

امکان سنجی بارورسازی ابرها با بررسی شرایط ابرناکی و برخی شاخص‌های ناپایداری در دشت مشهد

محسن رحمدل^۱

دانشجوی دکتری اداره هواشناسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱

چکیده

در این تحقیق بر اساس آمار سالنامه‌های هواشناسی (۱۹۸۶-۲۰۰۸) به مطالعه ابرناکی دشت مشهد پرداخته شده و بیشترین فراوانی رخداد تمام ابری مشخص گردیده است. با در نظر گرفتن اهمیت ابرهای متوسط و پایین در فرایند بارورسازی^۲، با استفاده از اطلاعات اداره هواشناسی سینوپتیک مشهد (۲۰۰۱-۲۰۱۰) به بررسی فراوانی تشکیل ابرهای پایین و متوسط و همچنین شرایط ابرناکی ابرهای پایین پرداخته شده است. سپس ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم (شامل ابرهای کومه‌ای نوع ۲ و کومه‌ای بارا)، در منطقه، مورد بررسی قرار گرفته است. از این تحقیق مشخص گردید که بیشترین ابرناکی در فصول سرد و بارانی زمستان و اوایل بهار اتفاق افتاده است. آن گاه با استفاده از داده‌های جوبالای ایستگاه مشهد و با استفاده از نرم‌افزارهای اسکیوتویی به بررسی دمای پایه ابر و تراز یخ‌بندان ابرهای منطقه در دو حالت بارندگی و بدون بارندگی پرداخته شده و با استفاده از نمودارهای جوبالای^۳ موجود دمای پایه ابر، در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی در بازه زمانی (۱۹۹۲-۲۰۱۱) تعیین شده و میانگین دمای پایه ابر در هر یک از حالات به دست آمده است. سپس با استفاده از داده‌های جوبالای ایستگاه مشهد از سایت دانشگاه وایومینگ^۴ شاخص‌های ناپایداری، شامل شاخص^۵ K، شولتر^۶، آب قابل بارش^۷ و شاخص^۸ CAPE در روزهایی که بارندگی رخ داده بود، در ساعت ۰۰ گرینویچ طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۱ به دست آمده و جهت تعیین مقدار آستانه برای شاخص‌ها، پس از بررسی همبستگی بین بارش^۹ ۶ ساعته با هر کدام از شاخص‌ها بهترین نمودار خطی توسط نرم‌افزار SPSS به این داده‌ها برازش داده شده است. از بررسی‌ها مشاهده شد همبستگی بین بارش تجمعی شش ساعته با شاخص‌های K و آب قابل بارش مثبت و در سطح ۱ درصد معنی دار می‌باشد، ولی در مورد شاخص‌های ناپایداری شولتر و CAPE با توجه به میزان همبستگی و سطح معنی‌داری، نمی‌توان از این شاخص‌ها در تعیین آستانه مناسب جهت بارورسازی ابرها استفاده کرد. در مجموع داده‌ها پراکنده‌گی بالایی را مشخص کردند.

واژه‌های کلیدی: تعدیل وضع هوای شاخص K، شاخص شولتر، آب قابل بارش، CAPE

مقدمه

در ۱۳ نوامبر سال ۱۹۴۶ وین سنت جی-شیفر حدود ۱۰۵ کیلوگرم از قرص‌های یخ خشک را از یک هوایپیمای سبک به درون یک ابر استراتوکومولوس عدسی شکل (ابر سرد) رها کرد. در مدتی حدود ۵ دقیقه ابر به پره‌های برف تبدیل شده و در زیر پایه ابر نزول کرد. در طول جنگ جهانی دوم نیز تحقیقات ادامه یافت و حتی فنديسین در یک پرواز پرهیاهو از درون هوایپیما ماسه را به عنوان هسته انجام داده کرد، اما این ذرات به عنوان هسته‌های یخ‌ساز در تولید باران مصنوعی چندان موثر واقع نشدند. ونگوت با استفاده از ژنراتورهای تصعید یدور نقره که می‌تواند ذرات ریز یدور نقره را به عنوان هسته

