

بررسی شرایط ابرناکی و برخی شاخص‌های ناپایداری جهت تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها در مشهد

محسن رحمدل

دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، مشهد، ایران

(دریافت: ۹۴/۱۲/۱۵، پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۸)

چکیده

ابتدا از اطلاعات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و جو بالای مشهد به مطالعه ابرناکی منطقه بر اساس آمار سالنامه‌های هواشناسی (۲۰۰۸-۱۹۸۶) پرداخته شده و بیشترین فراوانی رخداد ۷ تا ۸ هشتم ابری مشخص گردیده است. سپس با توجه به اهمیت ابرهای متوسط و پایین در فرایند بارورسازی، با استفاده از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک مشهد (۲۰۱۰-۲۰۰۱)، به بررسی فراوانی تشکیل ابرهای پایین و متوسط و همچنین شرایط ابرناکی ابرهای پایین پرداخته شده و با عنایت به اهمیت ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم (شامل ابرهای کومولوس نوع ۲، کومولونیمبوس)، در فرآیند بارورسازی ابر^۱، تشکیل این ابرها در منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تشکیل این ابرها نشان داد که بیشترین ابرناکی در فصول سرد و بارانی زمستان و اوایل بهار تشکیل شده است. سپس با استفاده از نمودارهای جو بالای^۲ موجود دمای پایه ابر، در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی در بازه زمانی (۱۹۹۲-۲۰۱۱) تعیین شده است. مبنای استخراج اطلاعات شرایط تمام ابری در نظر گرفته شده و میانگین دمای پایه ابر در هر یک از حالات محاسبه شده است. با استفاده از داده‌های سایت دانشگاه وایومینگ برخی شاخص‌های ناپایداری، شامل شاخص^۳ K، شولتر^۴، آب قابل بارش^۵ و شاخص^۶ CAPE محاسبه شده و میزان هر کدام از آن‌ها در ساعت ۰۰Z در روزهایی که بارندگی رخ داده، در طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۱ استخراج گردیده است. جهت تعیین مقدار آستانه برای شاخص‌ها، پس از بررسی همبستگی بین بارش ۶ ساعته با هر کدام از شاخص‌ها بهترین نمودار خطی توسط نرم‌افزار SPSS به این داده‌ها برازش داده شده است. از خروجی‌ها مشاهده شد، ضریب همبستگی پیرسون بین این شاخص‌ها و میزان بارش ارتباط مستقیم بسیار ضعیفی را در سطح معنی‌دار ۰.۱٪ و داده‌ها پراکندگی بسیار بالایی را نشان داده‌اند.

کلمات کلیدی: تعدیل آب و هوا، بارورسازی ابرها، شاخص‌های ناپایداری.

مقدمه

کردند (جوانمرد ۱۹۹۹). مسئله کم آبی و رشد فزاینده مصرف و لزوم یافتن راه‌های جدید استحصال آب به منظور رفع کمبودها، تأکید بر استفاده از تکنولوژی باران مصنوعی است (فلاح، ۱۳۸۵). در ایران در بررسی شاخص‌های ناپایداری تحقیقاتی صورت گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به رابطه آب محتوای ابر و سرعت بالارو در تولید خرده یخ توسط ساندرز و صادقی حسینی (۲۰۰۱) برای معرفی آستانه‌های دیگری برای بارورسازی ابرها اشاره کرد. همچنین می‌توان به تحقیقی که توسط خانم مهتاب رضاییان و آقای صادقی حسینی با عنوان بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان اشاره کرد. در کشورهای نظیر فلسطین اشغالی، شوروی، ایتالیا، اسپانیا، فرانسه، هند و پاکستان مطالعات و آزمایش‌های گوناگونی انجام شد، نتایج ارائه شده افزایش بارندگی تا ۲۵ درصد را نشان می‌دهد (ابراهیمی،

بیش از ۲۰ سال از راه‌اندازی مرکز ملی بارورسازی ابرها در ایران می‌گذرد. به طوری که از سوی مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها در سال آبی ۸۵ - ۸۶ در مساحتی حدود یک سوم کشور این فعالیت انجام شد. وزارت نیرو بر اساس ماده ۱۹ قانون ملی شدن آب‌ها و ماده ۲۹ قانون توزیع عادلانه آب وظیفه استحصال آب از طریق باروری ابرها را به عهده دارد. جز این ماده قانونی، صورتجلسه‌ای نیز با سازمان هواشناسی مبادله شده که بر اساس آن وظیفه تحقیقات در خصوص باروری ابرها به عهده سازمان هواشناسی است و وظیفه انجام مطالعات و اجرای طرح‌های باروری ابرها را وزارت نیرو عهده‌دار شده است. به منظور بهینه کردن نتایج بارورسازی ابر، جوانمرد و همکاران در سال ۱۹۹۹ مدل عددی بارورسازی ابر ابرسرد را با استفاده از دی‌اکسیدکربن مایع در تراز پایین ارایه

