

## ارزیابی آماری عملیات بارورسازی ابرهای فلات مرکزی ایران در سال آبی ۹۳-۹۴

بنفشه زهرایی<sup>۱\*</sup>، حامد پورسپاهی سامیان<sup>۲</sup>، محسن ناصری<sup>۳</sup> و سید محمود طاهری<sup>۴</sup>

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. پژوهشگر پسا دکتری، موسسه آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. استاد، دانشکده علوم مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۸/۱۴، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

### چکیده

با توجه به وضعیت اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران و کاهش متوسط بارش‌ها به‌خصوص در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های نوینی همچون بارورسازی ابرها به‌منظور دستیابی به منابع آب بیشتر موردتوجه قرار گرفته و با این هدف، بارورسازی ابرها از سال ۱۳۷۷ در کشور عملیاتی شده است. هدف از این تحقیق، ارزیابی آماری پروژه‌های بارورسازی ابرها در سال آبی ۹۳-۹۴ (ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس سال ۲۰۱۵ میلادی) در مناطقی از فلات مرکزی ایران شامل استان‌های یزد، کرمان، فارس، اصفهان و برخی از مناطق مجاور با بهره‌گیری از رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام است. در این تحقیق از دو رویکرد آماری استفاده شد. در رویکرد اول، بارش در ایستگاه‌های واقع در منطقه تحت‌تأثیر عملیات بارورسازی، بر اساس بارش در ایستگاه‌های خارج از این منطقه با استفاده از این رگرسیون خطی برآورد شده و سپس با در نظر گرفتن بازه اطمینان ۹۰ درصد، اثرگذاری عملیات بارورسازی در هر ایستگاه تعیین شده است. در رویکرد دوم، حجم بارش در استان‌های تحت‌تأثیر عملیات بارورسازی بر اساس بارش در ایستگاه‌های خارج از محدوده تحت‌تأثیر بارورسازی با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام برآورد شده و سپس با در نظر گرفتن بازه اطمینان ۹۰ درصد، اثرگذاری عملیات بارورسازی بر روی حجم بارش هر استان بررسی شده است. نتایج هر دو روش حاکی از تأثیرگذاری معنی‌دار عملیات بارورسازی در این سال در این مناطق بوده است. به گونه‌ای که حجم بارش در ماه فوریه در تمام استان‌های واقع در منطقه هدف عملیات بارورسازی از ۱۵ تا ۸۰ درصد افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: تعدیل وضع هوا، رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام، رگرسیون خطی چندگانه، ارزیابی آماری، بارورسازی ابرها، فلات مرکزی ایران.

### ۱. مقدمه

امکان‌پذیر است که ابرهای موجود نزدیک به (و یا در حال) تولید بارش باشند و اینکه به‌دلیل تغییرپذیری زیاد بارش، تعیین میزان افزایش بارش ناشی از فرایند بارورسازی ابرها معمولاً به‌راحتی قابل انجام نیست، از زمینه‌های تحقیقاتی مورد توجه محققین کشورهای مختلف در دهه‌های اخیر است (انجمن مهندسين عمران آمریکا، ۲۰۱۶). برخی از روش‌های ارزیابی به‌منظور ارزیابی اثرات پروژه‌های عملیاتی بارورسازی ابرها در متون فنی توصیه شده است. برخی از دانشمندان بر این باورند که ارزیابی صحیح از برنامه‌های تغییر وضع هوا فقط با اجرای تصادفی آنها امکان‌پذیر است (شورای تحقیقات ملی آمریکا (NRC، ۲۰۰۴). برخی دیگر نیز

بارورسازی ابرها به‌عنوان یکی از شاخه‌های علم تعدیل وضع هوا، فرایندی با اهداف مختلف از جمله افزایش بارش دریافتی از ابرها است. بارورسازی ابرها در ایران از سال ۱۳۷۷ با همکاری کارشناسان روسی آغاز شد و از سال ۱۳۸۷ با انتقال دانش فنی به‌صورت مستقل توسط کارشناسان ایرانی ادامه یافت. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به تعیین اثرات بارورسازی ابرها صورت گرفته است.

ارزیابی برنامه‌هایی که تنها یک سال اجرا می‌شوند، در اکثر موارد بسیار دشوار است. زیرا میزان تأثیر قابل انتظار از باروری در محدوده تغییرات طبیعی بارش است. از آنجایی که به‌طور معمول بارورسازی ابرها تنها زمانی

معتقدند اگر برنامه‌های غیر تصادفی به درستی طراحی شده و به‌ویژه با اندازه‌گیری‌های فیزیکی همراه باشد می‌تواند نتایج معنی داری ارائه دهد. اندازه‌گیری‌های فیزیکی مانند اندازه‌گیری‌های فیزیک ابر و داده‌های رادار و ماهواره می‌توانند برخی از فرایندهای اصلی درگیر در باروری ابرها به‌ویژه فرایندهای مربوط به هدف‌گیری و هسته‌سازی را راستی‌آزمایی کنند (اورویل و همکاران، ۲۰۰۴). به‌طور کلی قوی‌ترین مدرک ممکن از اثربخشی پروژه در افزایش بارش بر روی سطح زمین روش تصادفی است. در پروژه‌های تصادفی به‌منظور ارزیابی دقیق اثرگذاری باروری، نیمی از ابرهای قابل باروری، به‌عنوان شاهد یا کنترل به حال خود رها شده و مورد باروری قرار نمی‌گیرند و با مقایسه متغیر آزمایش (که معمولاً بارش است) در ابرهای بارور شده و بارور نشده، تأثیر باروری ابرها تخمین زده می‌شود. از آنجایی که در این روش درصدی از فرصت‌های باروری بلااستفاده رها می‌شود عمدتاً فقط در برنامه‌های تحقیقاتی به کار می‌رود و ارزیابی برنامه‌های بارورسازی ابرها معمولاً با تکیه بر روش آماری انجام می‌شود (انجمن مهندسين عمران آمریکا، ۲۰۱۶).

