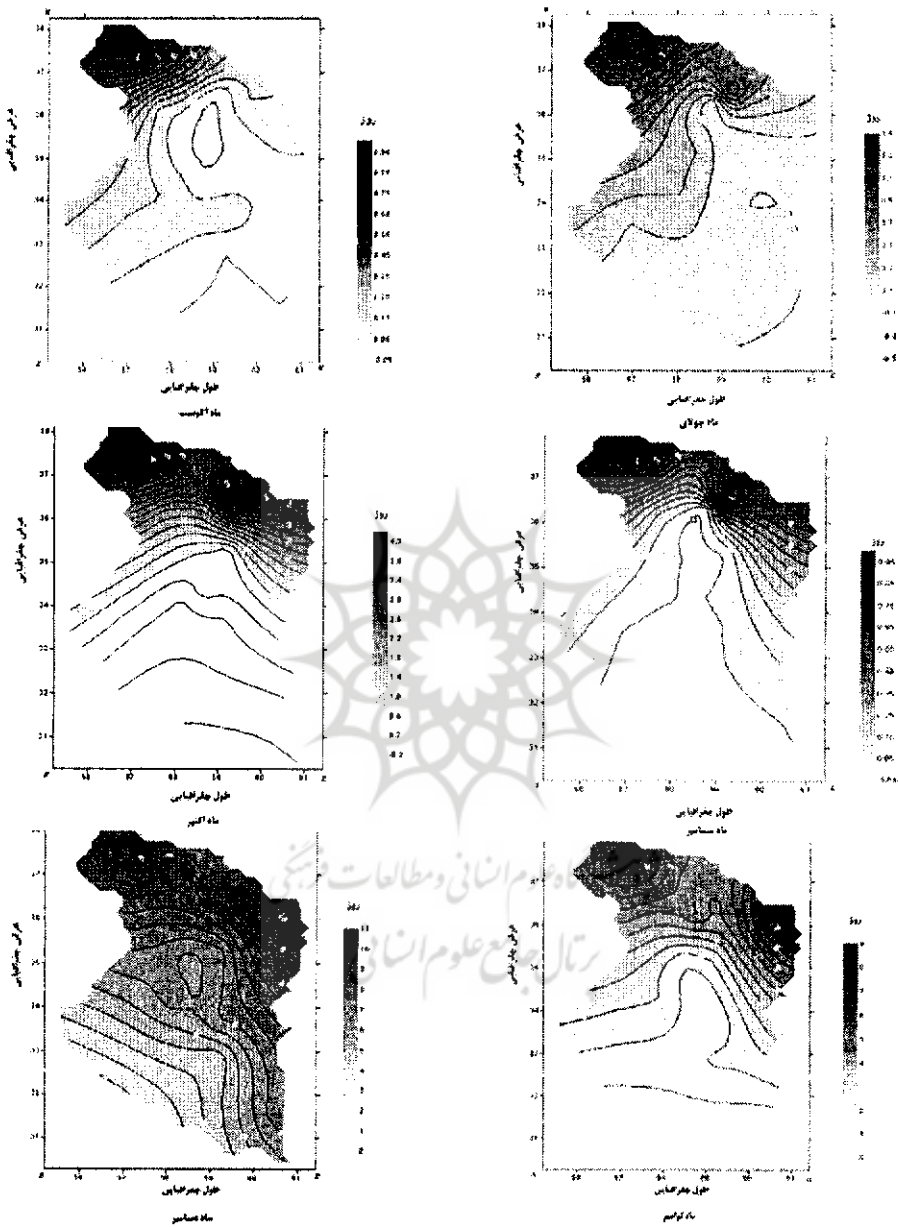
بر اساس اطلاعات جو بالا و ایستگاه‌های سینوپتیکی استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)، پهنه‌بندی ابرناکی برای ۱۷ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان خراسان