1- Cloud seeding

2- Skewt Diagram

3- K Index

4- Showalter Index

5- Pricipitable Water Index

6- Convective Available Potential Energy Index

۱۳۷۰). به تدریج نه تنها مراکز علمی و دانشگاهی، بلکه مراکز فناوری و تکنولوژیک نیز فعالیت‌هایی را در این زمینه انجام دادند مانند سازمان بین‌المللی (W.M.O). به عنوان مثال در شمال‌غربی تایلند در حوزه آبریز Bhumibol آزمایشاتی در ماه‌های آوریل، می و ژوئن انجام گرفت (Woodley et al. 2003). طبق گزارشات سازمان جهانی هواشناسی در حال حاضر تنها در آمریکا حداقل ۱۶ پروژه باروری ابرها و در بیش از ۴۰ کشور دیگر به صورت طرح آزمایشی در حال اجراست. در نگزاس آمریکا نیز توسعه و آزمایش یک روش جدید برای ارزیابی برنامه بارورسازی ابرها در حال انجام است. اکثر اقدامات پیشرفته‌ای که در زمینه تعدیل آب و هوا انجام می‌گیرد از طریق بارورسازی ابرها که در واقع کنترل سلول‌های ابر یا سیستم‌های ابر جهت دستیابی به نتیجه مطلوب می‌باشد صورت می‌گیرد (بداق جمالی و جوانمرد، ۱۳۸۲). سیستم‌های بارورسازی ابر شامل افزایش اثرات بالقوه دینامیکی و میکروفیزیکی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه

ایستگاه هواشناسی مشهد در طول جغرافیایی $59^{\circ}38'$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ}16'$ و ارتفاع ۹۹۲ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد.

روش تحقیق

در این پژوهش بیشتر بر اساس داده‌های موجود و با استناد به آمار موجود در بانک اطلاعاتی سازمان هواشناسی کشور و اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی استفاده شده است. روش کار در این پژوهش اسنادی، آماری، فیزیکی، تحلیلی، سینوپتیکی است. در ابتدا به بررسی ابرناکی منطقه پرداخته شده و ماه‌هایی که حداکثر ابرناکی در آن رخ داده مشخص شده است، آنگاه باتوجه به اهمیت نقش ابرهای پایین و متوسط در فرایند بارورسازی، در هر ماه فراوانی روزهایی که در آن

ابرهای پایین و متوسط تشکیل شده است از اطلاعات ایستگاه مشهد استخراج گردیده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سپس به بررسی میزان ابرناکی ابرهای پایین در شرایط نیمه ابری (۳ تا ۶ هشتم ابری) و شرایط تمام ابری (۷ تا ۸ هشتم ابری) پرداخته شده و بعد از آن تشکیل ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم شامل کومولوس ۲ و کومولونیمبوس مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از نمودارها و داده‌های جو بالای ایستگاه مشهد و با استفاده از نرم‌افزارهای اسکيوتی به بررسی دمای پایه ابر و تراز یخبندان ابرهای منطقه در دو حالت بارندگی و بدون بارندگی پرداخته شده و میانگین دمای پایه ابر در هر یک از حالات مشخص گردیده است. برای تعیین پایه ابر بوسیله ساندینگ، از بخار آب موجود در لایه‌های جو استفاده شده است، سطحی که از بخار آب اشباع است یعنی دمای محیط و دمای نقطه شبنم برابر است، پایه ابر در آن سطح در نظر گرفته شده است. در گزارش‌هایی که غالبیت ابرهای تشکیل شده ابرهای سیستمی بوده و بارندگی‌ها به صورت رگباری نباشد پایه ابر در سطح LCL^۱ در نظر گرفته شده و در مواقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومولوس و کومولونیمبوس پایه ابر در سطح CCL^۲ در نظر گرفته شده است. معیار تعیین دمای پایه ابر آسمان تمام ابری (هفت تا هشت هشتم ابری) در نظر گرفته شده است. سپس روزهایی که طی این مدت بارندگی رخ داده استخراج شده و میزان بارندگی به تفکیک ۳ ساعت به ۳ ساعت مشخص گردیده است، سپس با استفاده از داده‌های جو بالای موجود محاسبه شاخص‌های ناپایداری (شاخص K، شولتر، آب قابل بارش، شاخص CAPE) در روزهایی که بارندگی رخ داده بود صورت گرفته، آنگاه با توجه به این که اندازه‌گیری‌های ایستگاه جو بالای مشهد در ساعت Z₀₀ اندازه‌گیری شده بود (البته از اواخر سال ۱۳۸۶ این اندازه‌گیری دوبار در روز انجام شده است) میزان بارندگی شش ساعته از ساعات Z₀₀ تا Z₀₆ استخراج گردیده و همبستگی بین میزان بارندگی و شاخص‌های محاسبه شده بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مطالعه ابرناکی

1- Convective Condensation Level

2- Lifting Condensation Level

ناپایداری، شامل شاخص K ، شولتر، آب قابل بارش و شاخص CAPE در ساعت $0.0Z$ طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ محاسبه و میزان همبستگی هر کدام از آن‌ها با میزان بارندگی ۶ ساعته (از ساعت ۰۰ تا ۰۶ گرینویچ) محاسبه گردیده است.