بررسی سوابق تحقیقاتی در این زمینه گویای این واقعیت است که روش‌های آماری می‌توانند در پروژه‌های طولانی مدت اثرات باروری ابرها را به شکل قابل اطمینانی آشکار کنند (سیلورمان، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰). یکی از این روش‌ها، روش تحلیل تاریخی مناطق هدف/کنترل است (گریفیث و همکاران، ۲۰۰۹؛ گریفیث و همکاران، ۲۰۱۱) که به تفصیل توسط دنیس (۱۹۸۰) تشریح شده است. اساس این روش انتخاب متغیری مانند بارش یا آب معادل برفی است که تحت تأثیر بارورسازی قرار دارد. به این منظور، در ابتدا یک رابطه رگرسیون خطی چندگانه میان داده‌های بارش بلندمدت منطقه هدف (منطقه تحت تأثیر عملیات بارورسازی ابرها) به‌عنوان متغیر وابسته و داده‌های بارش بلندمدت منطقه کنترل (منطقه خارج از تحت تأثیر عملیات بارورسازی با خصوصیات اقلیمی ترجیحاً مشابه و نزدیک به منطقه هدف) به‌عنوان متغیرهای

مستقل تعیین می‌شود. سپس بر اساس این رابطه رگرسیون چندگانه، بارش منطقه هدف در دوره انجام عملیات بارورسازی برآورد می‌شود و بازه اطمینان ۹۰ درصد حول این پیش‌بینی نیز تعیین می‌شود. در نهایت با مقایسه بارش مشاهده شده در زمان انجام عملیات با این بازه اطمینان، اثرگذاری عملیات بارورسازی تعیین می‌شود. ماتون و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از روش تحلیل هدف/کنترل مبتنی بر رگرسیون چندگانه به بررسی اثرات پروژه‌های تعدیل برف در استرالیا پرداخته، همچنین کولکارنی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات بارورسازی ابرها در هندوستان با استفاده از روش تحلیل رگرسیون چندگانه هدف/کنترل پرداخته‌اند. در این تحقیق با دو معیار، ارزیابی اثرگذاری عملیات بارورسازی سنجیده شده است. در این ارزیابی، بارش در ۴ ساعت پس از انجام عملیات در منطقه هدف و در دومین ارزیابی از تحلیل رگرسیون چندگانه هدف/کنترل به‌منظور برآورد میزان افزایش بارش استفاده شده است.

برخی از محققین با اهمیت بخشی به انتخاب مناسب منطقه کنترل، به نقش تعیین‌کننده آن در این دست از ارزیابی‌های آماری اشاره کرده‌اند. زیرا اگر ایستگاه‌های کنترل در مناطق تحت تأثیر عملیات قرار گرفته باشند، بارش پیش‌بینی شده برای منطقه هدف نیز بیشتر از مقدار واقعی محاسبه شده و در نتیجه این مسئله موجب کم برآورد شدن اثرات باروری خواهد شد (گریفیث و همکاران، ۲۰۱۵).

در تحقیق حاضر، روش رگرسیون چندگانه کنترل-هدف به‌منظور بررسی اثر بارورسازی در عملیات بارورسازی در منطقه مرکزی ایران شامل استان‌های یزد، کرمان، اصفهان، فارس و بخش‌هایی از استان‌های مجاور مورد استفاده قرار گرفته است. در همین راستا، ابتدا روش مورد استفاده به‌منظور تعیین مناطق کنترل و هدف در بخش ۲ تشریح شده است. در بخش ۳ روش رگرسیون گام‌به‌گام که به‌منظور برآزش رابطه رگرسیون چندگانه استفاده شده، تشریح شده است. در بخش ۴ نتایج استفاده از روش

سازگاری داده‌ها در مقایسه با ایستگاه‌های مجاور بررسی شده است و در صورتی که منحنی جرم مضاعف نشان‌دهنده شواهدی از عدم سازگاری در داده‌های ایستگاه باشد ایستگاه مربوطه حذف شده است. برای مطالعه در مورد روش جرم مضاعف به صفوی (۱۳۸۸) مراجعه شود. ۲. حذف داده‌های دورافتاده: به منظور شناسایی داده‌های دورافتاده (Outlier) از آزمون شناسایی داده‌های دورافتاده که توسط ویسبرگ (۲۰۱۳) پیشنهاد شده، استفاده شده است.

۳. بررسی هم‌خطی بودن متغیرهای مستقل: وجود هم‌خطی یا همبستگی بالا در بین متغیرهای مستقل موجب افزایش واریانس خطا و در نتیجه افزایش خطای پیش‌بینی مدل می‌شود. به منظور شناسایی خصوصیت هم‌خطی در متغیرهای مستقل عامل تورم واریانس (Variance inflation factor) یا VIF برای هر متغیر مستقل محاسبه شده و سپس متغیرهای مستقلی که مقدار VIF آنها بیش از مقدار مجاز ( $VIF > 10$ ) است از فرایند تحلیل رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام کنار گذاشته شده‌اند. به منظور مطالعه در مورد عامل تورم واریانس به ویسبرگ (۲۰۱۳) مراجعه کنید.

۴. نرمال‌سازی و استانداردسازی داده‌ها: یکی از فرضیات اصلی در انجام تحلیل رگرسیون خطی چندگانه نرمال بودن خطاهای مدل است که با میزان نزدیکی بودن خطاهای مدل به توزیع نرمال در هر ایستگاه سنجیده می‌شود. به این منظور دست‌یابی به این هدف از تبدیل باکس-کاکس (Box and Cox) بر اطلاعات هر ایستگاه استفاده شده است.

۵. آزمون نرمال بودن داده‌ها: به منظور بررسی مشابهت توزیع داده‌ها با توزیع نرمال از آزمون‌های نیکویی برازش کلوموگروف-اسمیرنوف و خی-دو استفاده شده است. در صورتی که بر اساس هر دو آزمون فرض نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۰ درصد رد شود آن ایستگاه از فرایند تحلیل رگرسیون چندگانه کنار گذاشته می‌شود.

رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته و در نهایت در بخش ۵ جمع‌بندی نتایج ارائه شده است.

## ۲. روش‌ها

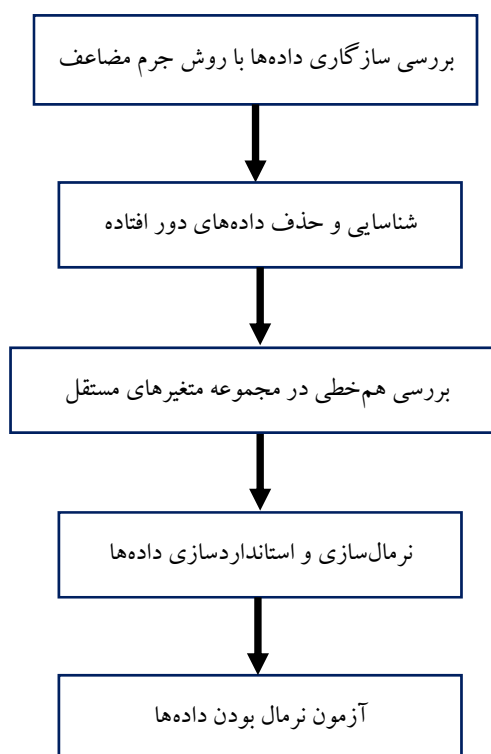
در تحقیق حاضر و پس از تعیین مناطق هدف و کنترل، تحلیل رگرسیون چندگانه به دو شیوه مختلف مورد استفاده قرار گرفته که در ادامه به تشریح آنها پرداخته شده است.

