

بررسی و امکان‌سنجی استفاده از فناوری بارورسازی ابرها برای استحصال آب در حوضه‌های آبریز ایران

سهیلا جوانمرد^{۱*}، حمیده دلایی^۲، مجید حبیبی نوخندان^۳

۱ و ۳- عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.

۲- دکترای اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی کشور.

چکیده

با توجه به بحران کم‌آبی و کاهش ریزش‌های جوی در ایران، هدف از این مقاله امکان‌سنجی عملیاتی بارورسازی ابرها جهت استحصال آب در حوضه‌های آبریز ۳۰ گانه کشور است. این مقاله که برگرفته از طرح ملی موسسه تحقیقات آب می‌باشد، به دنبال شناسایی حوضه‌های دارای اولویت و تعیین راهبردهای خردفیزیکی متناسب با هر اقلیم است. به منظور تعیین مکان و زمان مناسب بارورسازی ابرها، داده‌های بلندمدت هواشناسی، تصاویر ماهواره‌ای و ویژگی‌های ترمودینامیکی جو در تمامی حوضه‌های آبریز ایران طی دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۱) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. پتانسیل بارورسازی بر اساس شاخص‌هایی نظیر درجه همگنی، میانگین جمع بارش ماهانه، رژیم بارشی، نسبت بارش جامد به کل بارش، درصد رخداد ابرهای تراز پائین، ابرناکی، آب بارش‌شو، درصد رخداد ابرهای کومه‌ای تراز پائین نوع ۲ و ۳ و محتوای آب مایع ابر (LWC) بر اساس مستندات پی‌اچ‌اچ شماره ۳ انتشارات WMO و بومی‌سازی آن با توجه به اقلیم‌های غالب کشور، محاسبه شده است. نتایج نشان داد که حوضه‌های آبریز شمالی و غربی (به‌ویژه دریاچه ارومیه و ارس) در فصول سرد سال به دلیل ساختار سیستم‌های جبهه‌ای، بالاترین پتانسیل را برای بارورسازی ابرها دارا هستند. در مقابل، حوضه‌های مرکزی و جنوبی با چالش‌های خردفیزیکی و محدودیت پنجره‌های عملیاتی مواجه‌اند. مقایسه نتایج با پژوهش‌های جهانی (مانند مطالعات در چین و استرالیا) نشان‌دهنده انطباق الگوهای بارش‌زایی در حوضه‌های کوهستانی ایران با سیستم‌های مشابه در عرض‌های جغرافیایی میانه است. همچنین بارورسازی ابرها می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی در مدیریت منابع آب ایران نقش ایفا کند، مشروط بر اینکه انتخاب عامل بارورکننده و زمان عملیات دقیقاً منطبق بر ویژگی‌های خردفیزیکی هر حوضه باشد.

کلید واژه‌ها: بارورسازی ابرها، استحصال آب، حوضه‌های آبریز ایران، امکان‌سنجی، خردفیزیک ابر.

مقدمه

تأمین پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران، به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های مدیریتی و زیست محیطی تبدیل شده است. محدودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی، همراه با وقوع خشکسالی‌های متوالی و تغییر اقلیم، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین بارورسازی ابرها برای استحصال آب را بیش از پیش نمایان کرده است (Bartholy et al., 2009). در این میان، تعدیل وضع هوا و به‌طور خاص فناوری بارورسازی ابرها، به عنوان یکی از روش‌های علمی برای افزایش بهره‌وری ابرها و تقویت ریزش‌های جوی، در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است (Vittal Murty and Chaitanya Rayana, 2007).

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، دارای تنوع اقلیمی گسترده‌ای است که هر یک از حوضه‌های آبریز آن ویژگی‌های خردفیزیکی متفاوتی را از منظر پتانسیل بارورسازی نشان می‌دهند. در حالی که در حوضه‌های شمالی و غربی، سیستم‌های جبهه‌ای سرد شرایط مساعدی را برای هسته‌زایی یخ فراهم می‌کنند (Dong et al., 2021)، در مناطق مرکزی و جنوبی، به دلیل غلظت بالای آبروسل‌ها و کمبود رطوبت، فرآیندهای تشکیل بارش با پیچیدگی‌های بیشتری روبرو هستند که نیازمند تحلیل‌های دقیق خردفیزیکی است (Svensmark et al., 2013; Carslaw et al., 2002). بسیاری از کشورها در سراسر جهان عملیات بارورسازی را برای افزایش بارش، کاهش خسارت تگرگ، و پراکنده نمودن مه انجام داده‌اند. از جمله این کشورها آمریکا، کانادا، استرالیا، اسپانیا، نیوزیلند، چین، تایلند، روسیه، فلسطین اشغالی، اردن، آرژانتین و آفریقای جنوبی، مکزیک، ترکیه، یونان، هند و امارات متحده را می‌توان نام برد. در سال ۱۹۹۵ طبق آمار سازمان جهانی هواشناسی، در ۲۶ کشور از سراسر جهان، ۸۴ پروژه در دست اقدام وجود داشت. در سال ۱۹۹۶ سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) ایالات متحده آمریکا، تنها در ۹ ایالت آمریکا، ۴۵ پروژه بارورسازی ابر در حال انجام را ثبت نموده است. در چین نیز از سال ۱۹۵۸ بارورسازی ابر انجام شده است. با این حال، در دهه ۹۰، این فعالیت‌ها در مقیاس بزرگتر و با هماهنگی‌های بیشتری انجام گرفته است (Vittal Murty, Chaitana Rayana, 2007).

افزایش بارش می‌تواند منابع آبی را بهبود بخشد به طوری که در سالهای گذشته از روشهای گوناگونی در جهت افزایش بارش استفاده شده است. به منظور پایین آوردن دمای ابر و تولید بلور یخ، ریان و کینگ (Ryan and King, 1997) از یخ خشک، گو و همکاران (Guo and et al., 2006) از دی اکسید کربن مایع و نیتروژن مایع استفاده کردند. سولیوان و همکاران (Sullivan and et al., 2010) دیدن نقره را به عنوان هسته‌های یخ در ابر بکار بردند. روش‌های زیادی برای تولید دیدن نقره از طریق سوختن ترکیبات متفاوت وجود دارد (Blair and et al., 1973; Liu and et al., 2011). یون‌ها روی ابرهای گرم و سرد اثرگذار هستند و می‌توانند مقدار بارش را افزایش دهند (Tzur, I. and Levin, Z., 1981). بارورسازی ابر در چین طی سالهای گذشته رشد زیادی داشته است به طوری که این کار توسط هواپیما، مولدهای زمینی و پرتاب راکت به صورت ساکن و متحرک انجام میشود (Guo and at al., 2015). در تحقیقات آزمایشگاهی یکی از روش‌های تولید یون استفاده از لامپهای UV مطرح شده است (Enghoff and et al., 2011; Svensmark and et al., 2013). همچنین ارتباط یونها با رشد بلورهای برف، مورد بررسی قرار گرفته است (Finnegan and ae at., 1991). دانگ و همکاران (Dong et al., 2021) تاثیر فرآیند بارورسازی ابرها بر مقدار بارش در منطقه شیجیانگ چین را برای بیست و یکمین روز از ماه نوامبر ۲۰۲۰ با استفاده از سایت‌های زمینی، مشاهده‌های هواپیمایی و مطالعات بدست آمده از روش‌های سنجش از دور را مورد ارزیابی قرار دادند، نتایج حاصل از مشاهده‌های هواپیمایی افزایش معنی دار تراکم و تعداد ذرات یخی، کاهش تراکم و تعداد ذرات آب، بازتاب بیشتر امواج رادار در سایت‌های زمینی، کاهش بازتاب ابر در مشاهده‌های سنجش از دور را نشان دادند. کالکارنی و همکاران (Kulkarni and et al., 2018) فرآیند بارورسازی ابرها را در طی بیست و یکمین روز از ماه اوت تا هفتمین روز از ماه نوامبر سال ۲۰۱۷ در منطقه کارانتاکا هند مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار بارندگی پس از ۴ ساعت از فرآیند بارورسازی در تمامی ایستگاهها به طور میانگین ۹/۲۷٪ افزایش داشت.

با توجه به استقرار بخش وسیعی از ایران در مناطق خشک و نیمه خشک و تشدید بحران کم‌آبی در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین بارورسازی ابرها جهت

استحصال آب و تعدیل وضع هوا به یک ضرورت استراتژیک تبدیل شده است. بررسی تجربیات موفق جهانی، مانند پروژه‌های گسترده در چین (Guo et al., 2015) استرالیا (Ryan and King, 1997)، نشان داده است که موفقیت در بارورسازی ابرها بیش از هر چیز به شناخت دقیق ویژگی‌های فیزیکی ابرها در هر منطقه بستگی دارد. لذا، با توجه به نیاز مبرم حوضه‌های آبریز ایران به مدیریت یکپارچه منابع آب، انجام یک مطالعه جامع برای ارزیابی توان بارش‌زایی توده‌های هوا ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه بارورسازی ابرها پتانسیل بالایی برای افزایش منابع آبی دارد، اما موفقیت آن مستلزم شناسایی دقیق پتانسیل‌های جوی و تعیین زمان و مکان بهینه برای عملیات است تا از اتلاف منابع مالی و فنی جلوگیری شود. مطالعه حاضر از این جهت ضرورت دارد که با تکیه بر آمار بلندمدت ۳۰ ساله و بومی‌سازی استانداردهای جهانی (PEP No.3)، یک نقشه راه علمی برای اولویت‌بندی حوضه‌های آبریز سی‌گانه کشور ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های کلان در مدیریت منابع آب غیرمعارف قرار گیرد.