(شمالی، رضوی و جنوبی) برای ۱۲ ماه انجام گردیده بر اساس این پهنه‌بندی ۱۷ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) و همچنین اطلاعات جو بالای ایستگاه مشهد می‌توان به نتایج زیر رسید که طبق آن بیشترین تراکم ابرناکی در استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) مربوط به مناطق شمالی و شمال غربی استان است؛ به طوری که این تراکم بیشتر در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، و آوریل دیده می‌شود. همچنین بر اساس منحنی‌های بارندگی نیز بیشترین ریزش باران برای استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) مربوط به ماه‌های فوق است. علاوه بر آن بر اساس نمودارهای مربوط به درجه حرارت پایه ابر در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی نیز، بیشترین تراکم روزهایی که درجه حرارت پایه ابر زیر صفر بوده است و در آن روزها بارندگی نیز داشته‌ایم، به ترتیب مربوط به ماه‌های ژانویه، مارس، فوریه، و آوریل است. حال با توجه به نتایج حاصل از ابرناکی و اطلاعات جو بالا می توان نتیجه گرفت که مناسب ترین زمان برای انجام عملیات بارورسازی ابرها در استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) مربوط به ماه‌های مارس و فوریه است و پیشنهاد می‌گردد که عملیات بارورسازی ابرها در این ماه‌ها انجام پذیرد و ضعیف‌ترین شرایط را ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر داشته است که در این ماه‌ها انجام عملیات بارورسازی ابر توصیه نمی‌شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



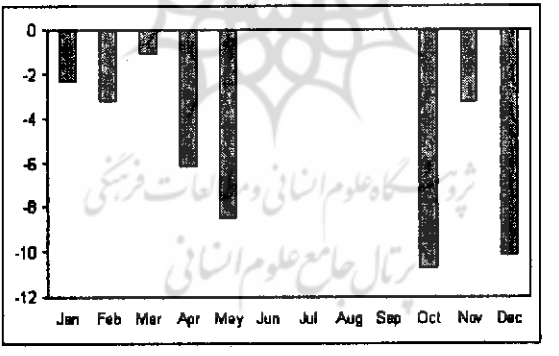
شکل۲ـ پهنه‌بندی روزهای تمام ابری استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) دوره آماری (۱۹۹۵-۱۹۷۵)

بر اساس پهنه‌بندی‌های ابرناکی انجام شده برای ۱۷ ایستگاه سینوپتیک استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) و همچنین اطلاعات جو بالا می‌توان به نتایج زیر رسید:

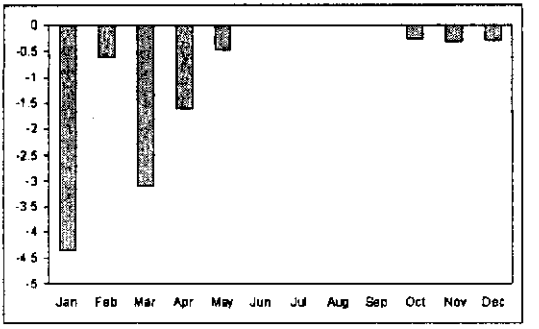
۱- بیشترین تراکم ابرناکی در استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) مربوط به مناطق شمالی و شمال غربی استان است که این تراکم بیشتر در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر است.

۲- براساس منحنی‌های بارندگی نیز بیشترین ریزش باران برای استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) مربوط به ماه‌های بند (۱) است.

بر اساس نمودارهای مربوط به درجه حرارت پایه ابر، در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی نیز بیشترین تراکم روزهایی که درجه حرارت پایه ابر زیر صفر بوده است و در آن روز بارندگی اتفاق افتاده است، به ترتیب مربوط به ماه‌های ژانویه، مارس، فوریه و آوریل بوده است.