۱. بررسی اثرات عملیات بر بارش در ایستگاه‌های منطقه هدف (ارزیابی ایستگاهی): در این روش معادله رگرسیون چندگانه میان ارتفاع بارش در ایستگاه‌های منطقه هدف به‌عنوان متغیر وابسته و ارتفاع بارش در ایستگاه‌های منطقه کنترل به‌عنوان متغیرهای مستقل برقرار می‌شود و سپس با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه، اثرات افزایشی یا کاهش‌ی بارورسازی بر هر ایستگاه سنجیده می‌شود. در این تحلیل برای هر ایستگاه هدف یک رگرسیون چندگانه بین بارش آن ایستگاه با بارش ایستگاه‌های واقع در منطقه کنترل برآورد می‌شود.

۲. بررسی اثرات عملیات بر حجم بارش در منطقه هدف (ارزیابی منطقه‌ای): در این روش معادله رگرسیون چندگانه میان حجم بارش در منطقه هدف به‌عنوان متغیر وابسته و ارتفاع بارش در ایستگاه‌های منطقه کنترل به‌عنوان متغیرهای مستقل، برازش داده شده و سپس اثرات افزایشی یا بی‌اثر بودن بارورسازی بر حجم بارش مورد تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است حجم بارش در این مطالعه به تفکیک هر استان تعیین شده است.

پیش از انجام تحلیل رگرسیون چندگانه، داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های وزارت نیرو و سازمان هواشناسی بر اساس فرایند نشان‌داده‌شده در شکل ۱ صحت‌سنجی و آماده‌سازی شدند. مراحل نشان‌داده شده در این شکل عبارت‌اند از:

۱. بررسی سازگاری داده‌ها با روش جرم مضاعف: در این مرحله با ترسیم منحنی جرم مضاعف برای هر ایستگاه،



شکل ۱. صحت سنجی و آماده‌سازی داده‌های بارش به منظور تحلیل رگرسیون چندگانه.

تعیین‌کننده‌ای در انتخاب مناطق کنترل و در نهایت کیفیت ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که محافظه‌کارانه‌ترین و معتبرترین تخمین از اثرهای باروری، در محدوده دو ساعت از زمان آغاز بارورسازی روی می‌دهد (دفلیس و همکاران، ۲۰۱۴)

تعیین منطقه هدف در این تحقیق توسط کارشناسان مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها صورت گرفته است. در انجام این کار از یک مدل جفت شده پاشندگی-هواشناسی به منظور شبیه‌سازی انتقال مواد باروری بهره گرفته شده است. مدل پخش-هواشناسی مورد استفاده مدل Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) و مدل هواشناسی مورد استفاده مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا به نام Weather Research and Forecasting Model (WRF) بوده است. به منظور استفاده از مدل HYSPLIT، ابتدا با استفاده از اجرای ۱۸ ساعته مدل WRF، سرعت و جهت باد در ترازهای مختلف جو

همچنین به منظور تعیین حجم بارش در منطقه هدف و برقراری ارتباط رگرسیونی به ترتیب از روش معکوس فاصله وزن‌دار (Inverse Distance Weighting; IDW) و رگرسیون چندگانه گام به گام استفاده شده که در ادامه روابط و جزئیات آنها آورده شده است.

## ۱-۲. تعیین منطقه هدف و منطقه کنترل

در ایران با توجه به نیاز فراوان به آب و سیاست استفاده از تمامی فرصت‌های باروری، محدوده اجرای باروری متغیر و از نظر وسعت معمولاً قابل توجه است؛ از این رو تاکنون برخلاف سایر نقاط دنیا امکان در نظر گرفتن منطقه‌ای کوچک و ثابت به عنوان منطقه هدف قبل از اجرای پروژه وجود نداشته است. بنابراین با توجه به محدودیت‌های موجود، منطقه هدف به "منطقه متأثر از مواد باروری" اطلاق شده و منطقه یا مناطق کنترل نیز بعد از تعیین منطقه هدف با توجه به معیارهای علمی مربوطه انتخاب می‌شوند؛ بنابراین دقت در تعیین مناسب منطقه هدف، نقش

در رابطه خطی فوق، وزن مقدار بارش در هر نقطه نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda_i = \frac{g(h_{io})}{\sum_{k=1}^n g(h_{ok})} \quad (2)$$

در رابطه فوق، مقدار وزن تابعی است از مقدار تابعی ( $g$ ) که تابعی از فاصله اقلیدسی ( $h$ ) است که به صورت نسبی نسبت به نقطه هدف و مجموع آن تابع در هر یک از نقاط مشاهداتی تعریف می شود. در روش استاندارد فرم تابع  $g$  در زیر آورده شده است:

$$g(h) = \frac{1}{h^p} \quad (3)$$

در رابطه بالا  $g$  به صورت معکوس فاصله به توان پارامتر حقیقی و مثبت  $p$  محاسبه می شود. این روش دارای قابلیت محاسباتی مناسبی است و با استفاده از روش ارزیابی تقاطعی مقدار بهینه  $p$  را محاسبه می کند. نکته قابل توجه در این روش و سایر روش های مدل سازی مکانی استفاده از پارامتر مؤثر دیگری است که در آن نقاط مشاهداتی مؤثر ( $n$ ) را در شعاع همسایگی خاصی در نظر می گیرد و به اصطلاح تأثیر تفاوت اثرات محلی در ساختار مکانی بارش را لحاظ می کند. عابدینی و همکاران (۲۰۰۸) به تأثیر نحوه انتخاب این میدان مؤثر در افزایش دقت تخمین مکانی در روش های زمین آمار و معکوس وزن دار فاصله پرداخته و تأثیر فوق العاده آن را در افزایش دقت مدل سازی مکانی آشکار ساختند. در این روش با توسعه مدل دوبعدی ارائه شده توسط عابدینی و همکاران (۲۰۰۸) در سه بعد و افزایش پارامترهای نامعین مدل، احتساب دامنه همسایگی به صورت بیضی گون که دارای سه شعاع همسایگی  $\{r_x, r_y, r_z\}$  است و توان مجهول به صورت ثابت برای کل دامنه، چهار پارامتر مورد بهینه سازی قرار گرفته است. با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، پارامترهای چهارگانه فوق برای هر سال بارش در کل منطقه به صورت میانگین به دست آمده است.

