امکان‌سنجی 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 (۲۰۰۸-۱۹۸۶) 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 (۲۰۱۰-۲۰۰۱) 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 اسکیوتی 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 (۲۰۱۱-۱۹۹۲) 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 K[۵]، شولتر[۶]، آب قابل بارش[۷] و شاخص CAPE[۸] در روزهایی که بارندگی رخ داده بود، در ساعت ۰۰ گرینویچ طی سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۹۲ به دست آمده و 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 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 پراکندگی بالایی را مشخص کردند.

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

مقدمه

در ۱۳ نوامبرسال ۱۹۴۶ وین سنت جی-شیفر حدود ۱۰۵ کیلوگرم از قرص‌های یخ خشک را از یک هواپیمای 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 فندیسین در یک پرواز پرهیاهو از درون هواپیما ماسه را به عنوان هسته انجماد در درون ابر رها 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

[1] نویسنده مسئول: محسن رحمدل mohsen_rahmdel@yahoo.com
[2] Cloud seeding
[۲] Skewt Diagram
[4] http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
[5] K Index
[6] Showalter Index
[7] Precipitable Water Index
[8] Convective Available Potential Energy Index

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

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 درحکم 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، شاخصk برابر ۲۴ درجه سلسیوس و برای شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی برابر با J.kg ۱۰۰ 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، 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، 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[9] 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 تگزاس آمریکا نیز توسعه و آزمایش یک روش جدید برای ارزیابی برنامه بارورسازی ابرها در حال انجام است. اکثر اقدامات پیشرفته‌ای که در زمینه تعدیل 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[10] (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، اژدرکوه 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 جوبالاست.[11]

[9] Bhumibol
[10] National Center of Meteorology and Seismology
[11] http://www.razavimet.gov.ir/Pages.aspx?PageID=44

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

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 اسنادی، آماری، فیزیکی، تحلیلی، سینوپتیکی است. در ابتدا به بررسی ابرناکی منطقه پرداخته شده و ماه‌هایی که در آن بیشینه ابرناکی رخ داده 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 تا۸/۸ ابری) پرداخته شده و بعد از آن تشکیل ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم شامل ابرهای کومه‌ای (کومولوس 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 نرم‌افزارهای اسکیوتی 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 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 LCL[۱۲] در نظر گرفته شده و در مواقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومه‌ای و کومه‌ای بارا، پایه ابر در سطح CCL[۱۳] 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 رخ داده 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 رخ داده بود استخراج گردید. چون اندازه‌گیری‌های ایستگاه جوبالای مشهد در ساعت ۰۰ گرینویچ اندازه‌گیری می‌شود، میزان بارندگی شش ساعته از ساعات 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–فایل‌هایSC DATA- (۲۰۱۰-۲۰۰۱) 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 ساعت۰۰ گرینویچ طی سال‌های ۱۹۹۲تا ۲۰۱۱ به دست آمده و میزان همبستگی هر کدام از آن‌ها با میزان بارندگی ۶ ساعته (از ساعت۰۰ 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). از

[12] Lifting Condensation Level
[13] Convective Condensation Level

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

اطلاعات استخراج شده از سالنامه‌های هواشناسی[14] 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، ژانویه با مجموع ۱۴۷روز 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 ماه-های آگوست 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 تقسیم بندی کرد. در رابطه با طراحی و اجرای طرح‌های باروری و افزایش بارش عمدتا 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 ۱۵۰۰متر تا ارتفاع ۳۳۰۰ متر می‌باشد. در این بخش از تحقیق ابتدا از اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی (۲۰۱۰-۲۰۰۱) 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، ژانویه با میانگین ۲۵/۲ روز، فوریه با میانگین ۲۵/۱روز، مارس با میانگین ۲۸/۸ روز، آوریل با میانگین ۲۷/۸ روز و می با میانگین ۲۸/۵ روز در ماه) رخ داده و کمترین آن در ماه‌های سپتامبر با میانگین ۱۲/۸ روز و آگوست با میانگین ۱۳/۲ روز، اتفاق افتاده است.