^۱ mohsen Rahmadel@yahoo.com نویسنده مسئول: محسن رحمدل

^۲ Cloud seeding

^۳ Skewt Diagram

^۴ <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

^۵ K Index

^۶ Showalter Index

^۷ Precipitable Water Index

^۸ Convective Available Potential Energy Index

انجماد در شرایط مناسب صعود و ناپایداری جوی به پایه ابر برساند این تجربه را در طبیعت مورد آزمایش قرار داد (بداق جمالی و جوانمرد، ۱۳۸۲). از دیگر موارد می‌توان به تحقیقی که توسط صادقی حسینی و مهتاب رضاییان (۱۳۸۵)، با عنوان بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان انجام شده، اشاره کرد. در این پژوهش در دوره‌ای دوازده ساله ۱۹۹۱-۲۰۱۲ در روزهایی که بارش در ایستگاه زمینی ثبت شده، تعدادی از شاخص‌های ناپایداری برای منطقه اصفهان محاسبه شده است. سپس به کمک منحنی بهترین برازش بین شاخص در حکم متغیر مستقل و میانگین بارش در نقش متغیر وابسته، آستانه مناسب برای بارورسازی ابر برآورد شده است. این آستانه برای شاخص آب قابل بارش ۹ میلیمتر، شاخص شولتر ۲ درجه سلسیوس، شاخص^a برابر ۲۴ درجه سلسیوس و برای شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی برابر با ۱۰۰ J.kg به دست آمده است. همچنین با توجه به محدودیت‌هایی که در استفاده از شاخص‌های ناپایداری در این پژوهش از آن‌ها یاد شده، شاخص آب قابل بارش ابر در حکم بهترین شاخص انتخاب شده است (صادقی حسینی و رضاییان، ۱۳۸۵). از دیگر تحقیقات در این رابطه می‌توان به رابطه آب محتوای ابر و سرعت بالارو در تولید خرده یخ توسط Saunders و Hosseini (2001) برای معرفی آستانه‌های دیگری برای بارورسازی ابرها اشاره کرد. بر اساس این تحقیق در محتوای ابر هنگامی که سرعت بالاروی ابر کمتر از ۶ متر بر ثانیه باشد، ابر خود از راه تولید بیشینه خرده یخ به شکل طبیعی می‌تواند بارور شود و به بارورسازی مصنوعی نیازی نیست (حمیدی، ۱۳۹۰). مسئله کم آبی و رشد فزاینده مصرف و لزوم یافتن راههای جدید استحصال آب به منظور رفع کمبودها، تاکید بر استفاده از تکنولوژی باران مصنوعی است (فلاح، ۱۳۸۵). در کشورهایی نظیر فلسطین اشغالی، سوری، ایتالیا، اسپانیا، فرانسه، هند و پاکستان مطالعات و آزمایش‌های گوناگونی انجام شد، نتایج ارائه شده افزایش بارندگی تا ۲۵ درصد را نشان می‌دهد (ابراهیمی، ۱۳۷۰). به تدریج نه تنها مراکز علمی و دانشگاهی، بلکه مراکز فناوری و تکنولوژیک نیز فعالیت‌هایی را در این زمینه انجام دادند، مانند سازمان جهانی هواشناسی. به عنوان مثال در شمال غربی تایلند در حوضه آبریز بومیبل^۹ آزمایش‌هایی در ماههای آوریل، می و ژوئن انجام گرفت (Woodley & Rosenfeld, 2003). طبق گزارشات سازمان جهانی هواشناسی، در حال حاضر تنها در آمریکا ۱۶ پروژه باروری ابرها و در بیش از ۴۰ کشور دیگر نیز چندین پروژه به صورت طرح‌های آزمایشی در حال اجراست. در تگراس آمریکا نیز توسعه و آزمایش یک روش جدید برای ارزیابی برنامه بارورسازی ابرها در حال انجام است. اکثر اقدامات پیشرفت‌هایی که در زمینه تعديل وضع 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 (Woodley & Rosenfeld, 2003). در سال ۲۰۱۵ دولت امارات متحده عربی برنامه تحقیقاتی افزایش استحصال از آب باران را با ۵ میلیون دلار، تحت مدیریت مرکز بین المللی هواشناسی و زلزله شناسی^{۱۰} (NCMS) گسترش داد (McBride, 2017). این تحقیق با هدف ارزیابی شرایط ابرناکی و بررسی وضعیت ابرهای منطقه مشهد، جهت تعیین پتانسیل بارورسازی برای استحصال آب انجام شده است.