مطابق با الگوریتم فوق، برای سناریو و سال مورد نظر،

در هر روز بارورسازی تعیین شده و پس از تبدیل خروجی های مدل WRF به فرمت قابل استفاده در مدل HYSPLIT، از این نرم افزار برای تعیین بیشترین محدوده افقی پخش مواد در بازه ارتفاعی ۱۵۰۰ متر پایین و بالای تراز ارتفاعی منطقه رهاسازی به عنوان محدوده تحت تأثیر مواد بارورسازی استفاده می شود. به منظور مطالعه بیشتر در مورد روش تعیین منطقه هدف به تحقیق سید حسنی و همکاران (۱۳۹۷) مراجعه شود.

ایستگاه یا ایستگاه های کنترل، به منظور کسب نتایج دقیق تر باید همبستگی بالایی با ایستگاه هدف داشته باشند. همچنین لازم است که داده هایی با طول آماری کافی در این ایستگاه ها در اختیار بوده تا هم از نظر تاریخی و هم در دوره عملیاتی مورد نظر، مقایسه معنی داری بین ایستگاه کنترل و هدف انجام شود. در تعیین منطقه کنترل، مناطق پایین دست بارورسازی در نظر گرفته نشده است. همچنین فاصله مطمئنی بین منطقه هدف و منطقه کنترل در نظر گرفته شده تا به این ترتیب اطمینانی حاصل شود که منطقه کنترل تحت تأثیر بارورسازی نباشد. فاصله بین منطقه کنترل و هدف، ۱۰ کیلومتر و متوسط عرض منطقه کنترل ۸۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است (مؤسسه آب دانشگاه تهران، ۱۳۹۶).

## ۲-۲. روش معکوس فاصله وزن دار

در این روش فرض در بر آورد مقدار پارامتر هدف در نقطه مورد نظر به صورت مجموع وزن داری از مقادیر مشاهده شده در ایستگاه های همجوار به نحوی است که نقاط نزدیک تر دارای اثر بیشتر باشند. به عنوان مثال، چنانچه تخمین مقدار بارش در نقطه  $x_0$  مد نظر باشد و اطلاعات بارش در  $n$  نقطه  $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  با مقادیر  $\{f_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  موجود باشد، آنگاه بر اساس فرض روش معکوس فاصله وزن دار، مقدار بارش در نقطه هدف بر اساس رابطه خطی زیر به دست خواهد آمد:

$$f(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i \quad (1)$$

پارامترهای فوق برای کل حوضه‌های آبریز محاسبه شده است. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک با اعداد حقیقی و همچنین احتمال ترویج ۹۶ درصد و جهش ۹ درصد بهره گرفته شده است. جمعیت هر نسل ۱۵۰ عضو و معیار توقف الگوریتم ژنتیک نیز رسیدن به ۵۰۰ نسل و یا تغییر کمتر از ۰/۰۰۰۱ در تابع هدف است. در ادامه، تابع شاخص برازش مورد استفاده نیز ارائه شده است:

$$(۴) \quad \text{تابع شاخص برازش} = \frac{10}{Error+1}$$

در رابطه فوق  $Error$  معرف خطای مدل معکوس وزن دار با توان و شعاع‌های همسایگی در هر عضوی از جمعیت است. بدین معنی که با پارامترهای فوق مقدار مجموع خطا در نقاط مشاهداتی با استفاده از الگوریتم ارزیابی تقاطعی است.

### ۲-۳. رگرسیون چندگانه گام به گام

از آنجاکه برآورد کردن تمام مدل‌های رگرسیون ممکن بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته از نظر محاسباتی مقرون به صرفه نیست، در این تحقیق از رگرسیون چندگانه گام به گام بهره گرفته شده است. در این روش به صورت تکراری، متغیرهای مستقل را به مدل اضافه کرده یا از مدل کنار می‌گذارند و بدین ترتیب تلاش می‌کنند با بررسی زیرمجموعه‌ای از تمام مدل‌های ممکن، بهترین مدل رگرسیون چندگانه را انتخاب کنند. به طور کلی، سه رویکرد انتخاب پیشرو، حذف پسرو و روش ترکیبی در مدل‌های رگرسیون چندگانه گام به گام وجود دارد. از معضلات موجود در رویکرد انتخاب پیشرو عدم حذف متغیر اضافه شده به مدل در گام‌های بعدی است که این مسئله معمولاً سبب خروج مدل از حالت بهینه است. همچنین در مدل‌های انتخاب پیشرو، وجود ساختار همبستگی بین متغیرهای مستقل باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود (مونتگومری و همکاران، ۲۰۱۲). بر همین اساس، رویکرد حذف پسرو و رویکرد ترکیبی، گزینه‌های بهتری برای استفاده در کاربردهای عملی هستند. در تحقیق

حاضر متغیرهای مستقل را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد،

۱. متغیرهای مستقلی که همبستگی آماری با متغیر وابسته دارند اما از نظر اقلیمی تشابه روشنی با ایستگاه مربوطه ندارند،
۲. متغیرهایی که علاوه بر همبستگی آماری، تشابه اقلیمی آنها نیز در مطالعات هواشناسی مورد تأیید قرار گرفته است.