نتایج و بحث

بررسی بارندگی در ایستگاه مشهد

منطقه بر اساس آمار سالنامه‌های هواشناسی موجود (۱۹۸۶-۲۰۰۸) انجام گرفته و برای بررسی خصوصیات ابرهای پایین و متوسط از داده‌های موجود در بانک اطلاعاتی اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی (۲۰۱۰-۲۰۰۱) استفاده شده است. برای بررسی خصوصیات فیزیکی ابرها و نمودارهای جو بالا و شناسایی ابرهای مستعد جهت بارورسازی از داده‌های سایت دانشگاه وایومینگ استفاده گردیده و برخی شاخص‌های

جدول ۱- میانگین بارندگی و دمایی ایستگاه مشهد

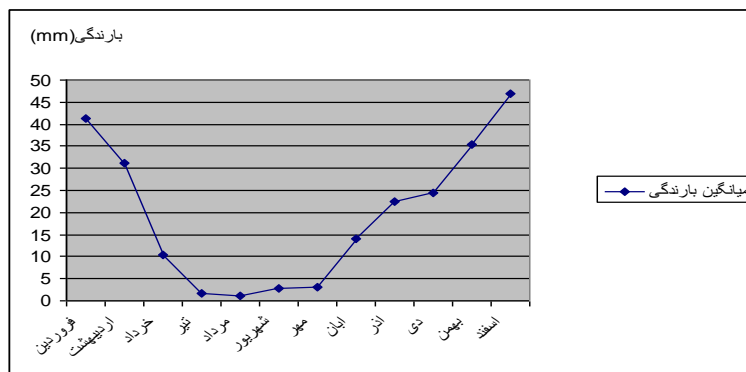
| شهرستان | میانگین بارندگی سالانه | میانگین بارندگی ۶ ماهه دوم سال | درصد بارندگی ۶ ماهه دوم سال | میانگین سالانه دما ($^{\circ}C$) |
|---------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| مشهد | ۲۳۴٫۷ | ۱۴۶٫۲ | ۶۲٪ | ۱۵٫۴ |

در جدول زیر خلاصه آمار بارندگی ایستگاه مشهد در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۸۹ قابل مشاهده است.

جدول ۲- خلاصه آمار بارندگی ایستگاه مشهد در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۸۹

| فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | مهر | ابان | آذر | دی | بهمن | اسفند | میانگین بارندگی (میلیمتر) |
|---------|----------|-------|------|-------|--------|------|------|------|------|------|-------|-----------------------------------|
| ۴٫۴۱ | ۲٫۳۱ | ۳٫۱۰ | ۷٫۱ | ۱٫۱ | ۸٫۲ | ۰٫۳ | ۰٫۱۴ | ۶٫۲۲ | ۳٫۲۴ | ۴٫۳۵ | ۹٫۴۶ | ۴٫۴۱ |
| ۸٫۴۲ | ۶٫۳۱ | ۵٫۲۶ | ۳٫۱۴ | ۲٫۷ | ۷٫۲۰ | ۴٫۱۰ | ۲٫۲۴ | ۵٫۲۳ | ۰٫۱۹ | ۵٫۳۶ | ۴٫۳۳ | حداکثر ۲۴ ساعته بارندگی (میلیمتر) |
| ۳٫۱۰ | ۱٫۹ | ۰٫۴ | ۷٫۰ | ۸٫۰ | ۵٫۰ | ۷٫۱ | ۵٫۴ | ۹٫۶ | ۳٫۷ | ۶٫۹ | ۰٫۱۱ | میانگین تعداد روزهای دارای بارش |

همانگونه که قابل مشاهده است حداکثر بارندگی در اسفند و فروردین و حداقل آن در تیر ماه و مرداد ماه اتفاق افتاده است.



شکل ۱- تغییرات (میانگین) بارندگی ایستگاه مشهد (۱۳۶۸-۱۳۸۹)

تغییرات دمایی ایستگاه مشهد

جدول زیر متغیرهای دمایی ایستگاه مشهد را نشان می‌دهد.

جدول ۳- متغیرهای دمایی ایستگاه مشهد (بر حسب درجه سلسیوس)

| فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند |
|---------|----------|-------|------|-------|--------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| ۴.۷ | ۵.۱۲ | ۰.۱۷ | ۳.۲۰ | ۳.۱۹ | ۳.۱۵ | ۷.۹ | ۳.۵ | ۷.۰ | ۶.۱- | ۴.۱- | ۲.۲ |
| ۶.۱۹ | ۶.۲۵ | ۲.۳۱ | ۶.۳۴ | ۴.۳۴ | ۱.۳۱ | ۰.۲۵ | ۵.۱۸ | ۷.۱۱ | ۳.۸ | ۹.۸ | ۰.۱۳ |
| ۵.۱۳ | ۱.۱۹ | ۱.۲۴ | ۵.۲۷ | ۹.۲۶ | ۲.۲۳ | ۴.۱۷ | ۹.۱۱ | ۲.۶ | ۴.۳ | ۸.۳ | ۶.۷ |
| ۴.۵- | ۰.۱- | ۸.۵ | ۲.۱۲ | ۶.۱۱ | ۶.۳ | ۰.۵- | ۶.۵- | ۲.۱۳- | ۰.۲۱- | ۶.۱۷- | ۰.۱۳- |
| ۴.۳۵ | ۲.۳۹ | ۸.۴۰ | ۸.۴۳ | ۴.۴۲ | ۰.۴۲ | ۰.۳۶ | ۶.۳۱ | ۲.۲۸ | ۴.۲۱ | ۰.۲۶ | ۰.۳۱ |

همانگونه که مشخص است گرمترین ماه‌های سال تیر و مرداد و سردترین ماه سال دی ماه می‌باشد.