در ادامه به معرفی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه و تشریح پایگاه‌های داده‌ای و آماری مورد استفاده (شامل داده‌های ایستگاهی و شبکه‌بندی شده CFSR در بخش دوم مقاله پرداخته می‌شود. در بخش سوم، روش‌شناسی تحقیق شامل معیارهای نه‌گانه امتیازدهی (از جمله آب بارش‌شو، محتوای آب مایع، نوع ابرها و غیره) و نحوه وزن‌دهی به هر یک از پارامترها توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم، نتایج حاصل از تحلیل‌های زمانی و مکانی ارائه شده و اولویت‌بندی حوضه‌های آبریز بر اساس امتیازات کسب شده در ماه‌های مختلف سال مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، در بخش پنجم، ضمن جمع‌بندی یافته‌های کلیدی، پیشنهادات اجرایی و کاربردی برای بهینه‌سازی عملیات بارورسازی ابرها در ایران ارائه خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این مقاله سعی شده است از دستورالعمل‌های عمومی که از برنامه‌ریزی ماهرانه گزارش‌های پروژه افزایش بارش سازمان جهانی هواشناسی (WMO-PEP) به دست می‌آیند و براساس بررسی‌های اقلیمی ابرها، بارش و شرایط همدیدی باران‌زایی، در طراحی مناسب پروژه‌های افزایش بارش کمک گرفته شود.

همچنین به منظور دستیابی به نتیجه بهینه عملیات بارورسازی ابرها در کشور، طبقه‌بندی پتانسیل بارورسازی ابرها به منظور استحصال آب در حوضه‌های آبریز ۳۰ گانه کشور انجام می‌گردد. دستورالعمل تدوین این طبقه‌بندی بر مبنای استفاده از مستنداتی چون PEP شماره ۳ با روش عینی امتیازدهی به هر یک از مؤلفه‌های تأثیرگذار در پتانسیل بارورسازی ابرها و وزن هر یک از آنها مطابق (جدول‌های ۱ و ۲) تهیه گردیده است. لازم به ذکر است که مؤلفه‌های تأثیرگذار، و آستانه‌ها، و وزن آنها با توجه به اقلیم ایران بومی شده است. این ۹ مؤلفه‌ها شامل درجه همگنی، میانگین جمع بارش ماهانه، رژیم بارشی، نسبت بارش جامد به کل بارش، درصد رخداد ابرهای تراز پائین، ابرناکی، آب بارش‌شو، درصد رخداد ابرهای کومه‌ای تراز پائین نوع ۲ و ۳ و محتوای آب مایع ابر می‌باشند. بطوریکه رژیم بارشی، درصد میزان ابری و نیمه‌ابری و محتوای آب مایع ابر بیشترین وزن با وزن ۳ و درجه همگنی کمترین وزن با وزن یک را دارا می‌باشند.

روش عینی امتیازدهی مؤلفه‌های فوق‌الذکر در جدول ۱ ارائه شده است و وزن هر یک از مؤلفه‌ها نیز در جدول ۲ ارائه گردیده است. توضیحات کامل هر یک از مؤلفه‌های فوق همراه با جداول و نقشه‌های مربوط در ادامه به ترتیب ارائه شده است. در نهایت با توجه به امتیازات کسب شده در هریک از حوضه‌های آبریز کشور برای تمام ماه‌ها، نتایج هم در قالب جدول و هم به صورت نقشه به صورت کاملاً مجزا و طبقه‌بندی شده تنظیم شده است. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور استفاده شده است. در بررسی آب بارش‌شو و آب محتوای ابر و هم با توجه به بضاعت و محدودیت داده‌های موجود در کشور از داده‌های CFSR با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه استفاده شده است.

میزان همگنی منطقه مورد مطالعه

برای تعیین درجه همگنی شامل سطح هموار، پستی و بلندی، تپه‌ای، کوهستانی در حوضه‌های آبریز ۳۰ گانه کشور، از لایه اطلاعاتی منحنی‌های میزان با دقت ۸۵ متر در محیط GIS جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی ارتفاعی کشور، استخراج نقشه میزان شیب با استفاده از لایه رستری اراضی نگاری استفاده شده است. سپس با استفاده از ردیف ۱ جدول ۱ برای امتیازدهی به حوضه‌های آبریز مختلف کشور و در نهایت تعیین امتیاز هر حوضه از ۰ تا

۵ (کمترین تا بیشترین درجه همگنی) انجام شده است. لازم به ذکر است که امتیاز این با پارامتر با مضرب ۱ و حداکثر ۵ محاسبه شده است (جدول ۲).

جدول ۱- روش عینی امتیازدهی به مؤلفه‌های تأثیرگذار در پتانسیل بارورسازی ابرها

ردیف	مؤلفه‌های تأثیرگذار در پتانسیل بارورسازی ابرها	امتیاز				
		۰	۱	۲	۳	۴
۱	درجه همگنی f-سطح هموار u-پستی و بلندی h-تپه m-کوهستان	f+u+h+m f+u+m f+m f+h+m	m f+u+h u+m u+h+m	h+m f+h m	u+h	h
۲	میانگین بارش ماهانه (سانتی‌متر)	$1 \geq$ $10 \leq$	۲-۱ ۱۰-۹	۳-۲ ۹-۸	۴-۳ ۸-۷	۵-۴ ۷-۶
۳	رژیم بارشی a-کوهساری b-همرفتی c-جبهه‌های فراحاره‌ای d-چرخندهای حاره‌ای e-موسمی f-حاره‌ای	a(گرم) b(گرم)	d	a(سرد)	b(سرد) a+b e f	c+b+a
۴	درصد نسبت بارش جامد به کل بارش	$60 >$	۷۰-۶۰	۸۰-۷۰	۸۵-۸۰	۹۰-۸۵
۵	درصد رخداد ابرهای تراز پائین	۲۰-۰	۴۰-۲۰	۵۰-۴۰	۶۰-۵۰	۸۰-۶۰
۶	درصد میزان ابرناکی	۳۰-۰	۴۰-۳۰	۵۰-۴۰	۶۰-۵۰	۷۰-۶۰
۷	میزان آب بارش شو (میلی‌متر)	۱۰-۵	۱۵-۱۰	۲۵-۱۵	۳۰-۲۵	۴۰-۳۰
۸	درصد رخداد ابرهای کومه ای (نوع ۲ و ۳)	۵-۰	۱۰-۵	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰
۹	محتوای آب مایع ابر (کیلوگرم بر متر مربع)	۰-۰/۰۰۵	۰-۰/۰۵ ۰/۰۰۵	۰-۰/۱ ۰/۰۵	۰-۰/۱۵ ۰/۱	۰-۰/۲ ۰/۱۵

جدول ۲- وزن یا ضریب هر یک از مؤلفه‌های تأثیرگذار در پتانسیل بارورسازی ابرها

ردیف	مؤلفه‌های تأثیرگذار در پتانسیل بارورسازی ابرها	امتیاز	ضریب
۱	درجه همگنی	۵	۱
۲	بارش ماهانه هر حوضه (سانتی‌متر)	۱۰	۲
۳	رژیم بارشی	۱۵	۳
۴	نسبت بارش جامد به کل بارش	۱۰	۲
۵	درصد میزان رخداد ابرهای پائین	۱۰	۲
۶	درصد میزان ابری و نیمه ابری	۱۵	۳
۷	میزان آب بارش شو (میلی‌متر)	۱۰	۲
۸	درصد رخداد ابرهای کومه ای (نوع ۲ و ۳)	۱۰	۲
۹	محتوای آب مایع ابر (کیلوگرم بر متر مربع)	۱۵	۳

بررسی میانگین بارش ماهانه

داده‌های مورد استفاده جهت بررسی بارش ماهانه حوضه‌های آبریز ایران، دربرگیرنده داده‌های بارش روزانه ۴۴۴ ایستگاه شامل ۲۸۴ ایستگاه باران‌سنجی، ۹۰ ایستگاه اقلیم‌شناسی و ۷۰ ایستگاه همدیدی طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰) می‌باشد. سپس با استفاده از این داده‌ها میانگین جمع بارش ماهانه در هر ایستگاه تعیین گردید. جهت تعیین مساحت هر ایستگاه، از روش شبکه‌بندی تیسن در نرم افزار Arc GIS استفاده شد. سپس با داشتن پارامترهای مورد نیاز مقدار میانگین جمع بارش ماهانه هر حوضه آبریز برحسب سانتی‌متر محاسبه گردید. جهت امتیازدهی به این پارامتر ابا ابتکار و

نوآوری اعمال شده و محدوده داده‌های اقلیمی ایران بومی سازی شده است. به طوری که برای مقادیر کم، امتیاز کم تعلق گرفته و مابین آنها هر چه بارش افزایش یافته، امتیاز افزایش یافته است ولی از عدد ۱۰ به بعد روند کاهش داشته است. در جاهایی با بارش کم، به این مفهوم است که آن منطقه پتانسیل بارش را نداشته است و در مناطقی با بارش زیاد دیگر نیازی به بارورسازی ابرها وجود ندارد. تعیین آستانه ۶ سانتی متر بارش بر اساس میزان بارش ایران در نظر گرفته شده است (جدول ۳). با توجه به اهمیت کمیت بارش ماهانه منطقه مورد مطالعه جهت امکان‌سنجی بارورسازی ابرها، امتیاز این پارامتر با مضرب ۲ و حداکثر ۱۰ محاسبه می‌شود (جدول ۲).

جدول ۳- روش عینی امتیازدهی به میانگین جمع بارش ماهانه

رتیف	میانگین جمع بارش ماهانه (سانتی‌متر)	امتیاز
۱	$1 \leq 10$	۰
۲	۲-۱ یا ۹-۱۰	۱
۳	۳-۲ یا ۸-۹	۲
۴	۴-۳ یا ۷-۸	۳
۵	۵-۴ یا ۶-۷	۴
۶	۶-۵	۵

بررسی رژیم بارشی ماهانه

در این بخش رژیم‌های بارشی به صورت بارش‌های کوهساری (a)، همرفتی (b)، جبهه‌ای (c)، چرخند حاره‌ای (d)، موسمی (e) و استوایی (f) طبقه‌بندی شده‌اند و با توجه به رژیم بارشی هر حوضه آبریز بر اساس جدول ۱ امتیازبندی شده است. با توجه به اهمیت نقش این کمیت در پتانسیل بارورسازی ابرها امتیاز این پارامتر با مضرب ۳ و حداکثر ۱۵ محاسبه می‌شود (جدول ۲).