مواد و روش‌ها موقعیت منطقه

شهرستان مشهد از شمال به شهرستان کلات، از شمال غربی به درگز، از غرب به چناران و نیشابور و از شرق به سرخس و تربت جام محدود می‌گردد. این شهر در انتهای جنوبی دشت توس واقع شده و رشته کوه هزار مسجد در شمال شرقی و رشته کوه بینالود در غرب و جنوب غربی آن قرار دارد. بلندترین قله رشته کوه هزار مسجد، از در کوه با ارتفاع تقریبی ۳۰۰۰ متر است. شهر مشهد از سطح دریاهای آزاد ۹۹۹ متر بلندتر می‌باشد. ایستگاه هواشناسی مشهد در طول جغرافیایی ۵۹°۳۸' و عرض جغرافیایی ۳۶°۱۶' و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد (پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۱). مشهد دارای ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی، یک ایستگاه سینوپتیک و یک ایستگاه جویالاست.^{۱۱}

⁹ Bhumibol

¹⁰ National Center of Meteorology and Seismology

¹¹ <http://www.razavimet.gov.ir/Pages.aspx?PageID=44>

روش تحقیق

این پژوهش با استناد به آمار موجود در بانک اطلاعاتی سازمان هواشناسی کشور و اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی انجام شده است. روش کار در این پژوهش استنادی، آماری، فیزیکی، تحلیلی، سینوپتیکی است. در ابتدا به بررسی ابرناکی منطقه پرداخته شده و ماههایی که در آن بیشینه ابرناکی رخداده مشخص شده است، آنگاه با توجه به اهمیت نقش ابرهای پایین و متوسط در فرایند بارورسازی، در هر ماه فراوانی روزهایی که در آن ابرهای پایین و متوسط تشکیل شده، 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 (۳/۸ تا ۶/۸ ابری) و شرایط تمام ابری (۷/۸ تا ۸/۸ ابری) پرداخته شده و بعد از آن تشکیل ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم شامل ابرهای کومهای (کومولووس نوع ۲) و کومهای بارا (کومولونیمبوس) مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از نمودارها و داده‌های جوبالای ایستگاه مشهد و با استفاده از نرم افزارهای اسکیوتی به بررسی دمای پایه ابر و تراز یخنیان 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 به وسیله ساندینگ، از بخار آب موجود در لایه‌های جو استفاده شده است، سطحی که از بخار آب اشباع شده، یعنی دمای محیط و دمای نقطه شبنم برابر است، پایه ابر در آن سطح در نظر گرفته شده است. در گزارش‌هایی که غالب ابرهای تشکیل شده ابرهای سامانه‌ای بوده و بارندگی‌ها به صورت رگباری نباشد پایه ابر در سطح^{۱۲} LCL در نظر گرفته شده و در موقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومهای و کومهای بارا، پایه ابر در سطح^{۱۳} CCL در نظر گرفته شده است. معیار تعیین دمای پایه ابر آسمان تمام ابری در نظر گرفته شده است. سپس روزهایی که طی این مدت بارندگی رخداده استخراج شده و میزان بارندگی به تفکیک ۳ ساعت به ۳ ساعت مشخص گردیده است. با استفاده از داده‌های جوبالای موجود در ساعت ۰۰ گرینویچ، شاخص‌های ناپایداری (شاخص K، شولتر، آب قابل بارش، شاخص CAPE) در روزهایی که بارندگی رخداده بود استخراج گردید. چون اندازه‌گیری‌های ایستگاه جوبالای مشهد در ساعت ۰۰ گرینویچ اندازه‌گیری می‌شود، میزان بارندگی شش ساعته از ساعت ۰۰ گرینویچ تا ۰۶ گرینویچ اندازه‌گیری و همبستگی بین میزان بارندگی و شاخص‌های محاسبه شده بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مطالعه ابرناکی 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-فایل‌های SC DATA- (۲۰۰۱-۲۰۱۰) استفاده شده است. برای بررسی خصوصیات فیزیکی ابرها، نمودارهای جوبالا و شناسایی ابرهای مستعد جهت بارورسازی از داده‌های سایت دانشگاه وایومینگ استفاده گردیده و برخی شاخص‌های ناپایداری، شامل شاخص K، شولتر، آب قابل بارش و شاخص CAPE در ساعت ۰۰ گرینویچ طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ به دست آمده و میزان همبستگی هر کدام از آنها با میزان بارندگی ۶ ساعته (از ساعت ۰۰ تا ۰۶ گرینویچ) بررسی و تجزیه و تحلیل گردیده است.