مطالعه ابرناکی منطقه

برای ایجاد بارندگی وجود هوای مرطوب و عامل صعود لازم است. با توجه به این که سرزمین وسیع ایران منبع آبی بزرگ و قابل توجهی در داخل ندارد، باید بخار آب مورد نیاز از بیرون وارد شود (علیجانی، ۱۳۸۵). یکی از مناطق مستعد برای بارورسازی، مناطقی است که بطورکلی میزان تراکم ابر بالایی داشته باشد. در این منطقه به دلیل این که اکثریت جریانات و توده‌های هوایی که به استان خراسان وارد می‌شود از این منطقه می‌گذرد، لذا از بارش و تراکم ابر بالایی (نسبت به قسمت‌های جنوبی و مرکزی استان) برخوردار است. یکی از معیارهای مهمی که می‌تواند به عنوان شاخصی برای ابرناکی و پتانسیل باران‌زایی در یک منطقه مورد مطالعه قرار گیرد، میزان ابرناکی و مقادیر ابر در آن ناحیه است که به صورت رخداد آسمان کمی ابری (یک تا دو هشتم)، نیمه ابری (سه تا شش هشتم) و تمام ابری (۸ تا ۷ هشتم) از طرف سازمان هواشناسی جهانی بیان می‌شود. در این رابطه، درصد فراوانی آسمان تمام ابری، از اهمیت بیشتری برخوردار است و یک معیار مطمئن در اجرای موفق عملیات باروری به شمار می‌رود، چون امکان وجود ابرهای مناسب در این شرایط بیشتر است (امیدوار، ۱۳۸۱). از اطلاعات استخراج شده از سالنامه‌های هواشناسی طی دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۰۸ مشخص گردید و در این منطقه، بیشترین

فراوانی رخداد ۷ تا ۸ هشتم ابری به ترتیب در ماه‌های مارس با مجموع ۱۷۴ روز در طی این مدت و میانگین ۷,۶ روز در ماه، فوریه با مجموع ۱۵۰ روز و میانگین ۶,۵ روز در ماه، ژانویه با مجموع ۱۴۷ روز و میانگین ۶,۴ روز در ماه، دسامبر با مجموع ۱۴۰ روز و میانگین ۶,۱ روز در ماه و آوریل با مجموع ۱۰۵ روز و میانگین ۴,۶ روز در ماه می‌باشد و کمترین فراوانی رخداد آن در ماه‌های اگوست با فراوانی و میانگین ۰ می‌باشد.

بررسی فراوانی رخداد ابرهای پایین و متوسط

ابرها را علاوه بر نوع یا دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بر اساس معیار ارتفاع کف یا قله ابر از سطح زمین نیز می‌توان تقسیم‌بندی کرد. در رابطه با طراحی و اجرای طرح‌های باروری و افزایش بارش عمدتاً توجه زیادی به ابرهای پایین و متوسط است (امیدوار، ۱۳۸۱). ارتفاع کف ابرهای پایین در منطقه مشهد بر اساس دیدبانی‌های انجام شده تا ارتفاع ۱۵۰۰ متر و ابرهای متوسط بالاتر از ۱۵۰۰ متر تا ارتفاع ۳۳۰۰ متر می‌باشد. در این بخش تحقیق ابتدا از اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی (۲۰۱۰-۲۰۰۱) گروپ ابر استخراج گردیده و فراوانی تشکیل ابرهای پایین و متوسط مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، یعنی تعداد روزهایی که در هر ماه در آن ابر پایین یا متوسط و یا هر دو تشکیل شده بود مشخص گردیده و مورد تجزیه و تحلیل

بررسی میزان ابرناکی ابرهای پایین

در این قسمت با توجه به اهمیت ابرهای پایین در فرایند بارورسازی، میزان ابرناکی ابرهای پایین بر اساس ۳ تا ۶ هشتم ابری و ۷ تا ۸ هشتم ابری در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

قرار گرفته است. بر این اساس بیشترین فراوانی رخداد ابرهای پایین و متوسط در دشت مشهد در ماه‌های سرد و بارانی (دسامبر با میانگین ۲۶٫۱ روز، ژانویه با میانگین ۲۵٫۲ روز، فوریه با میانگین ۲۵٫۱ روز، مارس با میانگین ۲۸٫۸ روز، آوریل با میانگین ۲۷٫۸ روز و می با میانگین ۲۸٫۵ روز در ماه) رخ می‌دهد و کمترین آن در ماه‌های سپتامبر با میانگین ۱۲٫۸ روز و آگوست با میانگین ۱۳٫۲ روز رخ می‌دهد.

جدول ۴- میانگین تعداد روزهای نیمه ابری (۳-۶ هشتم ابر پایین) و تمام ابری (۷-۸ هشتم ابر پایین)

| ماه | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---------------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| میانگین | ۱۲٫۳ | ۱۲ | ۱۳٫۷ | ۱۴٫۳ | ۱۶٫۶ | ۱۰٫۲ | ۷٫۶ | ۴٫۳ | ۵ | ۹٫۲ | ۹٫۶ | ۱۱٫۹ |
| ابرناکی پایین | ۶٫۵ | ۷٫۵ | ۷٫۳ | ۷٫۵ | ۴٫۳ | ۰٫۸ | ۰٫۶ | ۰٫۱ | ۰٫۷ | ۲ | ۵٫۸ | ۸ |

در مکان‌گزینی و اجرای طرح‌های باروری با فراوانی رخداد، ارتفاع پایه، شرایط تشکیل ابرهای پایین که قابلیت بسط و گسترش قائم را دارند توجه ویژه‌ای شده است. تشکیل این ابرها که در دفترهای سینوپتیک با کدهای ۲، ۳ و ۹ مشخص می‌شوند که خود گویای شرایط ناپایداری و همرفتی در جو می‌باشند (امیدوار ۱۳۸۱).