شکل ۳- درجه حرارت پایه ابر در ماه‌های بدون بارندگی (۲۰۰۱-۱۹۹۳)



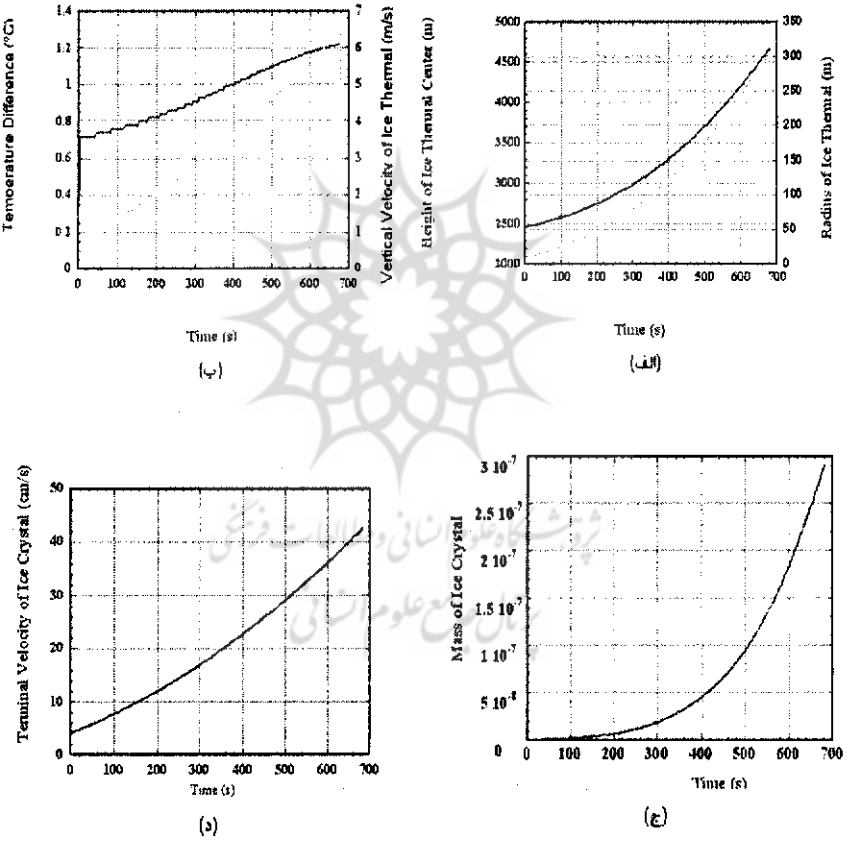
شکل ٤- درجه حرارت پایه ابر در ماه‌های همراه با بارندگی (۲۰۰۱-۱۹۹۳)

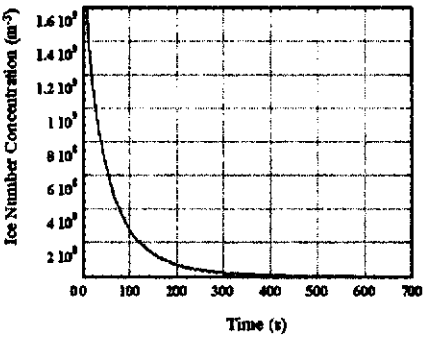
۵-۲- نتایج اجرای مدل عددی بارورسازی ابرها