نتایج و بحث

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 به طورکلی 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 (۱/۸ تا ۲/۸ ابری)، نیمه ابری (۳/۸ تا ۶/۸ ابری) و تمام ابری (۷/۸ تا ۸/۸ ابری) 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).

^{۱۲} Lifting Condensation Level

^{۱۳} Convective Condensation Level

اطلاعات استخراج شده از سالنامه‌های هواشناسی^{۱۴} طی دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۰۸ مشخص گردید در این منطقه بیشترین فراوانی رخداد تمام 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، زانویه 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 آگوست با فراوانی و میانگین ۰ می‌باشد.

بررسی فراوانی رخداد ابرهای پایین و متوسط

ابرهای علاوه بر نوع یا دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بر اساس معیار ارتفاع کف یا قله ابر از سطح زمین نیز می‌توان تقسیم بندی کرد. در رابطه با طراحی و اجرای طرح‌های باروری و افزایش بارش عمده توجه زیادی به ابرهای پایین و متوسط می‌شود (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 از تحقیق ابتدا از اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی (۲۰۰۱-۲۰۱۰) گروه 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 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، زانویه با میانگین ۲۵/۲ روز، فوریه با میانگین ۱/۲۵ روز، مارس با میانگین ۲۸/۸ روز، آوریل با میانگین ۲۷/۸ روز و می با میانگین ۲۸/۵ روز در ماه) رخداده و کمترین آن در ماه‌های سپتامبر با میانگین ۱۲/۸ روز و آگوست با میانگین ۱۳/۲ روز، اتفاق افتاده است.

بررسی میزان ابرنaki ابرهای پایین

در این قسمت با توجه به اهمیت ابرهای پایین در فرایند بارورسازی، میزان ابرنaki ابرهای پایین بر اساس شرایط نیمه ابری (۳/۸ تا ۶/۸ ابر پایین) و تمام ابری (۷/۸ تا ۸/۸ ابر پایین) طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱).

جدول (۱): میانگین تعداد روزهای نیمه ابری (۳/۸ تا ۶/۸ ابر پایین) و تمام ابری (۷/۸ تا ۸/۸ ابر پایین)

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

همان گونه که از جداول بالا مشخص است بیشترین آسمان نیمه ابر پایین در ماه‌های دسامبر، زانویه، فوریه، مارس، آوریل و می اتفاق افتاده و بیشترین آسمان تمام ابر پایین در ماه‌های دسامبر، زانویه، فوریه، مارس و آوریل اتفاق افتاده است.

بررسی ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم

در مکان‌گزینی و اجرای طرح‌های باروری به 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، گویای شرایط ناپایداری و همرفتی در جو می‌باشند (امیدوار، ۱۳۸۱) (جدول ۲).

جدول (۲): میانگین روزهای همراه با تشکیل ابرهای کومه ای (eu₂) و کومه ای بارا (cb) در بازه زمانی (۲۰۰۱-۲۰۱۰) در مشهد

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
eu ₂ -cb	۴/۹	۹/۳	۱۴/۸	۱۹	۲۰	۹/۱	۵/۴	۳/۲	۳/۴	۷/۶	۸/۷	۷/۳