بررسی میزان ابرناکی ابرهای پایین

در این قسمت با توجه به اهمیت ابرهای پایین در فرایند بارورسازی، میزان ابرناکی 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
میانگین	نیمه ابری	۱۲/۳	۱۲	۱۳/۷	۱۴/۳	۱۶/۶	۱۰/۲	۷/۶	۴/۳	۵	۹/۲	۹/۶	۱۱/۹
ابرناکی پایین	تمام ابری	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، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می اتفاق افتاده و بیشترین آسمان تمام ابر پایین در ماه‌های دسامبر، ژانویه، 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 می-شوند، گویای شرایط ناپایداری و همرفتی در جو می‌باشند (امیدوار، ۱۳۸۱) (جدول ۲).

جدول(۲): میانگین روزهای همراه با تشکیل ابرهای کومه ای (cu_2) و کومه ای بارا (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	۷/۶	۸/۷	۷/۳

[14] http://www.irimo.ir/farsi/publication/index.aspx

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

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- تا۲۰- درجه سلسیوس می‌شود، چون در این محدوده دمایی، تاثیر هسته‌های یخ‌ساز مصنوعی، بیش از هسته‌های یخ‌ساز طبیعی است و در تاثیرگذاری در فرایند تشکیل 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 اب 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 پایه ابر در سطح LCL در نظر گرفته شده و در مواقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومه‌ای و کومه‌ای بارا، 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 جوبالای 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. بر این اساس اطلاعات جوبالای 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

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

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، ژوییه، آگوست و سپتامبر شرایط تمام ابری جهت اندازه گیری دمای پایه ابر رخ نداده است.

جدول (۴): 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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

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 اسکیوتی 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.

$$K = \left(T_{۸۵۰} - T_{۵۰۰}\right) + Td_{۸۵۰} - (T_{۷۰۰} - Td_{۷۰۰}) \quad (۱)$$

$$SI = T_{۵۰۰} - T' \quad (۲)$$

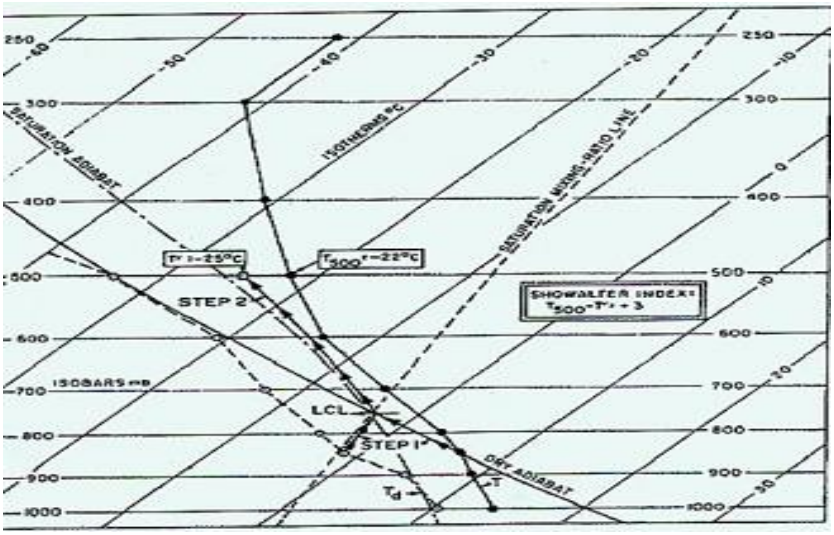
$$CAPE = \int_{Zlfc}^{Zel} Bdz \quad (۳)$$