با استفاده از اطلاعات جو بالای ایستگاه سینوپتیکی مشهد در روز ۲۰۰۰/۱۲/۱۶، مدل عددی بارورسازی ابرها که قبلاً تهیه گردیده بود، اجرا گردید. ضخامت ابر همرفتی حدود ۴۰۸۲m، ارتفاع کف ابر حدود ۱۴۵۷m از سطح دریا و دمای کف در حدود ۴oC و دمای قله ابر ۲۱/۲oC- و همچنین محتوای آب مایع ابر ۰/۵gm-۳ بود که بخشی از این ابر ابرسرد بوده و شرایط خوبی جهت بذرپاشی داشته است. پس از بذرپاشی LC در دمای ۱oC- ابر، حجم ترمال یخ تشکیل شده در ابر ابرسرد افزایش یافته و توسط درون ریزش[1] و مصرف آب ابر ابرسرد، ترمال یخ پس از ۶۸۰s به قله ابر رسید، در این مرحله شعاع ترمال یخ (قطر استوانه) به ۶۲۰m و اختلاف دمای بین ترمال یخ و ابر حدود ۱/۲oC بوده است. در زمانی که نیروی شناوری قوی‌تر می‌شود، سرعت قائم ترمال یخ نسبت به زمان به طور خطی افزایش یافته و در قله ابر به ۶/۵m/s می‌رسد. نزدیک قله ابر، جایی‌که درجه حرارت بین ترمال یخ و ابر ابرسرد به حداکثر مقدار خود و تقریباً ۱/۲oC می‌رسد، سرعت قائم به حداکثر خود تقریباً ۶/۵m/s می‌رسد. با توجه به نمودار (ج) تغییر جرم بلورهای یخ ایجاد شده در اثر بذرپاشی LC در درون ابر ابرسرد برحسب زمان افزایش یافته و در قله‌ی ابر به مقدار ۰/۳μg می‌رسد، سرعت سقوط بلورهای یخ تغییر کرده و به ۴۲cm/s می‌رسد. بنابراین بلورهای یخ ایجاد شده بر اثر بارورسازی LC در چنین ابری منجر به تشکیل بلورهای یخ در قله ابر شده که دارای جرم و سرعت

[1].Entrainment

سقوط نهایی مناسب برای ریزش درون ابر هستند و این امر می‌تواند در فرایند بارندگی مؤثر باشد. پس می‌توان بیان کرد که ترمال بلور یخ ایجاد شده بعد از بارورسازی ابر توسط LC به وسیله هواپیما و در کف ابر در مدت ۶۸۰s به قله ابر می‌رسد و بلورهای یخ به اندازه کافی رشد می‌کند و امکان ریزش‌های جوی و ثبت بارندگی در سطح زمین فراهم می‌شود.





(ج)

نمودار (الف) تغییر ارتفاع‌وشعاع ترمال یخ ایجاد شده پس‌از بذرپاشی LC درون‌ابر برحسب زمان

نمودار (ب) تغییر سرعت قائم ترمال یخ و تغییر اختلاف درجه حرارت بین ترمال یخ و محیط ابر پس از بذرپاشی LC درون ابر بر حسب زمان

نمودار (ج) تغییر جرم بلور یخ پس از بذرپاشی LC درون ابر برحسب زمان

نمودار(د) تغییرسرعت سقوط نهایی بلوریخ‌ایجادشده پس از بذرپاشی LC درون‌ابربرحسب زمان

نمودار(ح) تغییر تعداد بلورهای یخ در واحد حجم ترمال یخ ایجاد شده پس از بذرپاشی LC برحسب زمان

۵-۳- نتایج امکان‌سنجی‌تعدیل آب‌وهوا دراستان‌خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)

استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) با مساحتی حدود ۳۱۳۰۰۰ km2 در ۱۸′ ۵۵° تا ۳۰′ ۶۱° شرقی و از ۱۳′ ۳۰° تا ۱۸′ ۳۸° شمالی کشیده شده است. در این مطالعه از اطلاعات ۱۰۹ ایستگاه طی دوره‌ی آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ میلادی، استفاده شده است. خطوط هم باران، هم ضریب برف و هم دما با استفاده از اطلاعات ۱۹ ایستگاه در دوره آماری ۳۰ ساله استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی)، بیانگر این

است که متوسط بارش سالانه در شمال استان ۳۰۰ میلی‌متر و جنوب آن ۱۸۰ میلی‌متر بوده است که بارش جامد آن ۳۵٪ در شمال و ۵٪ در نواحی جنوب استان است. استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) دارای ۶ حوضه آبریز، کشف رود، شرق ایران، مرکزی، اترک، کویر لوت و کویر نمک می‌باشد، که مشخصات آنها در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (٤) مشخصات حوضه‌های آبریز ٦ گانه استان خراسان