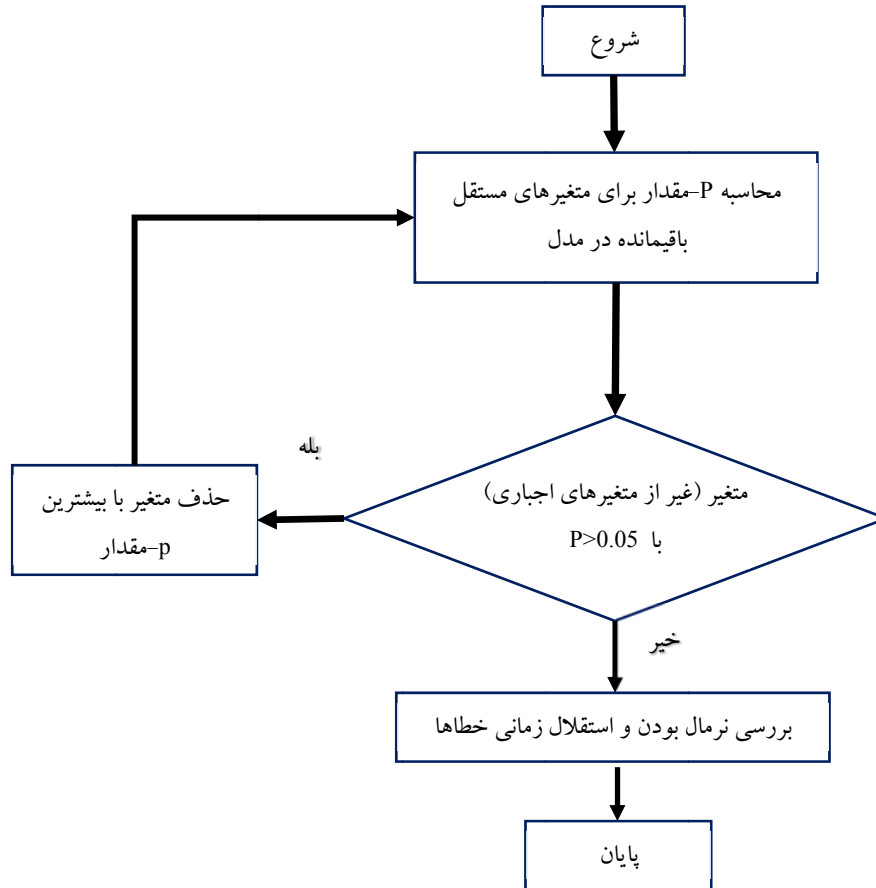
کاتنر و همکاران (۲۰۰۵) پیشنهاد کرده‌اند که در این شرایط از رگرسیون چندگانه گام به گام با رویکرد حذف پسرو استفاده شود که در آن متغیرهای مستقلی که بر اساس نظر خبره ارتباط آنها با متغیر وابسته مورد تأیید است، هرگز از مدل کنار گذاشته نشوند. بر همین اساس، به منظور انتخاب نهایی متغیرهای مستقل مؤثر در مدل رگرسیونی مربوط به هر ایستگاه، از روش رگرسیون چندگانه گام به گام به ترتیب زیر استفاده شده است:

- هشت ایستگاه مورد نظر به عنوان متغیر مستقل در درون مدل در نظر گرفته شده‌اند.

- ایستگاه‌هایی که تشابه اقلیمی آنها مورد تأیید کارشناسی است به عنوان متغیرهای مستقل اجباری در مدل رگرسیون چندگانه وارد شده‌اند (هرگز از مدل رگرسیون چندگانه کنار گذاشته نمی‌شوند).

- در فرایند رگرسیون چندگانه مرحله‌ای، فرض معنی دار بودن هر کدام از متغیرهای مستقل مورد آزمون قرار گرفته و متغیرهای مستقلی (غیر از متغیرهای مستقل اجباری بر اساس شباهت اقلیمی) که فرض معنی دار بودن آنها تأیید نمی‌شود، از مدل کنار گذاشته می‌شوند و این فرایند تا جایی ادامه می‌یابد که تکرار فرایند تغییر جزئی در متغیرهای مستقل درون مدل ایجاد کند که معنی دار نباشد.

خاطر نشان می‌شود که در این تحقیق، سطح خطای کلیه آزمون‌ها برابر با ۵ درصد فرض شده است. نمودار گردشی این فرایند در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. فرایند رگرسیون چندگانه گام به گام مورد استفاده.

$$R_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N Z_{it}(n)Z_{jt}(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N Z_{it}(n)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N Z_{jt}(n)^2}} \quad (5)$$

که در اینجا  $R_{ij}$  نشان دهنده ضریب همبستگی بین ایستگاه  $i$  و ایستگاه  $j$  است.

به این صورت، ضریب تعیین بین هر کدام از ایستگاه‌های منطقه هدف با هر کدام از ایستگاه‌های منطقه کنترل تعیین شده است. برای هر کدام از ایستگاه‌های منطقه هدف، هشت ایستگاه منطقه کنترل که دارای بیشترین ضریب تعیین با آن ایستگاه هستند، به عنوان متغیر مستقل در درون رگرسیون چندگانه گام به گام در نظر گرفته شده‌اند. در مورد روش با در نظر گرفتن تشابه اقلیمی، هشت ایستگاه منتخب از دامنه مکانی مشابه با ایستگاه هدف مربوطه انتخاب شده‌اند.

از آنجا که در این تحقیق از رگرسیون چندگانه استفاده شده، از ضریب تعیین به عنوان شاخصی که نشان‌دهنده میزان توانایی تبیین متغیر وابسته توسط متغیر(های) مستقل استفاده شده و ضریب تعیین به صورت مجذور ضریب همبستگی،  $R_{ij}^2$ ، تعریف می‌شود.

فرض کنید تعداد کل ایستگاه‌ها را با  $I$  نشان دهیم و بردار مقادیر مشاهدات تاریخی مربوط به ایستگاه  $i$  در ماه  $t$  را با بردار  $X_{it}$  ( $1 \times N$ ) نشان دهیم که طول این بردار،  $N$ ، بیانگر طول دوره تاریخی است. بردار نرمال و استاندارد شده متناظر با  $X_{it}$  را نیز با  $Z_{it}$  نشان می‌دهیم. ضریب همبستگی بین ایستگاه  $i$  با هر ایستگاه  $j=1, \dots, I$  با معادله زیر به دست می‌آید:

که در این رابطه،  $\sigma_{\varepsilon}^2$  و ردایی خطاها، RSS مجموع مربعات خطاها و df درجه آزادی مدل مربوطه است. حال می توان بازه اطمینان پیش بینی بارش در ایستگاه هدف مربوطه (یا حجم بارش در منطقه هدف مربوطه) با سطح اطمینان  $(1-\alpha) \times 100\%$  را به شکل زیر محاسبه کرد:

$$\hat{y} \pm t_{\frac{\alpha}{2}, df} \sigma_{\varepsilon} (1 + \hat{x}'(XX')^{-1}\hat{x})^{1/2} \quad (۸)$$

که در رابطه بالا،  $t_{\frac{\alpha}{2}, df}$  نشان دهنده مقدار توزیع t با درجه آزادی df است و X ماتریس مقادیر متغیر مستقل است که در برآورد رگرسیون مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۳-۲. ارزیابی نهایی از اثر افزایشی-کاهشی یا عدم تأثیر عملیات بارورسازی

پس از محاسبه بازه اطمینان پیش بینی متغیر وابسته، افزایش یا کاهش بارش یک ایستگاه (یا حجم بارش در یک منطقه) به شکل زیر تعیین می شود:

- اگر ارتفاع بارش مشاهداتی سال ۲۰۱۵ ایستگاه هدف مربوطه (یا حجم بارش مشاهداتی در منطقه هدف استان مربوطه) در ماه مورد نظر بیش از حد بالای پیش بینی رگرسیون چندگانه باشد، افزایش بارش ناشی از بارورسازی برای آن ایستگاه (یا افزایش حجم بارش ناشی از بارورسازی در آن استان) تعیین می شود.