^{۱۴} <http://www.irimo.ir/farsi/publication/index.aspx>

همان‌گونه که از بررسی جداول و اشکال بالا مشاهده می‌شود، بیشترین ابرهای با رشد و توسعه قائم در ماههای مارس، آوریل و می 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 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 ۱۰-۲۰- درجه سلسیوس می‌شود، چون در این محدوده دمایی، تاثیر هسته‌های یخ‌ساز مصنوعی، بیش از هسته‌های یخ‌ساز طبیعی است و در تاثیرگذاری در فرایند تشكیل بارش دارای اهمیت بیشتری هستند. بنابراین ماههایی که در آن‌ها تمام یا قسمتی از ضخامت ابرها در بالای تراز یخبندان قرار می‌گیرند، زمان مناسبتری را برای اجرای طرح‌های باروری فراهم می‌کند (امیدوار، ۱۳۸۱). برای تعیین پایه ابر به وسیله 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 (ابراهیمی، ۱۳۷۰). در گزارش‌هایی که غالب ابرهای تشکیل شده ابرهای سامانه‌ای بوده و بارندگی‌ها به صورت رگباری نباشد ابر در سطح LCL در نظر گرفته شده و در موقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومه‌ای و کومه‌ای باره، پایه ابر در سطح CCL در نظر گرفته شده است. سپس از روی نمودار اسکیوتی، دمای این سطوح مشخص شده و به عنوان دمای پایه ابر در نظر گرفته شده است. با استفاده از نمودارهای جو بالای موجود دمای پایه ابر، در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی در بازه زمانی (۱۹۹۲-۲۰۱۱) تعیین شده است. مبنای استخراج اطلاعات ابرناتکی ۷/۸ به بالا (تمام ابری) در نظر گرفته شده است. بر این اساس اطلاعات جو بالای 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 زیر به دست آمد.

بررسی شرایط بدون بارندگی

از بررسی جدول (۳) مشخص است 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 است. در ماههای ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر شرایط تمام ابری جهت اندازه‌گیری دمای پایه ابر رخ نداده است.

جدول (۳): میانگین دما پایه ابر در شرایط بدون بارندگی

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

بررسی در شرایط بارندگی

از بررسی جدول (۴) 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 هم مبنا همان شرایط تمام ابری در نظر گرفته شده است. در ماههای ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر شرایط تمام ابری جهت اندازه گیری دمای پایه ابر رخ نداده است.

جدول (۴): میانگین دمای پایه ابر در شرایط بارندگی (۱۹۹۲-۲۰۱۱)

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

بررسی شاخص‌های ناپایداری

شاخص‌های ناپایداری روابطی هستند که به کمک آن‌ها می‌توان ناپایداری همرفتی مناطق مختلف جو را بررسی کرد (صادقی حسینی و رضاییان، ۱۳۸۵). در این قسمت برای بررسی خصوصیات فیزیکی ابرها و شناسایی ابرهای مستعد جهت بارورسازی، از برخی شاخص‌های ناپایداری، از قبیل شاخص K، شولتر، آب قابل بارش و شاخص CAPE استفاده شده است. در این تحقیق ابتدا از آرشیو داده‌های اداره کل هواشناسی خراسان 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 اندازه‌گیری داده‌های جوبالای مشهد در سال‌های گذشته به تعداد یکبار در روز (در ساعت ۰۰ گرینویچ) اندازه‌گیری می‌شد، بنابراین برای افزایش صحت و دقت، میزان بارندگی در روزهایی که بارندگی رخ داده بود، از ساعت ۰۰ تا ۰۶ گرینویچ مشخص گردید، سپس با استفاده از داده‌های حاصل از نمودارهای اسکیوتوی جوبالای مشهد از سایت دانشگاه وایومینگ، شاخص‌های ذکر شده در روزهایی که در آن بارندگی رخ داده بود استخراج 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. شاخص‌های ناپایداری K، شولتر، انرژی پتانسیل در دسترس (CAPE) و آب قابل بارش با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند.

$$K = \left(T_{\text{ا..}} - T_{\text{ه..}} \right) + Td_{\text{ا..}} - (T_{\text{v..}} - Td_{\text{v..}}) \quad (1)$$