همانگونه که از اشکال بالا مشخص است بیشترین آسمان نیمه ابری (۳ تا ۶ هشتم ابر پایین) در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می اتفاق افتاده و بیشترین آسمان تمام ابری (۷ تا ۸ هشتم ابر پایین) در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل اتفاق افتاده است.

بررسی ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم

جدول ۵- میانگین روزهای همراه با تشکیل ابرهای کومولوس نوع ۲ و کومولونیمبوس (CB)

در بازه زمانی (۲۰۱۰-۲۰۰۱) در مشهد

| ماه | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---------------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| CU ₂ -CB | ۴٫۹ | ۹٫۳ | ۱۴٫۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۹٫۱ | ۵٫۴ | ۳٫۲ | ۳٫۴ | ۶٫۷ | ۸٫۷ | ۷٫۳ |

موقعیت مکانی استقرار آن در ارتباط با ارتفاع پایه ابرهاست. در اجرای عملیات باروری در کشورهای عرض‌های میانه، توجه زیادی به محدوده فوق سرد ابرها در دامنه دمایی ۱۰- تا ۲۰- درجه سانتی‌گراد می‌شود، چون در این محدوده دمایی، تأثیر هسته‌های یخ‌ساز مصنوعی، بیش از هسته‌های یخ‌ساز طبیعی است و در تأثیرگذاری، در فرآیند تشکیل بارش دارای اهمیت بیشتری هستند. بنابراین ماه‌هایی که در آنها تمام یا قسمتی از ضخامت ابرها در بالای تراز یخبندان قرار می‌گیرند، زمان

همانگونه که از بررسی جداول و اشکال بالا مشاهده می‌شود. بیشترین ابرهای با رشد و توسعه قائم در ماه‌های مارس، آوریل و می تقریباً مصادف با ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت رخ داده است.

بررسی تراز یخبندان و دمای پایه ابر

از پارامترهای دیگری که در تعیین و تشخیص فاصله مکانی و زمانی مناسب یک منطقه برای اجرای طرح‌های افزایش بارش مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. ارتفاع تراز یخبندان و یا

گرفته شده است. با استفاده از نمودارهای جو بالایی موجود دمای پایه ابر، در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی در بازه زمانی (۱۹۹۲-۲۰۱۱) تعیین شده است. مبنای استخراج اطلاعات ابرناکی ۷/۸ به بالا (تمام ابری) در نظر گرفته شده است و بر این اساس اطلاعات جو بالایی روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی استخراج شده است. بدین معنی که روزهای تمام ابری استخراج گردید و روزهایی که در آن بارندگی رخ داده بود از روزهایی که بارندگی نداشت تفکیک شد و میانگین دمای پایه ابر در هر کدام محاسبه شد، بر این اساس اطلاعات ذیل بدست آمد.

مناسب‌تری را برای اجرای طرح‌های باروری فراهم می‌کند (امیدوار، ۱۳۸۱). برای تعیین پایه ابر بوسیله ساندینگ از بخار آب موجود در لایه‌های جو استفاده شده است، سطحی که از بخار آب اشباع است یعنی دمای محیط و دمای نقطه شبنم برابر است، پایه ابر در آن سطح در نظر گرفته شده است. در گزارش‌هایی که غالبیت ابرهای تشکیل شده ابرهای سیستمی بوده و بارندگی‌ها به صورت رگباری نباشد پایه ابر در سطح LCL در نظر گرفته شده و در مواقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومولوس و کومولونیمبوس پایه ابر در سطح CCL در نظر گرفته شده است. سپس از روی نمودار اسکیتوتی دمای این سطوح مشخص شده و به عنوان دمای پایه ابر در نظر

جدول ۶- میانگین دمای پایه ابر در شرایط بدون بارندگی

| ماه | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|----------|------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|------|-----|
| دما (C°) | -۲,۴ | -۳,۲ | -۱ | -۶,۵ | -۸,۶ | - | - | - | - | -۱۰,۵ | -۸,۶ | -۱۰ |

می‌باشد. در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر شرایط تمام ابری جهت اندازه‌گیری دمای پایه ابر رخ نداده است.

بررسی شرایط بدون بارندگی

از بررسی جدول بالا متوجه می‌شویم که کمترین دمای پایه ابر در روزهای بدون بارندگی مربوط به ماه اکتبر با میانگین ۱۰/۵- درجه سلسیوس و دسامبر با میانگین ۱۰- درجه سلسیوس

جدول ۷- میانگین دمای پایه ابر در شرایط بارندگی (۲۰۱۱-۱۹۹۲)

| ماه | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|----------|------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| دما (C°) | -۴,۵ | -۰,۶ | -۳ | -۱,۵ | -۰,۳ | - | - | - | - | -۰,۲ | -۰,۳ | -۲,۵ |