- اگر ارتفاع بارش مشاهداتی سال ۲۰۱۵ ایستگاه هدف مربوطه (یا حجم بارش مشاهداتی در منطقه هدف استان مربوطه) در ماه مورد نظر کمتر از حد پایین پیش بینی رگرسیون چندگانه باشد، کاهش بارش ناشی از بارورسازی برای آن ایستگاه (یا کاهش حجم بارش ناشی از بارورسازی در آن استان) تعیین می شود.

- اگر ارتفاع بارش مشاهداتی سال ۲۰۱۵ ایستگاه هدف مربوطه (یا حجم بارش مشاهداتی در منطقه هدف استان مربوطه) در ماه مورد نظر در درون بازه اطمینان پیش بینی رگرسیون چندگانه قرار گرفته باشد، کاهش یا افزایش معنی داری ناشی از بارورسازی برای بارش آن ایستگاه

پس از محاسبه ضرایب رگرسیون چندگانه، فرضیات اساسی مدل رگرسیون خطی چندگانه شامل استقلال زمانی خطاها و توزیع نرمال خطاها بررسی شده است. در صورتی که این فرضیات برقرار باشد مدل مورد تأیید بوده و برای تعیین اثرات افزایشی یا کاهشی بارورسازی مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۳-۱. تعیین بازه اطمینان پیش بینی با سطح اطمینان مورد نظر

پس از انجام فرایند رگرسیون چندگانه گام به گام و برآورد مدل های رگرسیون چندگانه برای هر ایستگاه هدف (در ارزیابی ایستگاهی) یا برای حجم بارش در هر منطقه (در ارزیابی منطقه ای)، در این مرحله از مدل های رگرسیونی برآورد شده به منظور ارزیابی اثرات بارورسازی استفاده شده است. روش انجام کار به این ترتیب است که ابتدا با توجه به داده های سال ۲۰۱۵ در ایستگاه های کنترل متناظر با هر ایستگاه/منطقه هدف (یعنی ایستگاه های کنترلی که با انجام رگرسیون چندگانه گام به گام به عنوان متغیر مستقل در رگرسیون مربوط به هر ایستگاه/منطقه هدف انتخاب شده اند)، مقدار بارش ایستگاه هدف مربوطه (یا حجم بارش منطقه هدف مربوطه) در سال ۲۰۱۵ در هر یک از ماه های مورد بررسی پیش بینی شده است. اگر مقادیر متغیرهای مستقل جدید را با  $\hat{X}$  و ماتریس شیب رابطه رگرسیون چندگانه را با a و عرض از مبدا رگرسیون را با b نشان دهیم، مقدار پیش بینی متغیر وابسته یعنی بارش در ایستگاه هدف مورد نظر (یا حجم بارش در منطقه هدف مورد نظر)،  $\hat{y}$ ، به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\hat{y} = a\hat{x} + b \quad (۹)$$

می توان برای مقدار این پیش بینی، یک بازه اطمینان محاسبه کرد. برای محاسبه بازه اطمینان، ابتدا لازم است وردایی (واریانس) خطاهای مدل رگرسیون برآورد شود:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{RSS}{df} \quad (۷)$$



بارورسازی بر ارتفاع بارش در هر ایستگاه واقع در منطقه هدف مورد بررسی قرار گرفته و در روش دوم اثرات بارورسازی بر حجم بارش در منطقه هدف درون هر استان مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱. مناطق هدف

مناطق هدف ماه‌های مختلف در منطقه مرکزی ایران بر اساس مدل HYSPLIT تعیین شده است. اما با توجه به فقدان ایستگاه‌های کافی در تمام سطح این مناطق و با توجه به اینکه قضاوت در مورد قسمت‌های خالی از ایستگاه نمی‌تواند قابل قبول باشد، قسمت‌هایی از مناطق هدف که خالی از ایستگاه بودند از محاسبات مربوط به حجم بارش کنار گذاشته شدند. به منظور تعیین مناطقی که باید از محاسبات کنار گذاشته شوند، از شعاع تأثیر ایستگاه‌ها با استفاده از روش معکوس فاصله وزن‌دار، استفاده شده است. در این روش، فرض در تخمین مقدار پارامتر مورد بررسی در نقطه مورد نظر به صورت مجموع وزن‌داری از مقادیر مشاهده شده در ایستگاه‌های همجوار می‌باشد که در شعاع همسایگی خاصی قرار گرفته‌اند. مقدار شعاع تأثیر برای هر یک از ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس در منطقه مرکزی به ترتیب مقادیر ۹۳۹۴۰، ۸۹۵۶۹ و ۱۴۹۰۱۵ متر به دست آمده که کمترین مقدار این شعاع یعنی ۸۹۵۶۹ متر به عنوان شعاع تأثیر نهایی برای منطقه مطالعاتی ایران مرکزی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که اختلاف مقادیر شعاع تأثیر به علت تفاوت در پراکندگی ایستگاه‌هایی است که در این ماه‌ها دارای اطلاعات ثبت شده بوده‌اند.

### ۳-۲. نتایج ارزیابی ایستگاهی

نتایج استفاده از روش ارزیابی ایستگاهی در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس به ترتیب در شکل ۴، تا شکل ۶ نشان داده شده است. چنان که پیش‌تر گفته شد، در هر دو ارزیابی ایستگاهی و ارزیابی منطقه‌ای حداقل ضریب تعیین رگرسیون چندگانه مورد تأیید ۰/۶ بوده است. یعنی

قابل تشخیص نیست.

همچنین آستانه حداقل ضریب تعیین مورد قبول مقدار ۰/۶ بوده و در مواردی که ضریب تعیین رگرسیون چندگانه کمتر از ۰/۶ باشد نتیجه‌ای برای آن ایستگاه گزارش نشده و ایستگاه به صورت "غیر قابل ارزیابی" تعیین شده است.