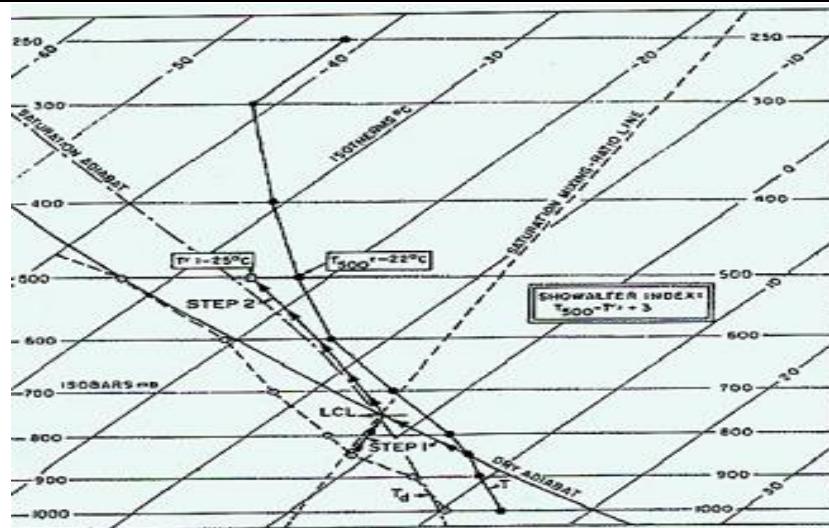
$$SI = T_{\text{ه..}} - T' \quad (2)$$

$$CAPE = \int_{Zlfc}^{Zel} Bdz \quad (3)$$

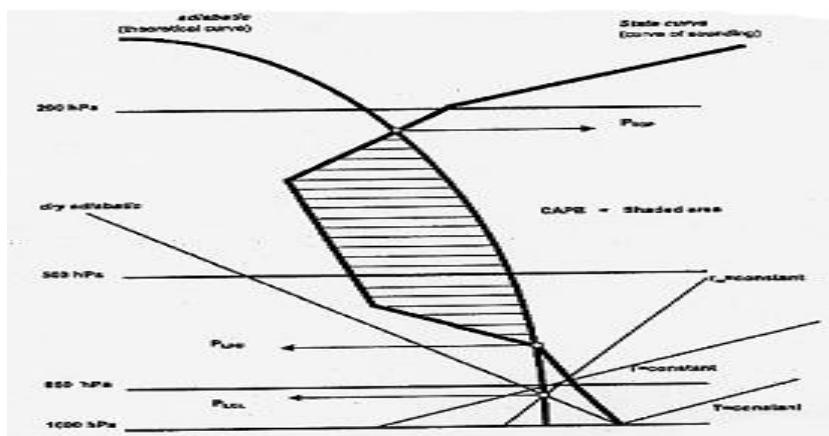
$$PW = \int_0^Z \rho_w dz \quad (4)$$

جدول (۵): متغیرهای مورد استفاده در شاخص‌های ناپایداری بالا

T' : دمای سطح ۸۵۰ میلیباری	$T_{\text{ا..}}$: دمای سطح ۸۵۰ میلیباری
$T_{\text{ه..}}$: سطح تراز توازن-قله ابر	Zel
$Zlfc$: سطح تراز همرفت آزاد	$Td_{\text{ا..}}$: دمای نقطه شبنم در سطح ۸۵۰ میلیباری
B : حداقل شناوری در واحد جرم	$Td_{\text{v..}}$: دما در سطح ۷۰۰ میلیباری
ρ_w : چگالی بخار آب	$Td_{\text{v..}}$: دمای نقطه شبنم در سطح ۷۰۰ میلیباری



شکل(۱): تعیین مرحله به مرحله شاخص شولتر بر نمودار اسکیوتوی



شکل (۲): محاسبه مقدار انرژی پتانسیل در دسترس همروftی به کمک نمودار اسکیوتوی

جدول (۶): همبستگی بین بارش و شاخص‌های K، شولتر، CAPE و آب قابل بارش

نمایه آماری / شاخص	شاخص K	شاخص شولتر	انرژی پتانسیل در دسترس	آب قابل بارش
همبستگی پرسون	۰/۱۴۲	-۰/۰۷۱	۰/۱۰۸	۰/۲۰۱
سطح معنی‌داری	۰/۰۰۷	۰/۳۲۶	۰/۴۶۹	۰/۰۰۰۱
معنی‌داری در سطح٪	✓	✗	✗	✓