بررسی میانگین ماهانه درصد نسبت بارش برف به کل بارش

در این بخش مطابق جدول ۴ حوضه‌های مختلف امتیازبندی گردید و حوضه‌هایی که بیش‌ترین نسبت بارش برف به کل بارش را داشتند بیش‌ترین امتیاز و در مقابل حوضه‌های با درصد پایین‌تر امتیاز کمتری دریافت کردند، با توجه به دامنه تغییرات این پارامتر از صفر تا ۶۰/۴۰ درصد، روش عینی

امتیازدهی به پارامتر درصد نسبت بارش جامد به کل بارش مطابق جدول ۴ آورده شده است. هم‌چنین با توجه به اهمیت این کمیت در برآورد پتانسیل بارورسازی ابرها امتیاز این پارامتر با مضرب ۲ و حداکثر ۱۰ محاسبه می‌شود (جدول ۲).

بررسی میانگین ماهانه درصد میزان رخداد ابر پایین در طول روز

در این بخش با استفاده از روش هاوارد یعنی همان طبقه‌بندی ابر بر اساس ارتفاع کف ابر، درصد میزان رخداد ابر پایین در حوضه‌های مختلف طبقه بندی گردید. حوضه‌هایی که بیشترین درصد رخداد را داشتند، بیشترین امتیاز و در مقابل حوضه‌های با درصد رخداد پایین امتیاز کمتری دریافت کردند. میانگین مقدار و امتیاز ماهانه رخداد ابر پایین در جدول ۵ آورده شده است. در محاسبه درصد میزان رخداد ابر پائین در طول روز از ابرهای استراتوکومولوس، استراتوس، کومولوس و کومولونیمبوس استفاده شده است.

بررسی میانگین ماهانه درصد میزان ابرناکی (ابری و نیمه ابری)

یکی از دیگر معیارها جهت تعیین مناسب یا نامناسب بودن عملیات بارورسازی ابرها در یک حوضه آبریز، بررسی میزان ابرناکی در آن حوضه می باشد. میزان ابرناکی از لحاظ درصد ابرناکی به سه گروه شامل صاف تا کمی ابری، نیمه ابری، و تمام ابری مطابق جدول تقسیم می شود. در جدول ۶ طبقه بندی میزان ابرناکی که شامل آسمان تمام ابری و نیمه ابری می باشد نشان داده شده است. همچنین شایان گفتنی است که با توجه به اهمیت این کمیت در تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها، امتیاز این پارامتر با مضرب ۲ و حداکثر ۱۰ محاسبه می شود (جدول ۲).

بررسی میانگین ماهانه میزان آب بارش شو

در این بخش میانگین ۳۰ ساله میزان آب بارش شو کل جو، از داده های شبکه بندی شده با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه ی سیستم باز تحلیل پیش بینی اقلیمی CFSR مرکز ملی پیش بینی محیطی (NCEP) طی دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰ استخراج گردیده است. با توجه به دامنه تغییرات این پارامتر در ماه های مختلف سال از ۵ تا ۴۰ میلی متر، طبقه بندی میزان آب بارش شو، مطابق جدول ۸ تنظیم شده است. با توجه به اهمیت این پارامتر در تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها، امتیاز این پارامتر با مضرب ۲ و حداکثر ۱۰ محاسبه می شود (جدول ۲).

جدول ۴- روش عینی امتیازدهی به پارامتر درصد نسبت بارش جامد به کل بارش

ردیف	درصد نسبت بارش جامد به کل بارش	امتیاز
۱	۰-۱۰	۰
۲	۱۰-۲۰	۱
۳	۲۰-۳۰	۲
۴	۳۰-۴۰	۳
۵	۴۰-۵۰	۴
۶	۵۰ >	۵

جدول ۵- روش عینی امتیازدهی به میزان رخداد ابر پایین

ردیف	درصد رخداد ابر پایین	امتیاز
۱	۰-۳۰	۰
۲	۳۰-۴۰	۱
۳	۴۰-۵۰	۲
۴	۵۰-۶۰	۳
۵	۶۰-۷۰	۴
۶	۷۰-۱۰۰	۵

جدول ۶- تعریف میزان ابرناکی

شرح	مقدار ابرناکی
صاف تا کمی ابری	$\frac{0-2}{8}$
نیمه ابری	$\frac{3-6}{8}$
تمام ابری	$\frac{6-8}{8}$

جدول ۷- روش عینی امتیازدهی برای درصد میزان تمام ابری و نیمه ابری

ردیف	درصد ابرناکی (میزان تمام ابری + نیمه ابری)	امتیاز
۱	۰-۳۰	۰
۲	۳۰-۴۰	۱
۳	۴۰-۵۰	۲
۴	۵۰-۶۰	۳
۵	۶۰-۷۰	۴
۶	۷۰ >	۵

جدول ۸- روش عینی امتیازدهی برای آب بارش شو

ردیف	آب بارش شو (میلی‌متر)	امتیاز
۱	۵-۱۰	۰
۲	۱۰-۱۵	۱
۳	۱۵-۲۵	۲
۴	۲۵-۳۰	۳
۵	۳۰-۴۰	۴
۶	۴۰-۴۵	۵

بررسی درصد میانگین ماهانه رخداد ابرهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ یکی دیگر از معیارهای مهم جهت تعیین مناسب یا نامناسب بودن عملیات بارورسازی ابرها در یک حوضه آبریز، بررسی میزان ابرهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ در آن حوضه می‌باشد. در این بخش از داده‌های دیده بانی ابر در ۷۰ ایستگاه همدیدی سراسر کشور که دارای آمار ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۱) بوده اند،

برای تعیین فراوانی ابرهای کومولوس نوع ۲، کومولونیمبوس نوع ۳ استفاده شده است. مهم‌ترین ابرهای مناسب بارورسازی، ابرهای کومولوس نوع ۲، کومولونیمبوس نوع ۳ هستند. بنابراین در این بخش با تعیین فراوانی هر یک از این ابرها در مناطق مختلف ایران، مناطق مستعد و مناطق غیر مستعد برای بارورسازی مشخص شدند.

جدول ۹- روش عینی امتیازدهی درصد رخداد ابرهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳

ردیف	درصد رخداد ابرهای کومه‌ای (نوع ۲ و ۳)	امتیاز
۱	۰-۵	۰
۲	۵-۱۰	۱
۳	۱۰-۲۰	۲
۴	۲۰-۳۰	۳
۵	۳۰-۴۰	۴
۶	۴۰ >	۵

جدول ۹ روش عینی امتیازدهی به هر حوضه برای میزان ابرهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ جهت مطلوب بودن یا نبودن اجرای بارورسازی ابرها را نشان می‌دهد. با استفاده از این جدول به هر حوضه آبریز ایران بر مبنای نوع ابرهای کومه‌ای آنها امتیاز داده شده است، در محاسبه این پارامتر از ابرهای

آلتواستراتوس و نیمبواستراتوس استفاده نشده است زیرا آلتواستراتوس جزء ابرهای میانی می‌باشد و ابر نیمبو استراتوس ابر باران‌زا بوده و نیازی به بارورسازی ندارد. با توجه به اینکه دامنه تغییرات درصد رخداد ابرهای کومه‌ای در ماه‌های مختلف سال از صفر تا ۶۱ درصد متغیر است، طبقه

دسترسی به داده های با تفکیک پایین تر از داده های نیم درجه استفاده شده است.

سپس جهت بررسی تغییرات این مؤلفه، داده های مربوطه از نرم افزار GrADS بصورت خطوط کنتور (منحنی های هم ارزش) وارد محیط نرم افزار GIS شدند. در مرحله بعد هر یک از ماه های سال تفکیک و مورد پردازش قرار گرفتند. با توجه به ارزش های ماهانه و پراکندگی آن ها در سطح کشور و دامنه تغییرات محتوای آب مایع ابر در ماه های مختلف سال از صفر تا ۰/۳ این پارامتر مطابق جدول طبقه بندی و امتیاز-دهی شده است. با توجه به اهمیت این پارامتر در تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها، امتیاز آن با مضرب ۳ و حداکثر ۱۵ محاسبه می گردد (جدول ۲).

بندی این پارامتر مطابق جدول ۹ انجام شده است. با توجه به اهمیت این پارامتر در تعیین پتانسیل بارورسازی ابرها، امتیاز این پارامتر با مضرب ۲ و حداکثر ۱۰ محاسبه می شود (جدول ۲).

بررسی میانگین ماهانه میزان محتوای آب مایع ابر

در این بخش میانگین ۳۰ ساله میزان محتوای آب مایع ابر از داده های شبکه بندی شده با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه سیستم باز تحلیل پیش بینی اقلیمی CFSR، مرکز ملی پیش-بینی محیطی (NCEP) طی دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰ استخراج گردیده است. به دلیل محدودیت داده و عدم

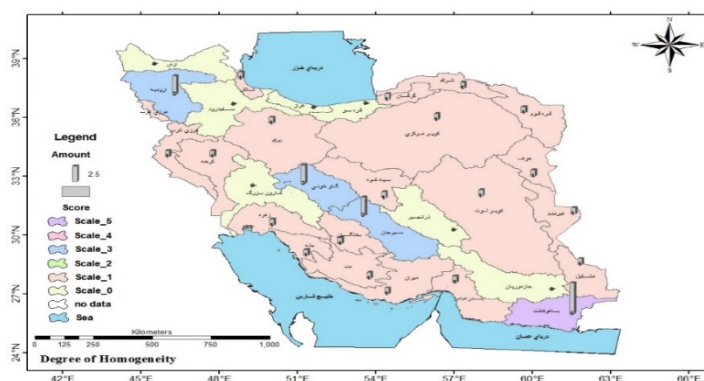
جدول ۱۰- روش عینی امتیازدهی به میزان آب مایع ابر

امتیاز	محتوای آب مایع ابر (کیلوگرم بر متر مربع)	ردیف
۰	۰-۰/۰۰۵	۱
۱	۰/۰۰۵-۰/۰۵	۲
۲	۰/۰۵-۰/۱	۳
۳	۰/۱-۰/۱۵	۴
۴	۰/۱۵-۰/۲	۵
۵	۰/۲-۰/۳	۶

باهوکلات بالاترین امتیاز را داشته اند و پس از آن تمامی حوضه های شمال شرق، شرق، شامل اترک، قره قوم، گرگان، کویر مرکزی، کویر لوت، خواف، هیرمند، مشکیل، و حوض های بخشی از نواحی مرکزی مانند نمک، و سیاه کوه، و حوضه های بیشتر نواحی جنوبی، و غربی امتیاز متوسط داشته اند.