بررسی شاخص‌های ناپایداری

شاخص‌های ناپایداری روابطی هستند که به کمک آن‌ها می‌توان ناپایداری همرفتی مناطق مختلف جو را بررسی کرد (صادقی حسینی، ۱۳۸۵). در این قسمت برای بررسی خصوصیات فیزیکی ابرها و شناسایی ابرهای مستعد جهت بارورسازی، از برخی شاخص‌های ناپایداری، از قبیل شاخص K، شولتز، آب قابل بارش و شاخص CAPE استفاده شده است، در این تحقیق ابتدا از آرشیو داده‌های اداره کل خراسان

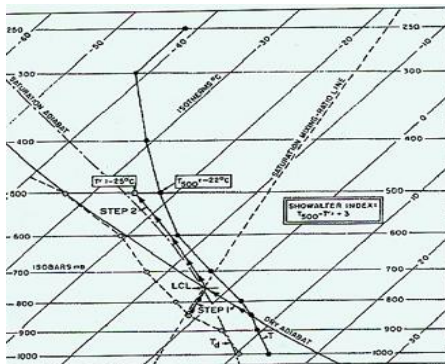
بررسی در شرایط بارندگی

از بررسی اشکال بالا مشخص است که کمترین دمای پایه ابر در شرایط بارندگی مربوط به ماه‌های ژانویه با میانگین ۴/۵- درجه سلسیوس و مارس با میانگین ۳- و دسامبر با ۲/۵- درجه سلسیوس است که در اینجا هم‌منا همان شرایط تمام ابری است. در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر شرایط تمام ابری جهت اندازه‌گیری دمای پایه ابر رخ نداده است.

بررسی همبستگی بین شاخص شولتز (SI) و میزان بارندگی
این شاخص تفاوت دمای محیط و دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ میلی‌بار است در شرایطی که فرض شود بسته اولیه در سطح ۸۵۰ میلی‌بار قرار داشته باشد.

$$SI = T_{500} - T' \quad (2)$$

برای بدست آوردن T' از نقطه دمای خشک در ۸۵۰ میلی‌بار موازی بی درروی خشک، حرکت کرده و سپس از دمای نقطه شب‌نم در سطح ۸۵۰ میلی‌بار حرکت کرده تا خط قبلی را در نقطه‌ای قطع کند. از نقطه مزبور، موازی بی‌درروی اشباع بالا رفته تا به سطح ۵۰۰ میلی‌بار برسیم. دمای نقطه بدست آمده T' خواهد بود.



شکل ۲- تعیین مرحله به مرحله شاخص شولتز بر نمودار اسکیتوی

برای داده‌های گردآوری شده و پس از حذف مقادیر نامتعارف، ابتدا توسط نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص شولتز و میزان بارندگی ۶ ساعته بررسی گردید و نمودار خطی پراکنش رسم گردید. از خروجی‌ها مشاهده شد از تعداد ۱۹۶ داده صحیح، ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص شولتز و بارش مقدار ۰,۰۷۱- را نشان داد، که ارتباط معکوس بسیار ضعیفی را در سطح معنی‌دار ۰,۱٪ مشخص کرده و داده‌ها پراکنندگی بسیار بالایی را نشان داده است.

رضوی، در بازه زمانی ۱۹۹۲-۲۰۱۱ روزهایی که در آن بارندگی ثبت شده بود استخراج گردید و میزان بارندگی ۲۴ ساعته به تفکیک سه ساعت به سه ساعت مشخص گردید. از آنجا که اندازه‌گیری‌های داده‌های جو بالای مشهد در سال‌های گذشته به تعداد یک بار در روز (در ساعت ۷:۰۰ Z) اندازه‌گیری می‌شد، لذا برای افزایش صحت و دقت، میزان بارش در روزهایی که بارندگی اتفاق افتاده بود از ساعت ۰۰ تا ۰۶ گرینویچ مشخص گردید، سپس با استفاده از داده‌های ایستگاه جو بالای مشهد از سایت دانشگاه وایومینگ، شاخص‌های ذکر شده در روزهایی که در آن بارندگی رخ داده بود بدست آمد و همبستگی بین شاخص‌ها و بارش مورد بررسی قرار گرفت. جهت تعیین مقدار آستانه برای شاخص‌ها، همبستگی بین بارش با هر کدام از شاخص‌ها به طور مجزا مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بهترین نمودار خطی توسط نرم‌افزار SPSS به این داده‌ها برازش داده شد.

بررسی همبستگی بین شاخص k و میزان بارندگی

مقدار شاخص k با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (Tv_{500} - Td_{700}) \quad (1)$$

تفاوت دما بین ۸۵۰ میلی‌بار و ۵۰۰ میلی‌بار نشان دهنده کاهش قائم دما و دمای نقطه شب‌نم در ۸۵۰ میلی‌باری و تفاوت دما و دمای نقطه شب‌نم در سطح ۷۰۰ میلی‌بار تخمینی برای محتوای رطوبتی است.

برای داده‌های گردآوری شده و پس از حذف مقادیر نامتعارف، ابتدا توسط نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص K و میزان بارندگی ۶ ساعته بررسی و سپس نمودار خطی پراکنش رسم گردید. از خروجی‌ها مشاهده شده است، از تعداد ۳۵۸ داده صحیح، ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص k و بارش مقدار ۰,۱۴۲ را نشان داده که ارتباط مستقیم بسیار ضعیفی را در سطح معنی‌دار ۰,۱٪ مشخص کرده و داده‌ها پراکنندگی بسیار بالایی را نشان می‌دهد.