نام حوضه	مساحت حوضه (km2)	محیط حوضه(km)
اترک	۱۸/۰۰۰	۸۰۰
کویر لوت	٤۷/۰۰۰	۱/٤۰۰
کویر مرکزی	۸۰/۰۰۰	۱/۷۰۰
کویر نمک	۳۳/۰۰۰	۱/۰۰۰
شرق ایران	۱۳/۰۰۰	۷۰۰
کشف رود	٤٤/۰۰۰	۱/٤۰۰

در این‌جا به عنوان نمونه امتیازدهی حوضه‌ی کشف رود آورده شده است که جدول شماره (۵) امتیازدهی و جدول شماره (۶) امتیاز کلی این حوضه را مشخص می‌کند. مشابه با این حوضه برای دیگر حوضه‌های شش گانه استان نیز جداول امتیاز محاسبه و تنظیم گردیده است که در جدول شماره (۷) امتیازات کلی آنها آمده است. با توجه به جدول شماره (۶)، حوضه‌ی کشف رود با امتیاز ۵۶ بهترین شرایط و حوضه‌ی شرق ایران با احتساب امتیاز ۲۵ از ۱۰۰، ضعیف‌ترین شرایط را جهت بارورسازی ابر دارد. شکل شماره (۵) بیانگر پهنه‌بندی استان خراسان براساس امتیازدهی پروژه افزایش بارندگی سازمان هواشناسی جهانی است که نقشه‌ی خطوط پهنه‌بندی امتیازهای حوضه‌های شش‌گانه‌ی استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) را نشان می‌دهد.

جدول (۵) امتیازدهی سایت حوضه آبریز کشف رود

معیـــار	۰	۱	۲	۳	٤	٥	امتیاز
۱-اندازه‌سایت (برحسب‌هزار کیلومترمربع)	20>	20-25	25-30	30-40	40-50	50≥	٤
۲- درجه همگنی:	F+u+h+m	M،	H+m	u+h،	H	F،u	۲
f- مسطح u- مسطح با کمی پستی و بلندی h- تپه‌ای m- کوهستانی	F+u+m F +m F+h+m	F+u+h u+m u+h+m	F+h 1m			F+u	
۳- بارندگی سالانه (برحسب میلی متر)	25≥ 100≤	25-30 91-99	31-35 86-90	35-40 81-85	41-50 71-80	51-70	۱
٤- رژیم بارندگی :	a(گرم)	d.	a (سرد)	b (سرد)	c+b+a	c.	٤
a-کوهساری b- همرفتی c- جبهه‌های جنب حاره‌ای d- سیکلون‌های حاره‌ای e- مونسونی f- استوایی	b(گرم)			.a+b .e+f		.c+a	
٥- درصد بارش مایع	60>	60-70	70-80	80-85	85-90	90<	۳
٦- طول فصل بارش (بر حسب ماه)	8<	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	۱
۷- تراکم ایستگاه‌های باران‌سنجی (تعداد در هر هزار کیلومتر مربع)	0.1>	0.1-0.5	0.5-2	2-4	4-6	6<	۲
۸- طول دوره آماری (بر حسب سال)	10>	10-15	15-20	20-30	30-40	40<	۲

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۲							۹- دیگر اطلاعات
	(a>10)+b (a>10)+c	a>10 (5<a<10)+b (5<a<10)+c	5<a<10 (a<5)+b (a<5)+c	A<5	.b,c		a- داده‌های رادیوسوند b- داده‌های هواپیما c- داده‌های راداری
٤			a+x,	b+y,	.b+x,	D,	۱۰- محدودیت‌های پروازی
	A+z	a+y	b+z	C+z	.c+y	.c+x	a- بدون محدودیت b- محدودیت کم c- محدودیت زیاد d- ممنوع امکانات: x- ضعیف y- متوسط z- عالی
٤	a+d+e	a+d,	c+d+e,	B,	.c		۱۱- ارتباطات
		a+e, b+d+e	b+d, b+e,a	c+d, c+e			a- ارتباطات جاده‌های خوب b- ارتباطات جاده‌های رضایت‌بخش c- ارتباطات جاده ای بد d- دارای امکانات پستی e- دارای تلفن
٤							۱۲- شرایط کار:
	a+c+d+e	a+c+d, a+d+e, a+c+e, b+c+d+e	a+c, a+d, a+e b+c+d, b+c+e, b+d+e	b+c, b+c, b+c	.b		a- پشتیبانی و تدارکات رضایت‌بخش b- پشتیبانی و تدارکات ضعیف c- امکانات بیمارستانی d- امکانات فرهنگی e- برق