نتایج و بحث

شکل (۱) امتیاز حوضه های آبریز کشور براساس میزان همگنی مطابق جدول (۱) را نشان می دهد. با توجه به جدول امتیاز سطوح هموار و با پستی و بلندی بیشترین امتیاز (۵) تعلق گرفته است. لذا از نقطه نظر همگنی منطقه به منظور بارورسازی ابرها، حوضه های ارومیه، گاوخونی، سیرجان، و

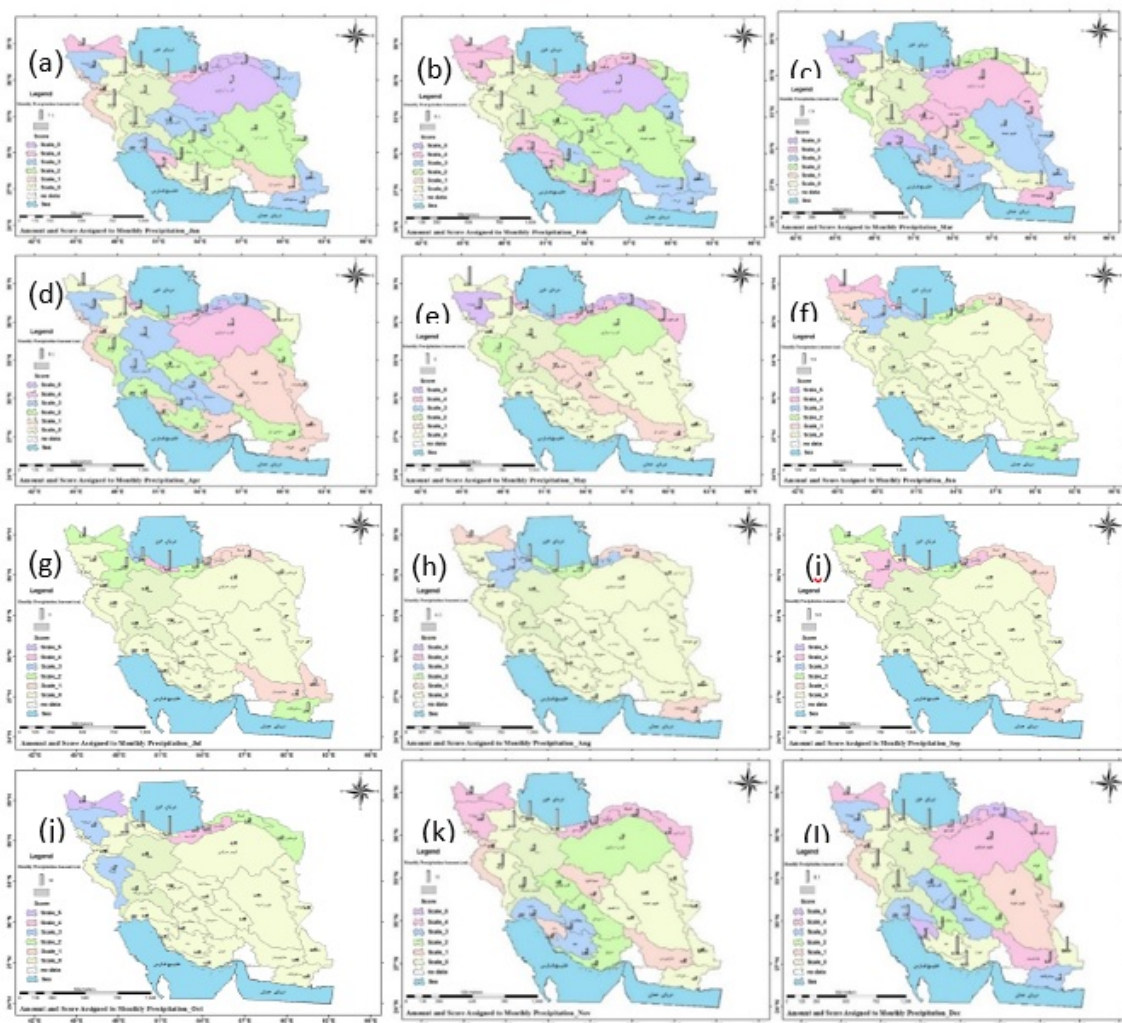


شکل ۱- امتیاز حوضه های آبریز کشور را براساس میزان همگنی

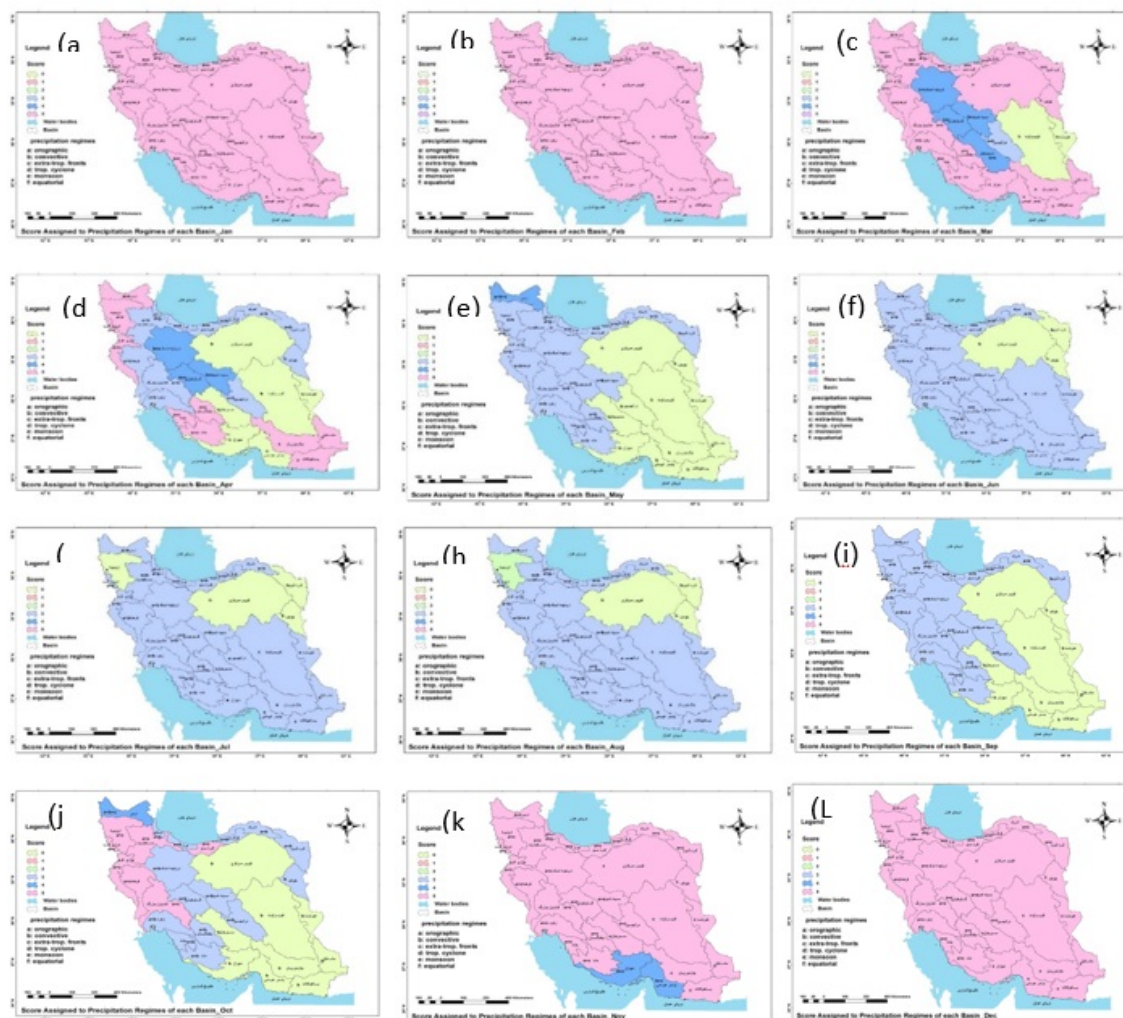
شکل ۲ میانگین جمع بارش ماهانه (cm) و امتیاز حوضه‌های آبریز ایران با توجه به جداول ۱ و ۲ طی دوره آماری ۳۰ ساله در ۱۲ ماه سال را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در ژانویه حوضه‌های دریاچه نمک، کویر مرکزی، اترک و گرگان مستعدترین حوضه‌ها جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها هستند. حوضه‌های ارس، قره‌سو و حله نیز در مرتبه دوم و مناسب برای اجرای عملیات هستند. در ماه فوریه حوضه‌های دریاچه نمک و کویر مرکزی مستعدترین حوضه‌ها جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها هستند. حوضه‌های ارس، قره‌سو، ارومیه، زهره، حله، مهران، اترک و گرگان نیز در مرتبه دوم جهت اجرای عملیات هستند. حوضه‌های بختگان، خواف، مشکیل، جازموریان و باهوکلات برای اجرای عملیات بارورسازی ابرها در ماه فوریه در مرتبه سوم قرار دارند. با توجه به امتیاز در نظر گرفته شده برحسب مقدار بارش ماهانه می‌توان گفت که در ماه مارس، حوضه‌های ارومیه، قره‌سو و زهره مستعدترین حوضه‌ها جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها هستند، حوضه‌های گاوخونی، سیاه کوه، کویر مرکزی، خواف و باهوکلات نیز در مرتبه دوم جهت اجرای عملیات هستند. در ماه آوریل حوضه گرگان مستعدترین حوضه جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشد. حوضه‌های کویر مرکزی، قره‌سو و تالش در مرتبه دوم جهت مناسب بودن اجرای عملیات هستند. حوضه‌های اترک و ارومیه در ماه می مستعدترین حوضه جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشند، حوضه‌های گرگان، قره‌سو، تالش و قره‌قوم در مرتبه دوم مناسب بودن اجرای عملیات هستند، حوضه دریاچه نمک از نظر مناسب بودن در مرتبه سوم قرار دارد. در ماه ژوئن حوضه‌های ارس و تالش در این ماه دارای بالاترین امتیاز و حوضه‌های هراز و سفیدرود در مرتبه دوم جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشند. در ماه ژوئیه حوضه هراز در این ماه بالاترین رتبه و حوضه تالش در رتبه دوم در انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشند. در ماه اوت حوضه سفیدرود، تالش و گرگان دارای امتیاز ۳ جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشند. حوضه‌های قره‌سو و هراز از نظر مناسب بودن دارای امتیاز ۲ می‌باشد. در ماه سپتامبر حوضه سفیدرود و گرگان دارای امتیاز ۴ و حوضه‌های قره‌سو و ارس از نظر مناسب بودن دارای امتیاز ۲ می‌باشد. در ماه اکتبر