مشاهده شد از تعداد ۳۷۷ داده صحیح، ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص آب قابل بارش و میزان بارش مقدار ۰,۲۰۱ را نشان داد که ارتباط مستقیم بسیار ضعیفی را در سطح معنی دار ۱٪ مشخص کرده و داده‌ها پراکندگی بسیار بالایی را نشان داده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه منطقه مشهد جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و با عنایت به نیاز آبی منطقه، بارورسازی ابرها در منطقه می‌تواند مفید واقع شود. در بررسی میزان ابرناکی منطقه مشخص شد بیشترین فراوانی رخداد هفت تا هشت هشتم ابری به ترتیب در ماه‌های مارس، فوریه، ژانویه، دسامبر و آوریل بوده است. با بررسی فراوانی تشکیل ابرهای پایین و متوسط در دشت مشهد مشخص گردید بیشترین فراوانی رخداد ابرهای پایین و متوسط در دشت مشهد در ماه‌های سرد و بارانی دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می رخ داده است. از بررسی شرایط ابرناکی ابرهای پایین مشخص گردید بیشترین شرایط نیمه‌ابری (سه تا شش هشتم ابری) ابرهای پایین در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می اتفاق افتاده و بیشترین شرایط آسمان ابر پایین (۷ تا ۸ هشتم ابر پایین) در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل اتفاق افتاده است. بعد از آن با توجه به اهمیت ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم (شامل ابرهای کومولوس نوع ۲ و کومولونیمبوس نوع ۳ و ۹) در فرآیند بارورسازی و بررسی تشکیل این ابرها در منطقه مورد نظر، مشخص شد که ابرهای با رشد و توسعه قائم بیشتر در ماه‌های مارس، آوریل و می رخ می‌دهد. از بررسی تراز یخبندان و دمای پایه ابر مشخص شد که کمترین دمای پایه ابر در شرایط بارندگی مربوط به ماه‌های دسامبر با میانگین ۲,۵- درجه سلسیوس، ژانویه با میانگین ۴,۵- درجه سلسیوس و مارس با میانگین ۳- درجه سلسیوس بود که در اینجا مینا همان شرایط تمام ابری در نظر گرفته شده و در روزهای بدون بارندگی کمترین دمای پایه ابر مربوط به ماه اکتبر با میانگین

بررسی همبستگی بین شاخص CAPE و میزان بارندگی

انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی، شاخص حداکثر انرژی جنبشی ممکن بسته هوای ناپایدار را صرف‌نظر از اثر بخار آب و آب چگالیده شده در شناوری، نشان می‌دهد. شاخص CAPE به معنی انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی می‌باشد و از بهترین شاخص‌هایی است که برای نشان دادن ناپایداری جو به کار می‌رود. عاملی که برای محاسبه این شاخص به کار گرفته شده، صعود بسته هوا از سطح LFC^۱ تا سطح EL^۲ می‌باشد

$$CAPE = \int_{Z_{LFC}}^{Z_{EL}} B dz \quad (۳)$$

در این رابطه B حداکثر شناوری در واحد جرم است که بسته شناور می‌تواند کسب کند تا از سطح LFC تا تراز EL بالا رود. برای داده‌های گردآوری شده و پس از حذف مقادیر نامتعارف، ابتدا توسط نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص CAPE و میزان بارندگی ۶ ساعته (در بارش‌های رگباری) بررسی گردید و نمودار خطی پراکنش رسم گردید. از خروجی‌ها مشاهده شد از تعداد ۴۷ داده صحیح، ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص CAPE و بارش مقدار ۰,۱۰۸ را نشان می‌دهد که ارتباط مستقیم بسیار ضعیفی را در سطح معنی دار ۱٪ مشخص کرده و داده‌ها پراکندگی بسیار بالایی را نشان می‌دهد.

بررسی همبستگی بین شاخص آب قابل بارش و میزان بارندگی

آب قابل بارش بنا به تعریف، مقدار آب چگالیده شده موجود در یکستون هوای نمناک، آب قابل بارش نامیده و برحسب سانتی‌متر یا میلی‌متر بیان می‌شود.

$$PW = \int_z^z \rho_w dz \quad (۴)$$

که در آن ρ_w چگالی بخار آب و pw آب قابل بارش است. برای داده‌های گردآوری شده، پس از حذف مقادیر نامتعارف، ابتدا توسط نرم‌افزار SPSS ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص آب قابل بارش و میزان بارندگی ۶ ساعته بررسی گردید و نمودار خطی پراکنش رسم گردید. از خروجی‌ها

ارتفاعات جنوبی کرمان به منظور ارزیابی امکان اجرای پروژه‌های افزایش بارندگی.

۳- بداق جمالی، جواد، جوانمرد، سهیلا (۱۳۸۲) "مفاهیم مقدماتی تعدیل آب و هوا با استفاده از فن‌آوری بارورسازی ابرها"، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد.

۴- بداق جمالی، جواد، جوانمرد، سهیلا، حیدری، محمد (۱۳۸۳) بولتن علمی پژوهشکده اقلیم‌شناسی تابستان ۱۳۸۳، تحقیق و بررسی در مورد چگونگی مه‌زدایی در مناطق مه‌آلود به هنگام پروازهای ارتفاع پایین بالگردهای هوانیروز.