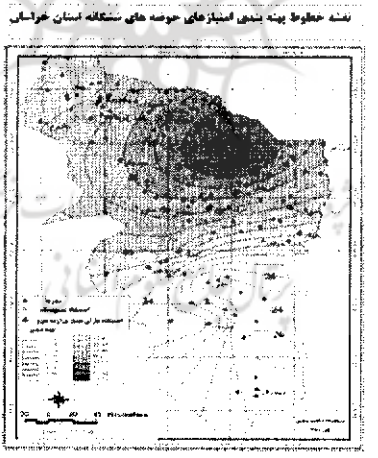
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول (٦) امتیاز کلی سایت حوضه کشف رود

خصوصیات فیزیکی سایت	
۱- اندازه	۸
۲- درجه همگنی	۲
خصوصیات بارندگی	
۳- مقدار بارندگی	۱
٤- رژیم بارندگی با اهمیت دادن به ریزش‌های جامد	۱۲
٥- بارندگی مایع یا جامد روی زمین	٦
٦- طول فصل بارندگی	۱
قابلیت دسترسی به داده‌های هواشناسی	
۷- تراکم شبکه باران‌سنجی	٤
۸- طول دوره آماری	٤
۹- داده‌های دیگر (رادار، رادیوسوند، غیره)	۲
تسهیلات	
۱۰- هواپیما، ادوات پشتیبانی پرواز، محدودیت‌ها و موانع پرواز	۸
۱۱- ارتباطات	٤
۱۲- شرایط کار	٤
جمع	٥٦

جدول (۷) امتیازدهی حوضه‌های آبریز استان خراسان بر اساس معیارهای سازمان هواشناسی جهانی

ردیف	نام حوضه آبریز ٦گانه استان خراسان	امتیاز کلی حوضه‌ها
۱	کشف رود	٥٦
۲	اترک	٤۳
۳	مرکزی	٤۱
٤	کویر لوت	۳٦
٥	کویر نمک	۳۱
٦	شرق ایران	۲٥



شکل ٥ـ نقشه پهنه‌بندی امتیازهای حوضه‌های شش‌گانه‌ی استان خراسان جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها بر اساس معیارهای سازمان هواشناسی جهانی (PEP No.3)

۶- نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج حاصل از این مقاله به این شرح است:

- اقلیم استان خراسان، اقلیم نیمه خشک و خشکی است.

- سیستم‌های جوی که بر روی استان خراسان تأثیر می‌گذارند، مربوط به شش ماهه‌ی دوم سال هستند و بیشترین تأثیر مربوط به سیستم پرفشار سیبری است که باعث بارش زیادی بر روی مناطق شمالی و مرکزی استان می‌شود.

- همچنین بر اساس مطالعه‌ی پهنه‌بندی ابرناکی استان خراسان به این نتیجه رسیدیم که بیشترین تراکم روزهای ابرناکی بالای ۷/۸ در مناطق شمالی و شمال غربی استان است که در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و دسامبر است.

- بر اساس مطالعه‌ی اطلاعات جو بالای ایستگاه مشهد این نتیجه به دست آمده است که بیشترین روزهایی که دمای پایه‌ی ابر زیر صفر است و ابر ابرسرد همراه با بارندگی است، در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و فوریه و دسامبر است که این موضوع برای روزهای بدون بارندگی نیز انجام شده است که در آن بیشترین تراکم مربوط به ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر است.