در ادامه به بررسی نتایج ارزیابی آماری بر اساس روش‌شناسی ارائه شده پرداخته شده است.

### ۳. نتایج

هدف این تحقیق ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها در سال آبی ۹۳-۹۴ (سال ۲۰۱۵) در منطقه مرکزی ایران شامل استان‌های یزد، کرمان، فارس، اصفهان و برخی مناطق مجاور است. در شکل ۳ محدوده عملیاتی این پروژه نشان داده شده است. داده‌های مربوط به سال‌های آبی ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۱ جهت برآورد مدل‌های رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام مورد استفاده قرار گرفته‌اند و سپس از مدل برآورد شده جهت ارزیابی اثرات عملیات در سال آبی ۹۳-۹۴ استفاده شده است. از میان داده‌های مورد استفاده داده‌های مربوط به سال‌هایی که در آنها عملیات بارورسازی ابرها انجام شده و داده‌ها خارج از شرایط طبیعی بوده از مجموعه داده کنار گذاشته شده‌اند. به این ترتیب مجموعاً داده ۲۶ سال مختلف به منظور مدل رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام مورد استفاده قرار گرفته است. جهت انجام تحلیل رگرسیونی از جعبه ابزار Stepwiseregression در نرم‌افزار Matlab نسخه ۲۰۱۶ بهره گرفته شده است. عملیات بارورسازی مورد بررسی آخرین عملیات بارورسازی انجام شده در زمان انجام پژوهش حاضر در این منطقه بوده است.

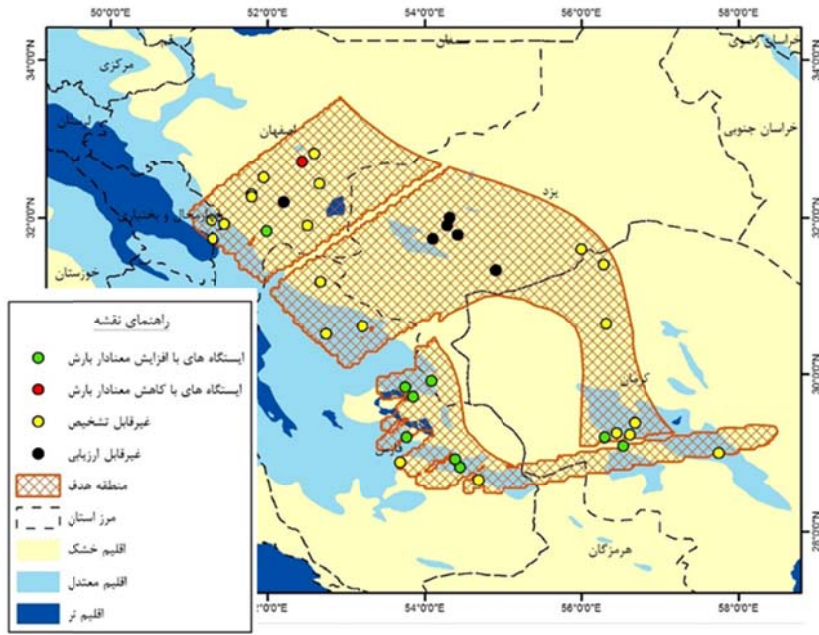
عملیات‌های بارورسازی در محدوده ایران مرکزی در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس انجام شده که عملیات مربوط به هر کدام از این ماه‌ها منطقه هدف متفاوتی دارند. چنان که پیش‌تر گفته شد ارزیابی اثرات بارورسازی به دو روش مختلف انجام شده است. در روش اول اثرات

است. با این حال در مورد سایر نواحی نمی‌توان قضاوت روشنی داشت. از سوی دیگر در ماه فوریه به غیر از قسمت جنوب شرقی حوضه در سایر قسمت‌ها افزایش معنی‌دار بارش با اطمینان ۹۰ درصد مشخص شده است. در ماه مارس نیز قسمت‌های شمال و شرق حوضه افزایش معنی‌دار بارش را در اثر عملیات بارورسازی تجربه کرده‌اند.

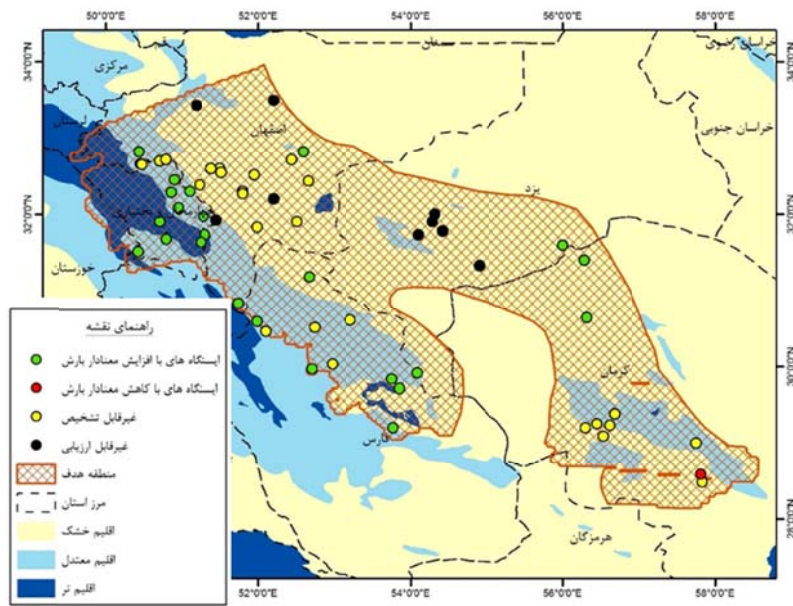
چنان‌که ضریب تعیین رگرسیون کمتر از این مقدار بوده باشد ایستگاه به‌عنوان غیر قابل‌ارزیابی نشان داده شده است. ضریب تعیین متوسط ایستگاه‌های ارزیابی شده در ماه ژانویه بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۷، در ماه فوریه بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۸ و در ماه مارس ۰/۶۴ تا ۰/۹۳ بوده است. چنان‌که دیده می‌شود در ماه ژانویه ایستگاه‌های واقع در قسمت جنوبی و جنوب‌غربی منطقه هدف، افزایش معنی‌داری را در اثر عملیات بارورسازی تجربه کرده