حوضه‌های قره‌سو و گرگان دارای امتیاز ۴ و حوضه‌های ارومیه و کرخه دارای امتیاز ۳ جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشند. حوضه دریاچه نمک در ماه نوامبر مستعدترین حوضه جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشد. حوضه‌های ارس، ارومیه، قره‌سو، گرگان، اترک و قره‌قوم در مرتبه دوم جهت مناسب بودن اجرای عملیات هستند. در ماه دسامبر حوضه‌های دریاچه نمک، حله و اترک مستعدترین حوضه جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می‌باشند.

شکل ۳ بررسی کمی رژیم بارشی ایران را در طی ماه‌های سال نشان می‌دهد همان گونه که نشان داده شده است مهم‌ترین توده‌های هوایی که در فصول سرد سال کشور را تحت نفوذ خود قرار می‌دهند بطور عمده سامانه کم فشار مدیترانه-ای از جانب غرب، قطبی قاره‌ای و قطبی شمالی از سمت شمال غرب و شمال، قطبی بحری از شمال غرب بوده و در تابستان قاره‌ای از منشأ کویر ایران یا صحرای عربستان و یا جریانات شمال غربی از اروپای مرکزی می‌باشد. غلبه نادر توده هوای دریایی حاره‌ای (گرم و مرطوب) در تابستان‌ها از سمت شمال غرب نیز بصورت اتفاقی گزارش شده است. در سال‌هایی که مرکز کم فشار سودانی دارای فعالیت شدید باشد، دامنه فعالیت سامانه‌های بارش‌زای آن ممکن است از جنوب غرب و جنوب کشور به بخش‌های مرکزی کشور و حتی به عرض‌های بالاتر هم توسعه یابد. دو نمونه از مهم‌ترین سامانه‌های تأثیرگذار بر روی ایران مرکز کم فشار مدیترانه‌ای و مرکز پرفشار سیبری می‌باشند.



شکل ۲- میانگین جمع بارش ماهانه (cm) و امتیاز حوضه های آبریز ایران در طی ۱۲ ماه طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰). (a) ژانویه، (b) فوریه، (c) مارس، (d) آوریل، (e) می، (f) ژوئن، (g) ژوئیه، (h) اوت، (i) سپتامبر، (j) اکتبر، (k) نوامبر، و (l) دسامبر.



شکل ۳- بررسی کمی رژیم بارشی حوضه های آبریز ایران در ۱۲ ماه سال طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰). (a) ژانویه، (b) فوریه، (c) مارس، (d) آوریل، (e) می، (f) ژوئن، (g) ژوئیه، (h) اوت، (i) سپتامبر، (j) اکتبر، (k) نوامبر، و (L) دسامبر.

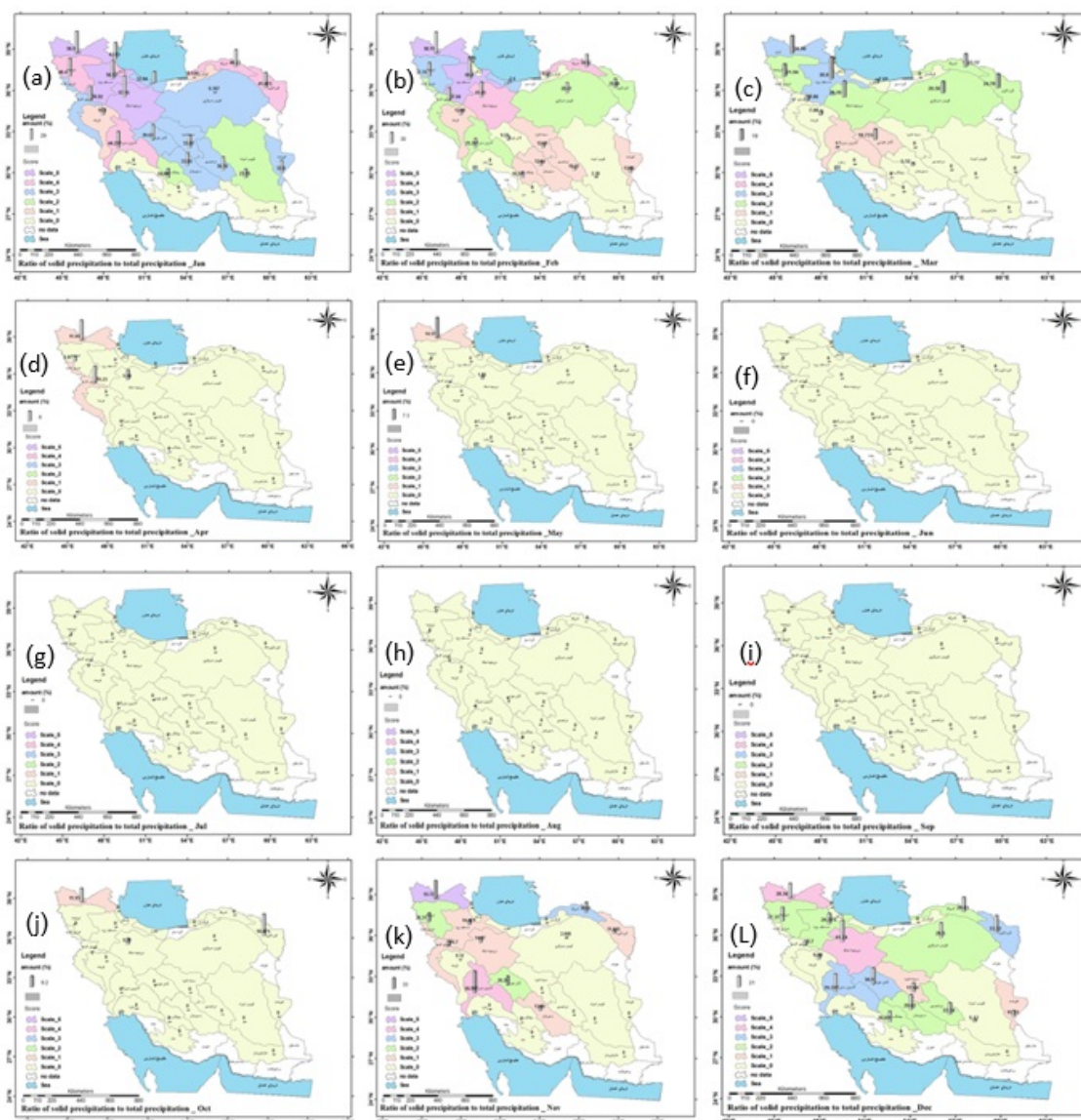
جاذموریان با مقدار صفر کمترین امتیاز و حوضه سفیدرود با مقدار عددی ۶۰/۴۰ و بعد از آن حوضه های ارس و دریاچه نمک به ترتیب با مقادیر ۵۸/۱۵ و ۴۱/۴۵ درصد بیشترین امتیاز را کسب کرده اند. در ماه مارس بجز حوضه های سفیدرود، ارس، قره قوم، اترک، ارومیه و کویر مرکزی بقیه حوضه ها درصد بارش جامد به کل بارش آن ها زیر ۲۰ درصد بوده است. در ماه آوریل به استثنای دو حوضه ارس با مقدار ۱۱/۹۶ و مرزی غرب با مقدار ۱۰/۲۳ درصد بقیه حوضه ها هیچ بارش برفی را در میانگین ماهانه ۳۰ ساله نداشته اند. درصد بارش برف به کل بارش در ماه های ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر تمامی حوضه های سطح کشور صفر بوده و اگر بارشی هم صورت گرفته به شکل باران بوده است، بنابراین در کل کشور از نظر این شاخص، در ماه های ذکر شده در

با توجه به بررسی های انجام شده که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است، از داده های برف ۳۰ حوضه آبریز در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰) هیچ حوضه ای یافت نشد که در مقیاس ماهانه صد درصد بارش آن به صورت برف باشد ولی در عوض به وفور می توان نقاطی را یافت که در مقیاس ماهانه درصد مقدار برف به کل بارش آن صفر باشد به عنوان مثال حوضه زهره و هیرمند در اکثر ماه های سال بارش برف آن ها صفر بوده است.

در ماه ژانویه درصد بارش برف به کل بارش از مقدار صفر در حوضه های زهره، مند و جازموریان تا مقادیر بالای ۵۰ درصد در حوضه های ارس، دریاچه نمک و سفیدرود متغیر است. در ماه فوریه برای اکثر حوضه ها نسبت به ماه ژانویه کاهش یافته است و هم چنان حوضه های زهره، مند و

مایع بوده است در بقیه حوضه‌ها بارش به صورت هر دو نوع جامد و مایع بوده است. حوضه دریاچه نمک با $41/74\%$ درصد دارای بیشترین امتیاز برای بارورسازی در ماه دسامبر بر اساس شاخص درصد بارش جامد به کل بارش می‌باشد.