۵- بداق جمالی، جواد و جوانمرد، سهیلا، حیدری، محمد (۱۳۸۴)، پژوهش‌نامه حمل و نقل، شماره دو، سال اول، بهار، ۱۳۸۴ بررسی نقش بارورسازی ابرهای سطح پایین به منظور ارتقاء ایمنی در جاده‌های کوهستانی.

۶- جوانمرد، سهیلا، گلی مختاری، لیلان، (۱۳۸۳)، بولتن علمی پژوهشکده اقلیم‌شناسی ۱۳۸۳، چشم‌اندازهای جدید تعدیل آب و هوا.

۷- حمیدی، اسحاق، (۱۳۹۰)، پتانسیل بارورسازی ابرها با استفاده از شاخص‌های ناپایداری برای منطقه مشهد، تابستان ۱۳۹۰، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد.

۸- علیجانی، بهلول، (۱۳۸۵)، آب و هوای ایران.

۹- فلاح، رضا، (۱۳۸۵)، چگونگی بارورسازی ابرها.

۱۰- رحیم‌زاده، فاطمه، (۱۳۹۰)، روش‌های آماری در مطالعات هواشناسی و اقلیم‌شناسی.

۱۱- گزارش نهایی پروژه مطالعات مرتبط با تعدیل مصنوعی آب و هوا، گزارش ۶، مراحل امکان‌سنجی بارورسازی ابرها و آزمون آن برای استان خراسان، پاییز ۱۳۸۱.

۱۲- صادقی حسینی، سیدعلیرضا، رضاییان، مهتاب، بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای

۱۰/۵- درجه سلسیوس و دسامبر با میانگین ۱۰- درجه سلسیوس بوده است و در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر شرایط تمام ابری رخ نداد. از بررسی‌ها مشخص شد که در منطقه مشهد شاخص‌های ناپایداری (آب قابل بارش، شولتز، CAPE, K) همبستگی بسیار ضعیفی با میزان بارش ۶ ساعته دارند و نمی‌توان از این شاخص‌ها در تعیین آستانه مناسب جهت بارورسازی ابرها استفاده کرد. با استفاده از نتایج حاصل از بررسی‌های فوق پیشنهاد می‌گردد که عملیات بارورسازی ابرها در این منطقه از اواخر پاییز تا نیمه‌های بهار و پس از بررسی شرایط ابرناکی صورت بگیرد و از آنجایی که هر آزمایش بارورسازی ابر مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است، به منظور جلوگیری از هزینه‌های زیاد، پیشنهاد می‌شود، ابتدا آن شرایط با استفاده از مدل‌های عددی بومی مورد آزمون قرار گرفته و بعد مورد استفاده قرار بگیرد. از آنجا که در منطقه مشهد شاخص‌های ناپایداری (آب قابل بارش، شولتز، CAPE K) همبستگی بسیار ضعیفی با میزان بارش ۶ ساعته دارند و نمی‌توان از این شاخص‌ها در تعیین آستانه مناسب جهت بارورسازی ابرها استفاده کرد، پیشنهاد می‌شود در این زمینه مطالعات بیشتری با استفاده از سایر شاخص‌ها صورت بگیرد و از آنجا که ضریب همبستگی پیرسون رابطه خطی را منعکس می‌کند (رحیم زاده ۱۳۹۰). در مواردی که روابط غیرخطی بین زوج داده‌ها حاکم باشد قادر به برآورد مناسبی از رابطه دو متغیر نیست، بنابراین توصیه می‌گردد، مطالعات بیشتری با استفاده از سایر روش‌های آماری و همچنین ارتباط آن‌ها با میزان بارندگی ۲۴ ساعته به جای بارش ۶ ساعته صورت بگیرد.

منابع

۱- ابراهیمی، احمد، (۱۳۷۰)، مجله نیوار، بهار ۱۳۷۰، چگونگی باروری ابرها در کویر مرکزی ایران.

۲- امیدوار کمال، علوم انسانی، (۱۳۸۱)، شماره ۲۷، صفحه ۳۷ تا ۵۰، زمستان ۱۳۸۱، برخی ویژگی‌های اقلیم‌شناسی ابر در

19. Woodley, W., DeFelice, T.P., Golden, J., Griffith, D., Rosenfeld, D., Breed, D., Solak, M., Boe, B., Extra Area Effects of Cloud Seeding - An Updated Assessment, *Atmospheric Research* (2013), doi: 10.1016/j.atmosres.2013.08.014.
20. Woodley, W. L. , Rosenfeld , D .(2003). The Development and Testing of a New Method to Evaluate the Operational Cloud-Seeding Programs in Texas. *Journal of applied meteorology*, vol 43, Issue 2, pp 249-263.
21. Woodley, W. L. , Rosenfeld , D .(2003). Results of On-Top Glaciogenic Cloud Seeding in Thailand. Part I: . *Journal of applied meteorology*, vol 42, pp 920-938.
- همرفتی منطقه اصفهان، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۲، ۱۳۸۵.
13. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
14. <http://www.galin.blogfa.com/post-14.aspx>.
15. <http://www.irimo.ir/farsi/publication/index.asp>.
16. <http://www.razavimet.gov.ir/Pages.aspx?PageID = 44>.
17. <http://www.sabteahval-kh.ir/tabid/3081/Default.aspx>.
18. <http://www.wmir.ir/>.