در جدول (۶)، همبستگی بین بارش تجمعی شش ساعته از ساعت ۰۰ تا ۰۶ گرینویچ با شاخص‌های K، شولتر، CAPE و آب قابل بارش آورده شده است. بیشترین همبستگی مربوط به آب قابل بارش با ۰/۲۰۱ و کمترین آن با -۰/۰۷۱ - مربوط به شاخص شولتر می‌باشد. همان طور که ملاحظه می‌شود همبستگی بین بارش تجمعی شش ساعته با شاخص‌های K و آب قابل بارش مثبت و در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد، ولی در مورد شاخص‌های ناپایداری شولتر و CAPE با توجه به میزان همبستگی و سطح معنی‌داری، نمی‌توان از این شاخص‌ها در تعیین آستانه مناسب جهت بارورسازی ابرها استفاده کرد. به نظر می‌رسد از آنجا که فرآیندهای همروftی غالباً در ساعت بعد از ظهر اتفاق می‌افتد و چون میزان شاخص CAPE که نشان‌دهنده میزان فرآیند همروft می‌باشد در ساعت ۰۰ گرینویچ اندازه‌گیری شده بود که در منطقه مورد مطالعه مصادف با ساعت اولیه صبح می‌باشد، در این ساعت‌ها فرآیند همروft خیلی ضعیف بوده و نقش ضعیفی در بارش‌ها دارد، بنابراین همبستگی

ضعیفی بین این شاخص و میزان بارش شش ساعته مشاهده شده است. با رسم بهترین خط برآشن بین بارش و شاخص‌های گفته شده مشخص شد داده‌ها پراکندگی بسیار بالایی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های اقلیمی انجام شده، اقلیم منطقه مشهد جزء مناطق خشک و نیمه خشک با نیاز آبی بالا طبقه‌بندی می‌شود، بنابراین با توجه به اقلیم و نیاز آبی منطقه بارورسازی ابرها در منطقه لازم به نظر می‌آید (رحمدل، ۱۳۹۱). بنابراین با توجه به شرایط ابرناکی و میزان ابرهای پایین و متوسط و همچنین ابرهای با رشد و توسعه قائم که در فرآیند بارورسازی و بارش دارای اهمیتند بارورسازی ابرها طی فصول زمستان و اوایل بهار در منطقه می‌تواند مفید واقع شود. از بررسی تراز یخنیان 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 می‌باشد. در روزهای بدون بارندگی کمترین دمای پایه ابر مربوط به ماه اکتبر با میانگین 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 نداده است. با استفاده از نتایج حاصل از بررسی‌های فوق پیشنهاد می‌گردد که عملیات بارورسازی ابرها در این منطقه از اوایل 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 آزموده شده و بعد مورد استفاده قرار بگیرد. از بررسی‌ها مشخص شد که در منطقه مشهد همبستگی بین بارش تجمعی شش ساعته با شاخص‌های K و آب قابل بارش مثبت و در سطح ۱ درصد معنی دار می‌باشد ولی در مورد شاخص‌های ناپایداری شولتر و CAPE با توجه به میزان همبستگی و سطح معنی داری، نمی‌توان از این شاخص‌ها در تعیین آستانه مناسب جهت بارورسازی ابرها استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود در مورد شاخص CAPE با توجه به این که فرآیندهای همروف در ساعات بعد از ظهر بیشتر اتفاق می‌افتد و اندازه-گیری این شاخص بنا بر اطلاعات جویالای موجود در اوایل صبح اندازه‌گیری شده و مقادیر بسیار پایینی را نشان می‌دهد، همبستگی میزان این شاخص و بارش (به خصوص بارش‌های رگباری) در ساعات بعد از ظهر مورد مطالعه و بررسی قرار بگیرد. از آنجا که ضریب همبستگی پیرسون رابطه خطی را منعکس می‌کند (رحمیم زاده، ۱۳۹۰)، در مواردی که روابط غیر خطی بین زوج داده‌ها حاکم باشد قادر به برآورد مناسبی از رابطه دو متغیر نیست، بنابراین توصیه می‌شود، 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، ا. (۱۳۷۰). چگونگی باروری ابرها در کویر مرکزی ایران. مجله نیوار، بهار.
۲. امیدوار، ک. (۱۳۸۱). برخی ویژگی‌های اقلیم شناسی ابر در ارتفاعات جنوبی کرمان به منظور ارزیابی امکان اجرای پروژه‌های افزایش بارندگی، علوم انسانی، شماره ۲۷، صفحه ۳۷ تا ۵۰، زمستان.
۳. بداق جمالی، ج. و س. جوانمرد (۱۳۸۲). مفاهیم مقدماتی تعديل آب و هوا با استفاده از فن آوری بارورسازی ابرها، پژوهشکده اقلیم شناسی، مشهد.
۴. پژوهشکده هواشناسی (۱۳۸۱). گزارش نهایی پروژه مطالعات مرتبط با تعديل مصنوعی آب و هوا، گزارش ۶، مراحل امکان‌سنجی بارورسازی ابرها و آزمون آن برای استان خراسان.
۵. حمیدی، ا. (۱۳۹۰). پتانسیل بارورسازی ابرها با استفاده از شاخص‌های ناپایداری برای منطقه مشهد. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.
۶. رحمدل، م. (۱۳۹۱). بررسی خصوصیات فیزیکی ابرها و امکان‌سنجی بارورسازی آن‌ها در منطقه مشهد، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.
۷. رحیم زاده، ف. (۱۳۹۰). روش‌های آماری در مطالعات هواشناسی و اقلیم شناسی. تهران، نشر سیدباقر حسینی.