هیچ‌کدام از حوضه‌های ۳۰ گانه قابلیت بارورسازی را ندارند. با شروع فصل پائیز درصد بارش برف در حوضه‌ها رو به افزایش می‌رود. در ماه دسامبر، بجز حوضه‌های هراز، تالش، مند، زهره، گرگان و جازموریان که تقریباً کل بارش به صورت



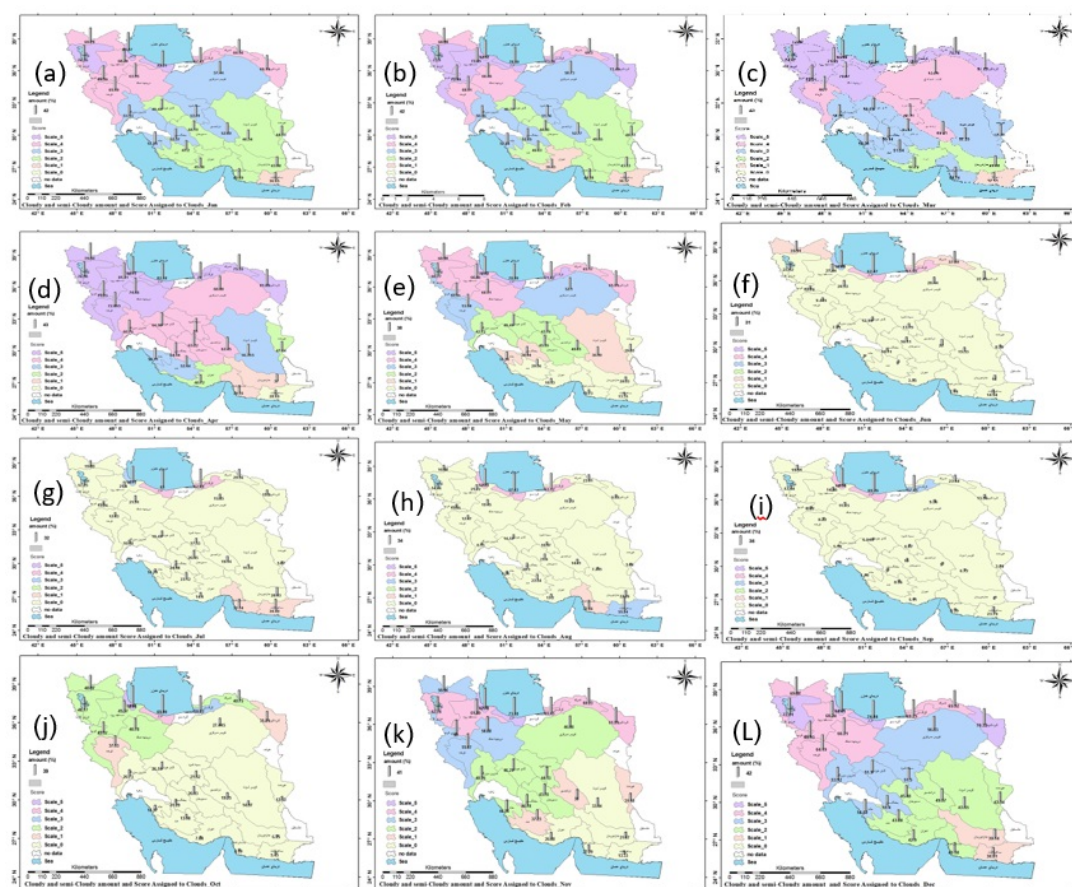
شکل ۴- میانگین درصد بارش برف به کل بارش در حوضه‌های آبریز ایران برای ۱۲ ماه سال طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰). (a) ژانویه، (b) فوریه، (c) مارس، (d) آوریل، (e) می، (f) ژوئن، (g) ژوئیه، (h) اوت، (i) سپتامبر، (j) اکتبر، (k) نوامبر، و (L) دسامبر.

هراز با مقدار تقریبی ۷۴ درصد می‌باشد، بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه تالش با مقدار $83/57\%$ درصد و بعد از آن حوضه هراز با مقدار $78/59\%$ می‌باشد. حوضه‌های تالش و هراز و همچنین حوضه‌های قره‌قوم، گرگان، سفیدرود، ارومیه و مرزی غرب با مقداری بیشتر از ۷۰ درصد هستند. در ماه مارس بیش‌ترین درصد میزان ابری

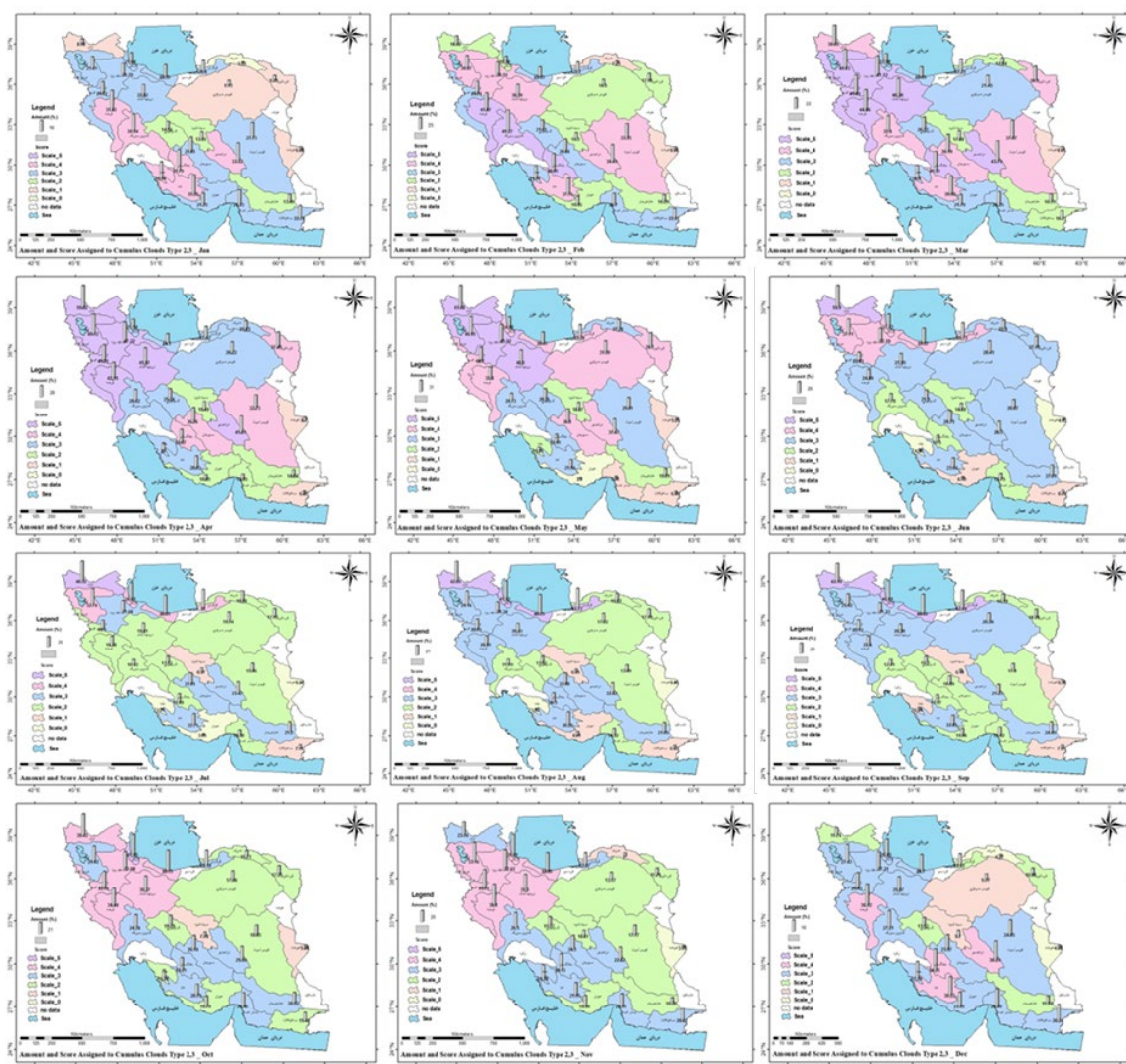
شکل ۵ میانگین مقدار و امتیاز درصد میزان ابری و نیمه ابری در ماه‌های سال را طی دوره آماری ۳۰ ساله نشان می‌دهد. به طور کلی دامنه تغییرات این پارامتر در ماه‌های مختلف سال از صفر تا ۸۵ درصد می‌باشد. بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری در ماه ژانویه مربوط به حوضه تالش با مقدار $88/87\%$ درصد و بعد از آن به ترتیب مربوط به حوضه‌های ارومیه و

هراز و گرگان با مقدار تقریبی ۶۲ درصد می‌باشد. در ماه اوت بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه‌های گرگان، هراز و تالش با امتیاز ۴ هستند. در ماه سپتامبر بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه‌های هراز و تالش با امتیاز ۴ هستند. بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری در ماه اکتبر مربوط به حوضه تالش با مقدار ۷۸/۶۶ و با امتیاز ۵ می‌باشد. در ماه نوامبر بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه‌های هراز و تالش با امتیاز ۵ هستند. حوضه‌های قره‌قوم، اترک، گرگان، سفیدرود و ارومیه در این ماه دارای امتیاز ۴ می‌باشند. در ماه دسامبر بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه‌های ارومیه، تالش، هراز و قره‌قوم با امتیاز ۵ هستند.

و نیمه ابری مربوط به حوضه تالش با مقدار ۸۵/۶۶ درصد می‌باشد. حوضه‌های قره‌قوم، اترک، گرگان، هراز، ارس، سفیدرود، ارومیه، دریاچه نمک و مرزی غرب دارای بالاترین امتیاز بارورسازی در این ماه هستند. در ماه آوریل بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه تالش با مقدار ۸۶/۷۷ درصد می‌باشد، و حوضه‌های تالش، قره‌قوم، اترک، گرگان، هراز، ارس، ارومیه، سفیدرود، دریاچه نمک، کرخه و مرزی غرب دارای بالاترین امتیاز هستند. بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری در ماه می مربوط به حوضه‌های هراز، گرگان و تالش با امتیاز ۵ هستند. در ماه ژوئن بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه‌های هراز و گرگان با مقدار تقریبی ۶۲ درصد می‌باشد. در ماه ژوئیه بیش‌ترین درصد میزان ابری و نیمه ابری مربوط به حوضه‌های



شکل ۵- میانگین مقدار و امتیاز درصد میزان ابری و نیمه ابری حوضه‌های آبریز ایران در ۱۲ ماه طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰). (a) ژانویه، (b) فوریه، (c) مارس، (d) آوریل، (e) می، (f) ژوئن، (g) ژوئیه، (h) اوت، (i) سپتامبر، (j) اکتبر، (k) نوامبر، و (l) دسامبر.