- بر اساس مدل عددی نیز این نتیجه حاصل شد که پس از ۶۸۰s ترمال یخ به قله ابر می‌رسد و امکان ریزش باران در سطح زمین به وسیله‌ی بارورسازی ابر توسط دی‌اکسید کربن مایع فراهم می‌شود.

- بر اساس جداول امتیازدهی کل، می‌توان گفت حوضه‌ی آبریز کشف‌رود با احتساب امتیاز ۵۶ دارای بهترین شرایط بارورسازی ابر و حوضه‌ی آبریز شرق ایران با امتیاز ۲۵ از ۱۰۰، ضعیف‌ترین شرایط را برای بارورسازی ابر دارد.

در پایان لازم به ذکر است که این مقاله حاصل نتایج به دست آمده از پایان نامه این‌جانب، تحت عنوان «امکان‌سنجی تعدیل آب و هوا با هدف بارورسازی ابرها در استان خراسان» است که در سال ۱۳۸۰ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر ری دفاع گردیده است.

منابع و ماخذ

۱. آسیایی فریمانی، مهدی، «امکان‌سنجی بارورسازی ابرهای ابر سرد در استان خراسان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر ری ۱۳۸۰.

۲. جوانمرد، سهیلا، و همکاران، «گزارش نهایی طرح مطالعات مرتبط با تعدیل مصنوعی آب و هوا»، سازمان هواشناسی کشور، پاییز ۱۳۸۱.

۳. جوانمرد، سهیلا، و همکاران، «شبیه‌سازی عددی ترمال بلور یخ در بارورسازی ابر همرفتی ابرسرد با استفاده از دی‌اکسیدکربن مایع»، نیوار شماره ۴۳، ۸۲-۷۱، ۱۳۷۹.

٤. رضایی، رویا، «بارورسازی ابرها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات ۱۳۷۷.

۵. فرخی، حسن، «جغرافیای استان خراسان»، انتشارات آموزش و پرورش استان خراسان، ۱۳۷۹.

۶. علیجانی، بهلول، «آب و هوای ایران»، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۷۴.

۷. مرکز تحقیقات و مطالعات بارورسازی ابر، گزارش شماره ۲ «بارورسازی ابر در ایران و جهان»، ۱۳۷۶.

۸. نیکبخت، شراره، آیا باران مصنوعی در کاهش خشکسالی‌ها موثر است؟، نیوار، ۱۳۷۹.

9. Fukuta, N., "Ice Nucleation by Metaldehyde," Nature, 199.pp 475-476, 1963.

10. Fukuta, N., "Low level penetration seeding with homogeneous ice nucleant for optimization of the induced microphysics- dynamic interaction," Proceeding 13th Conf. on Planned and Inadvertent Wea. Mod., Atlanta, pp164-171, 1996.

11. Javanmard, S., "Numerical modeling for low level horizontal penetration seeding supercooled with liquid carbon dioxide," Ph. D. Dissertation, Kyushu University of Japan, 1999.

12. Javanmard, S., BodaghJamali, j., Kamali, GH. A., "Site selection study for cloud seeding in order to precipitation enhancement in I. R. of Iran, 8 th Weather Modification ,pp 67-70 , 2003 Conferene , WMO

13. Javanmard, S., Nishiyama, K., Fukuta, N., Wakimizu, K., Suzuki, Y., "Numerical modeling for roll-up expansion of twin horizontal ice crystal thermals in liquid carbon dioxide seeding," Proc. of 14th Conf. on Plannd and Inadvertent Wea. Mod. Everret, WA, pp622-925, 1998.

14. Schaefer, V. J., "The formation of ice crystals in the laboratory and the atmosphere," Chem. Revs. 44, pp291-320, 1949.

15. Schaefer, V. J., "The production of ice crystal cloud of supercooled water droplets," Nature, 104, No. 2707,p 459, 1946.

16. WMO. Weather Modification Programme, Precipitation enhancement Project, Report No.3. Geneva, pp10-71, 1976.