$$PW = \int_{۰}^{z} \rho_w dz \quad (۴)$$

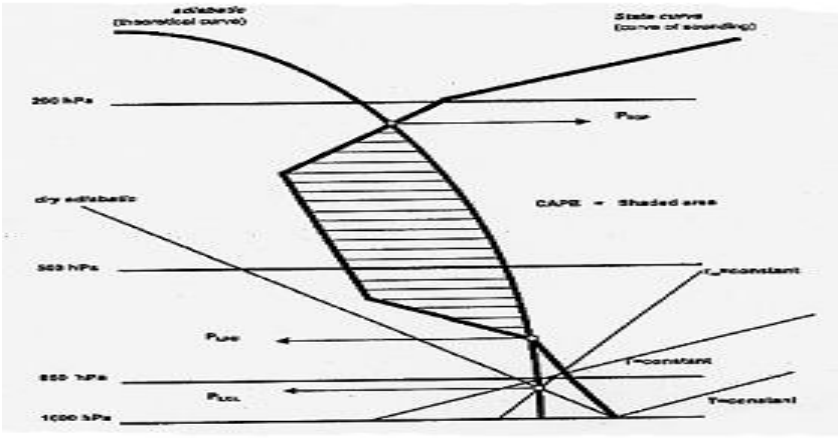
جدول (۵): متغیرهای مورد استفاده در شاخص‌های ناپایداری بالا

$T_{۸۵۰}$: دمای سطح ۸۵۰ میلیباری	T':دمای بی درروی اشباع سطح ۵۰۰ میلیباری
$T_{۵۰۰}$:دمای سطح ۵۰۰میلیباری	Zel:سطح تراز توازن-قله ابر
$Td_{۸۵۰}$: دمای نقطه شبنم در سطح ۸۵۰ میلیباری	$Zlfc$:سطح تراز همرفت آزاد
$Td_{۷۰۰}$: دما در سطح ۷۰۰ میلیباری	B: حداکثر شناوری در واحد جرم
$Td_{۷۰۰}$: دمای نقطه شبنم در سطح ۷۰۰ میلیباری	ρ_w:چگالی بخار آب

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]



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



شکل (۲): محاسبه مقدار انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی به کمک نمودار اسکیوتی

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 پیرسون	۰/۱۴۲	-۰/۰۷۱	۰/۱۰۸	۰/۲۰۱
سطح معنی‌داری	۰/۰۰۷	۰/۳۲۶	۰/۴۶۹	۰/۰۰۰۱
معنی‌داری در سطح ۱٪	✓	×	×	✓

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 ۰/۷۱- 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 وCAPE 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 همرفتی غالبا در ساعات بعد از ظهر اتفاق می‌افتد و چون میزان شاخص CAPE که نشان‌دهنده میزان فرآیند همرفت می‌باشد در ساعت ۰۰ گرینویچ اندازه‌گیری شده بود که در منطقه مورد مطالعه مصادف با ساعات اولیه صبح می‌باشد، در این ساعات غالبا فرآیند همرفت خیلی ضعیف بوده و نقش ضعیفی در بارش‌ها دارد، بنابراین همبستگی

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

ضعیفی بین این شاخص و میزان بارش شش ساعته مشاهده شده است. با رسم بهترین خط برازش 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 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 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 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 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 ۱درصد 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. پیشنهاد می‌شود در مورد شاخص CAPE با توجه به این که فرآیندهای همرفت در ساعات بعد از ظهر بیشتر اتفاق می‌افتد و اندازه-گیری این شاخص بنا بر اطلاعات جوبالای 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 (رحیم 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 تعدیل آب و هوا با استفاده از فن آوری بارورسازی ابرها، پژوهشکدهٔ اقلیم شناسی، مشهد.
۴. پژوهشکده هواشناسی (۱۳۸۱). گزارش نهایی پروژه مطالعات مرتبط با تعدیل 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 ازشاخص‌های 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.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]

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، جلد۳۲، شماره ۲.
۹. علیجانی، ب. (۱۳۸۵). آب وهوای ایران، تهران، دانشگاه پیام نور.
۱۰. فلاح، 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*, Firest 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

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-05-31]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1396.5.1.2.6]