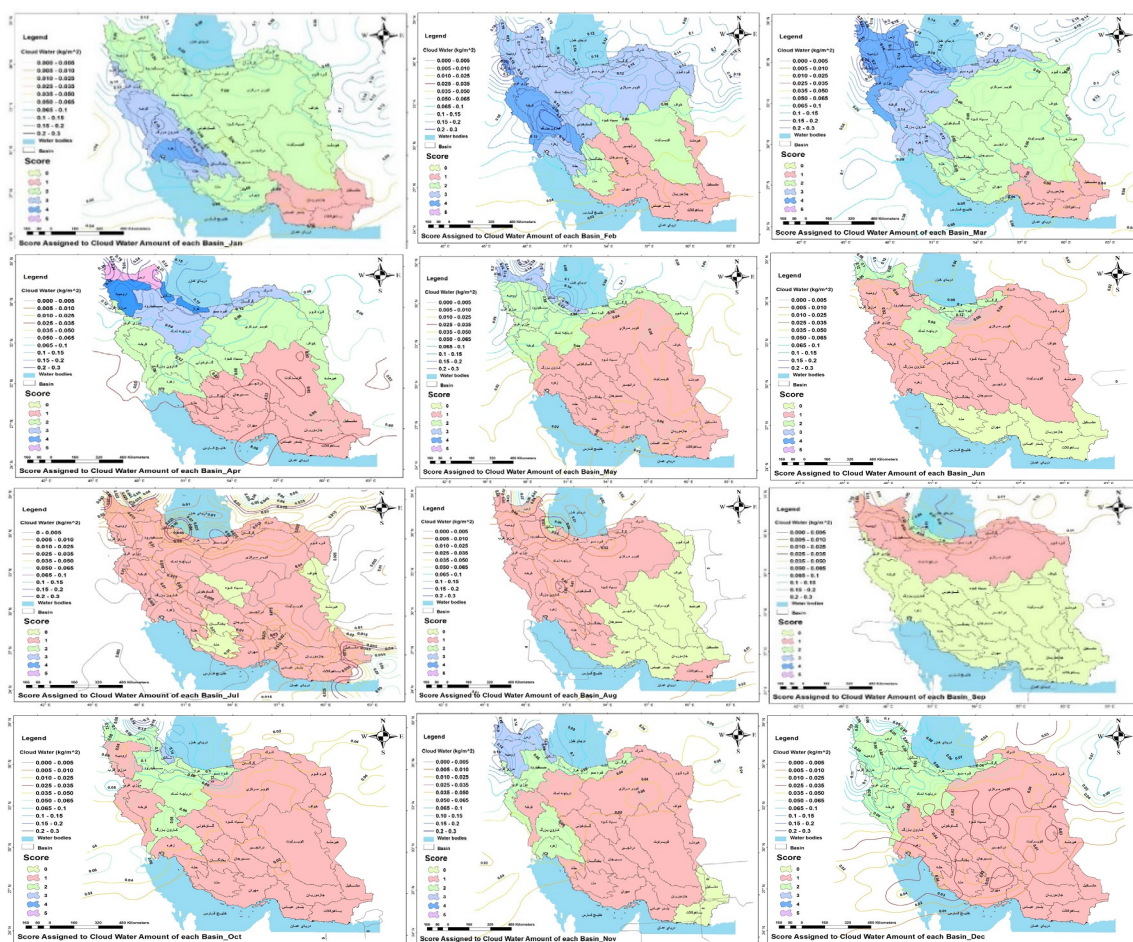
شکل ۶: میانگین مقدار و امتیاز ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ حوضه های آبریز ایران در ۱۲ ماه طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰). (a) ژانویه، (b) فوریه، (c) مارس، (d) آوریل، (e) می، (f) ژوئن، (g) ژوئیه، (h) اوت، (i) سپتامبر، (j) اکتبر، (k) نوامبر، و (l) دسامبر.

ارس با ۵۵/۹۲ درصد می باشد. در ماه می بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه ارس با ۶۱/۶۸ درصد می باشد. در ماه ژوئن بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه ارس با ۵۵/۹ درصد می باشد. حوضه ارس در این ماه با امتیاز ۵ مستعدترین حوضه جهت بارورسازی ابرها می باشد. در ماه ژوئیه بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه ارس با ۴۰/۳۲ درصد می باشد. در ماه اوت بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه گرگان با ۴۲/۷۳ درصد می باشد. حوضه های ارس، هراز، تالش و گرگان در این ماه امتیاز ۵ داشته و مستعدترین حوضه های جهت بارورسازی ابرها هستند. در ماه سپتامبر

شکل ۶ میانگین مقدار و امتیاز ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ حوضه های آبریز ایران در ماه ژانویه طی دوره آماری ۳۰ ساله را نشان می دهد. بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ در این ماه مربوط به حوضه بختگان با ۳۷/۷۹ درصد می باشد. حوضه های کرخه، کارون بزرگ، بختگان، حله، مند و درانجیر در این ماه دارای امتیاز ۴ و مطلوب جهت انجام عملیات بارورسازی ابرها می باشند. در ماه فوریه بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه کارون با ۴۹/۲۷ درصد می باشد. در ماه مارس بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه کرخه با ۴۴/۸۶ درصد می باشد. در ماه آوریل بیشترین درصد رخداد ابرهای کومه ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه

به حوضه تالش با مقدار ۴۱/۹۵ درصد می‌باشد. در ماه نوامبر بیش‌ترین درصد رخدادهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه تالش با ۳۹/۰۱ درصد می‌باشد. در ماه دسامبر بیش‌ترین درصد رخدادهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه کرخه با ۳۶/۱۲ درصد می‌باشد.

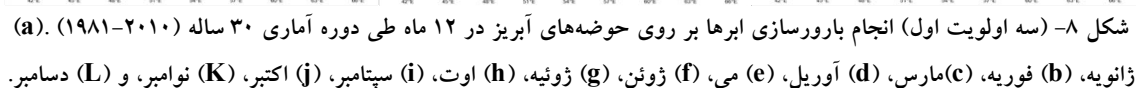
بیش‌ترین درصد رخدادهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ مربوط به حوضه تالش با مقدار ۴۶/۶۹ درصد می‌باشد. حوضه‌های ارس، هراز، تالش و گرگان در این ماه امتیاز ۵ داشته و مستعدترین حوضه‌ها جهت بارورسازی ابرها هستند. در ماه اکتبر بیش‌ترین درصد رخدادهای کومه‌ای نوع ۲ و ۳ مربوط



شکل ۷- میانگین مقدار و امتیاز میزان محتوی آب مایع ابر حوضه‌های آبریز ایران در ۱۲ ماه طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰). (a) ژانویه، (b) فوریه، (c) مارس، (d) آوریل، (e) می، (f) ژوئن، (g) ژوئیه، (h) اوت، (i) سپتامبر، (j) اکتبر، (k) نوامبر، و (l) دسامبر.

پرفشارهای حرارتی و نفوذ خیلی کم و ضعیف سامانه‌های بارشی به کشور و به تبع آن کاهش محتوی آب مایع ابر اکثر حوضه‌های آبریز از امتیاز پایینی برخوردار هستند که حوضه‌های آبریز مجاور دریای خزر که به‌علت تغذیه رطوبت از طریق این دریا و شرایط خاص کوهساری در شرایط تقریباً متوسطی قرار می‌گیرند استثنا بوده و البته طی فصل پاییز نواحی شمال‌غرب، شمال، و غرب کشور به مرور از وضعیت نسبتاً بهتری برخوردار می‌گردند.

شکل ۷ میانگین مقدار و امتیاز میزان محتوی آب مایع ابر حوضه‌های آبریز ایران را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه‌های طبقه‌بندی حوضه‌های آبریز کشور بطور کلی می‌توان عنوان کرد که طی ماه‌های زمستان و اوایل بهار حوضه‌های آبریز نواحی غربی، شمال‌غرب و شمال کشور بطور نسبی از شرایط مستعدتری از نظر محتوی آب مایع ابر جهت انجام عملیات بارورسازی برخوردارند که این شرایط بدلیل نفوذ و تقویت سامانه‌های بارشی از غرب و دریای مدیترانه به سوی ایران می‌باشد، ولی با فرارسیدن ماه‌های گرم سال به‌خاطر استقرار

[illegible]

جدول ۱۱ مقدار عددی پتانسیل بارورسازی ابرها در حوضه های آبریز کشور در ماههای مختلف سال و سه اولویت اول برای مناسب ترین مکان اجرای عملیات بارورسازی ابرها را

تالش و گرگان، ماه ژوئیه هراز، ماه اوت تالش، ماه سپتامبر گرگان، ماه نوامبر ارس - ارومیه، ماه اکتبر قره سو و ماه دسامبر دریاچه نمک می باشد.