۸. صادقی حسینی، س. و. م. رضاییان (۱۳۸۵). بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۲.
۹. علیجانی، ب. (۱۳۸۵). آب و هوای ایران، تهران، دانشگاه پیام نور.
۱۰. فلاخ، ر. (۱۳۸۵). چگونگی بارورسازی ابرها. سمینار، دانشگاه یزد.

11. McBride C. (2017). *How the UAE is making it rain, UAE Research Program for Rain Enhancement Science*, First International Research Progress Workshop.
12. Saunders C.P.R., Hosseini A.S. (2001). A laboratory study of the effect of velocity on Hallett-Mossop ice crystal multiplication. *Atmos Res* 59: 3-14.
13. Woodley W., DeFelice T.P., Golden J., Griffith D., Rosenfeld D., Breed D., Solak M., Boe B., (2013). *Extra Area Effects of Cloudseeding - An Updated Assessment*. *Atmospheric Research* doi: 1016/j.atmosres.2013.08.014.
14. 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.
15. Woodley W.L., Rosenfeld. D. (2003). *Results of On-Top Glaciogenic Cloudseeding in Thailand*. Part I. *Journal of applied meteorology*.vol 42,pp 920-938

The feasibility of cloudseeding in Mashhad plain with survey of cloudiness condition and instability indexes

Mmohsen Rahmdel

Eng, Mashad meteorology center

Received: 2016/07

Accepted: 2016/12

Abstract

In this research paid attention to investigate cloudiness in Mashhad plain, based on the meteorological yearbook (1986-2008) that the most frequent overcast occurrence has been shown. Then we studied the prevalence of low and medium height clouds and average of them in each month, from Mashhad synoptic station data during 2001-2010, considering to the importance of medium and low clouds in the cloudseeding process, and was paid to review condition of sky with low clouds. We investigate to the formation of low height clouds with vertical development, including cumulus (type 2) and cumulonimbus, in this region, given the importance of this clouds. The investigation of these cloud formations showed the most cloudiness has been occurred during cold and rainy seasons i.e. winter and early spring. The evaluation of the cloud base temperature and the level of freezing in this region has been done according charts and data of Mashhad station and using skewt with rainfall and without rainfall during 1992-2011. The basis of information has been obtained on the basis of overcast condition and the average of the cloud base temperature. Some instability indexes (K, Showalter, Precipitable water, CAPE) was obtained in rainy days at 00Z, using data of Wyoming university website, during 1992-2011. Then was paid to investigate the correlation between instability index (K Index, Showalter Index, Precipitable water and CAPE Index) with 6 hours rainfall (from 00 to 06 Z). The studies showed a correlation is positive and significant at 1% between precipitable water, K index with cumulative 6-hour precipitation. According to the correlation and significance level, the Sowalter index and CAPE index can't be used in determining the appropriate threshold of cloudseeding. the data showed a very high scattering.

Keywords: Weather modification, K Index, Showalter Index, Precipitable water, CAPE