تحلیل پتانسیل بارورسازی ابرها در حوضه‌های آبریز ایران نشان‌دهنده تفاوت‌های خردفیزیکی و ترمودینامیکی قابل توجهی است که با نتایج سایر پژوهش‌های برجسته در سطح جهان مطابقت دارد. تحلیل پتانسیل حوضه‌های شمالی و غربی نشان می‌دهد که حوضه دریاچه ارومیه و ارس در فصل زمستان به دلیل وجود سیستم‌های جبهه‌ای سرد، پتانسیل بالایی برای استحصال آب دارند. این موضوع با نتایج مطالعه دانگ (Dong et al., 2021) در چین همخوانی دارد. آن‌ها در بررسی یک مورد عملیاتی در شیازوانگ نشان دادند که ابرهای جبهه‌ای با محتوای آب ابر (LWC) بهینه، پاسخ بسیار سریعی به تزریق یدید نقره نشان می‌دهند. همچنین، مرور جامع (Guo et al., 2015) بر روی پیشرفت‌های فیزیک ابر در چین نیز تأیید می‌کند که شناسایی دقیق ساختار عمودی ابر، پیش‌شرط موفقیت در چنین حوضه‌هایی است. در خصوص ارزیابی عملیاتی و عدم قطعیت بارورسازی ابرها، لازم به ذکر است که نوسانات بارش در حوضه‌های جنوبی ایران و تأثیر جابه‌جایی مسیر طوفان‌ها بر عملکرد بارورسازی، با تحلیل‌های (Ryan and King, 1997) در استرالیا قابل تفسیر است. آن‌ها در بازبینی انتقادی خود خاطرنشان کردند که فرآیندهای همرفتی پیچیده در مناطق خاص می‌تواند منجر به "عدم قطعیت" در نتایج آماری شود. همچنین، گزارش برنامه "وارشادار" در ایالت کارناتاکا هند (Kulkarni et al., 2018) نشان داد که حتی با وجود افزایش بارش، توزیع نامتوازن زمانی یکی از ویژگی‌های همیشگی برنامه‌های بارورسازی در عرض‌های جغرافیایی مشابه ایران است.

در این مطالعه علمی، علیرغم رعایت دقت‌های روش‌شناختی، با محدودیت‌هایی روبروست که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. در پژوهش حاضر، مهم‌ترین محدودیت‌ها در دقت داده‌های بازتحلیل، مقیاس تحلیل، و تغییرات اقلیمی می باشد. با وجود استفاده از داده‌های بازتحلیل معتبر CFSR، این داده‌ها ممکن است در مناطق بسیار مرتفع و صعب‌العبور کوهستانی که فاقد ایستگاه‌های زمینی کافی هستند، با

خطاهای جزئی در تخمین پارامترهای خردفیزیک ابر همراه باشند. مقیاس تحلیل‌ها در سطح حوضه‌های آبریز سی‌گانه انجام شده است؛ لذا ممکن است خرد اقلیم‌های خاص در نقاط کوچکی از یک حوضه بزرگ، رفتاری متفاوت از میانگین کل حوضه نشان دهند. به دلیل تکیه بر آمار بلندمدت ۳۰ ساله، تغییرات ناگهانی ناشی از پدیده تغییر اقلیم در سال‌های بسیار اخیر ممکن است الگوهای جبهه‌ای را در برخی مناطق با عدم قطعیت مواجه کرده باشد که نیازمند پایش‌های لحظه‌ای در زمان عملیات است.

نتیجه گیری

پس از بررسی‌های انجام شده اولویت مکانی برای بارورسازی ابرها برای ماه ژانویه در بین حوضه‌های آبریز مورد مطالعه در کشور، حوضه‌های نمک (۷۰)، ارومیه (۶۹)، ارس (۶۳)، در ماه فوریه حوضه‌های ارومیه (۷۴)، نمک (۷۳) و ارس (۶۸) در ماه مارس حوضه‌های ارومیه (۷۷)، ارس (۷۴)، سفیدرود (۷۰) را کسب کرده‌اند همچنین در ماه‌های آوریل حوضه ارومیه با امتیاز (۷۳)، تالش (۶۵)، ارس (۶۰)، ماه می حوضه ارومیه (۶۶)، تالش (۶۴)، گرگان (۶۱). در ماه ژوئن تالش/گرگان (۵۴)، هراز (۵۲)، ارس (۵۰). در ماه ژوئیه، حوضه هراز (۵۳)، تالش (۵۲)، گرگان (۵۱). در ماه اوت تالش با امتیاز (۷۰)، گرگان (۶۷) و هراز (۵۹)، در ماه سپتامبر بالاترین اولویت مکانی برای بارورسازی ابرها در حوضه گرگان با امتیاز (۵۴)، جازموریان (۵۲)، هراز (۴۵) می باشد در ماه اکتبر بالاترین امتیاز را حوضه تالش با (۶۸) امتیاز، قره سو (۶۰) و ارس با (۵۸) امتیاز دارند. در ماه نوامبر حوضه ارومیه (۶۹) امتیاز، ارس/تالش/گرگان (۶۰) امتیاز، اترک (۵۹) امتیاز و در نهایت در ماه دسامبر حوضه نمک با (۶۲) امتیاز، ارس (۶۱) و ارومیه (۵۹) امتیاز را برای بارورسازی ابرها به دست آورده‌اند.

همچنین از نظر زمانی، در ماه ژانویه حله، درانجیر، سیاه‌کوه، سیرجان، کارون بزرگ، کرخه و هیرمند برای بارورسازی مناسب می‌باشد. مناسب‌ترین ماه جهت اجرای عملیات در حوضه‌های اترک، بختگان، دریاچه نمک و قره‌قوم ماه فوریه می‌باشد. ماه مارس مناسب‌ترین ماه جهت بارورسازی در حوضه‌های ارس، ارومیه، سفیدرود، کویر مرکزی، گاوخونی،

- International Journal of Global Warming, 1, pp.238-252.
2. Blair, D.N., Davis, B.L. and Dennis, A.S., 1973. Cloud chamber tests of generators using acetone solutions of AgI-NaI, AgI-KI and AgI-NH4I. *Journal of Applied Meteorology*, 12(6), pp.1012-1017.
 3. Carslaw, K.S., Harrison, R.G. and Kirkby, J., 2002. Cosmic rays, clouds, and climate. *Science*, 298(5599), pp.1732-1737.
 4. Dong, X., Zhao, C., Huang, Z., Mai, R., Lv, F., Xue, X., Zhang, X.H., Hou, S., Yang, Y., Yong, Y. and Sun, Y., 2021. Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in November 2020 over Shijiazhuang China. *Atmospheric Research*, 262, 1057-1066.
 5. Enghoff, M.B., Pedersen, J.O.P., Uggerhøj, U.I., Paling, S.M. and Svensmark, H., 2011. Aerosol nucleation induced by a high energy particle beam. *Geophysical Research Letters*, 38(9).
 6. Finnegan, W.G., Pitter, R.L. and Young, L.G., 1991. Preliminary study of coupled oxidation reduction reactions of included ions in growing ice crystals. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 25(11), pp.2531-2534.
 7. Guo, X., Fu, D., Li, X., Hu, Z., Lei, H., Xiao, H. and Hong, Y., 2015. Advances in cloud physics and weather modification in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(2), pp.230-249.
 8. Guo, X., Zheng, G. and Jin, D., 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. *Atmospheric Research*, 79(3-4), pp.183-226.
 9. Kulkarni, J.R., Morwal, S.B. and Deshpande, N. R., 2018. Rainfall enhancement in Karnataka state cloud seeding program Varshadhare 2017. *Atmospheric Research*, 219, 65-76.
 10. LIU, W.S., ZHOU, J.Z., JIN, W.P., GAO, Y.J. and SUN, L., 2011. A kind of late-model solid AgI composition which is vacuum casting and high temperature. *Jiangxi Science*, (1), p.9.
 11. Miller, A. Austin, 2001. *Climatology*. Shubhi Publications Delhi, New Delhi.
 12. Ryan, B.F. and King, W.D., 1997. A critical review of the Australian experience in cloud seeding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), pp.239-254.
 13. Sullivan, K.T., Piekielek, N.W., Chowdhury, S., Wu, C., Zachariah, M.R. and Johnson, C.E., 2010. Ignition and combustion characteristics of nanoscale Al/AgIO₃: A potential energetic biocidal system.

مرزی غرب، مند و مهران است. حوضه‌های تالش، گرگان و هراز در ماه اوت جهت انجام عملیات بارورسازی مناسب هستند. کویر لوت در دو ماه فوریه و ژانویه دارای امتیاز یکسان و هر دو ماه مناسب جهت اجرای عملیات می‌باشد. ماه‌های ژانویه و مارس هر دو برای حوضه آبریز گاوخونی مناسب است. در این پروژه امکان‌سنجی بارورسازی ابرها براساس مکان و زمان مناسب و پتانسیل بارورسازی می‌باشد و این امر با جاهایی که دچار خشکسالی بوده‌اند و نیاز به آب دارند متفاوت است. فقط از نقطه نظر امکان استفاده از بارورسازی ابرها این امتیاز داده شده است که بر اساس سند PEP No.3 سازمان هواشناسی جهانی که بومی سازی شده است، می‌باشد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی "مطالعات امکان سنجی بارورسازی ابرها به منظور استحصال آب در حوضه‌های آبریز سی گاه کشور" می‌باشد. این طرح با حمایت ملی موسسه تحقیقات آب در پژوهشگاه هواشناسی اجرا گردیده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مسئولان و کارشناسان محترم وقت سازمان هواشناسی کشور که با سعه صدر اطلاعات و آمار مورد نیاز این پژوهش را در اختیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو قرار دادند، صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از زحمات و تلاش‌های رئیس وقت پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو (زنده یاد آقای دکتر جواد بدایع جمالی) برای حمایت، تسهیل سازی، و جذب کارشناسان برای انجام این پروژه تشکر می‌کنند، علو درجات را برای ایشان از خداوند متعال خواستاریم. هم چنین از اعضای هیئت علمی و کارشناسان پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو که در مراحل بومی‌سازی استانداردهای PEP No. 3 و تحلیل‌های نرم‌افزاری ما را یاری رساندند، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

1. Bartholy, J., Pongracz, R., Torma, C., Pieczka, I., Kardos, P. and Hunyady, A., 2009. Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian basin.

15. Tzur, I. and Levin, Z., 1981. Ions and precipitation charging in warm and cold clouds as simulated in one-dimensional time-dependent models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(11), pp.2444-2461.
16. Vittal Murty, T.S.R. and Chaitanya Rayana, V.S.S.S., 2007. Weather modification – A review. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 36(6), pp.433-446.
14. Svensmark, H., Enghoff, M.B. and Pedersen, J.O.P., 2013. Response of cloud condensation nuclei (> 50 nm) to changes in ion-nucleation. *Physics Letters A*, 377(37), pp.2343-2347.