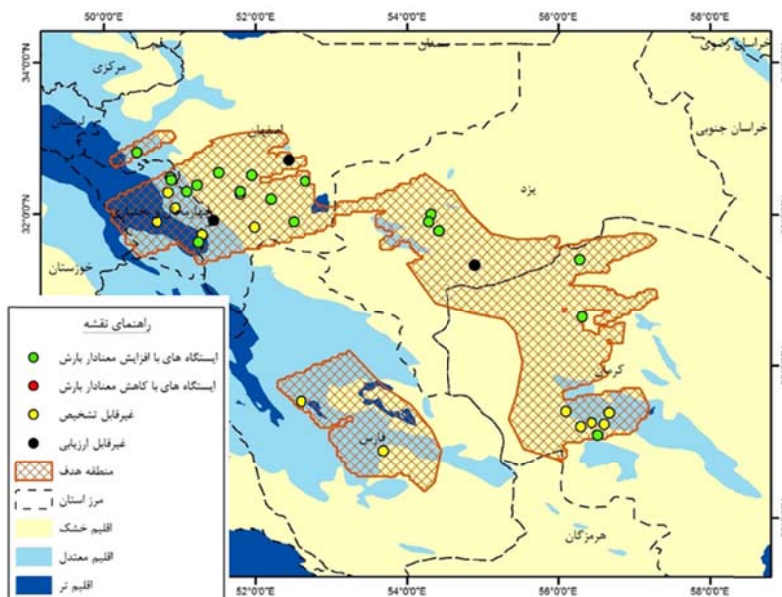
شکل ۳. محدوده عملیاتی پروژه آبی مرکزی ایران در سال‌های ۹۳-۹۴.



شکل ۴. نتایج ارزیابی ایستگاهی در ماه ژانویه در ایران مرکزی.



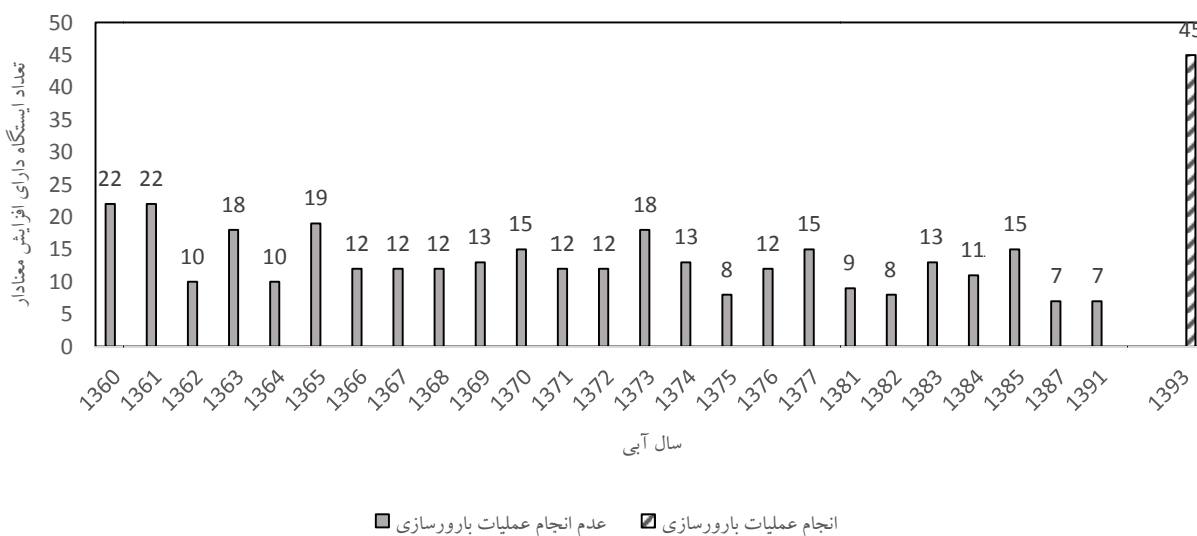
شکل ۵. نتایج ارزیابی ایستگاهی در ماه فوریه در ایران مرکزی.



شکل ۶. نتایج ارزیابی ایستگاهی در ماه مارس در ایران مرکزی.

سال‌های مختلف در دوره ۱۳۶۰-۱۳۹۱ نشان داده است. بر اساس این شکل دیده می‌شود که تحلیل رگرسیونی به‌طور معناداری تعداد ایستگاه‌های افزایشی بیشتری را در سال انجام عملیات بارورسازی مشخص کرده است. واقع در سال‌های دیگر که عملیات بارورسازی انجام نشده نتایج پیش‌بینی مدل رگرسیونی در عمده ایستگاه‌های این منطقه به طرز معنی‌داری نزدیک به مقادیر مشاهداتی بارش بوده است.

به‌منظور تأیید اعتبار مدل رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام مورد استفاده جهت تعیین اثرات عملیات بارورسازی ابرها، از همین مدل جهت تحلیل سال‌های دیگر، که در آنها عملیات بارورسازی در این منطقه صورت نگرفته، استفاده شده است. بدیهی است که در این تحلیل نتایج انتظار می‌رود که پیش‌بینی مدل به‌طور معنی‌داری با مقادیر مشاهداتی ایستگاه برابری کند. در شکل ۷ تعداد افزایش بارش به‌دست آمده از تحلیل رگرسیونی مورد استفاده در



شکل ۷. تعداد ایستگاه دارای افزایش معنادار در تحلیل رگرسیون چندگانه برای سال‌های مختلف در سال‌های فاقد عملیات بارورسازی و سال انجام عملیات بارورسازی.

## ۳-۳. نتایج ارزیابی منطقه‌ای

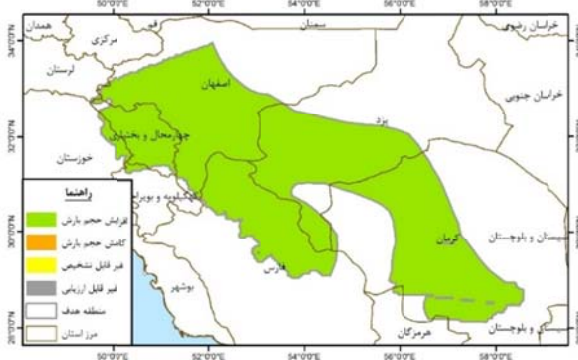
استان‌های کرمان و اصفهان) و یا تأثیر کاهش در اثر بارورسازی را تجربه کرده‌اند (قسمت‌های واقع در استان فارس). تنها در ماه فوریه است که تمام منطقه مورد بررسی تحت تأثیر بارورسازی افزایش معنی‌دار در بارش را تجربه کرده‌اند. میزان تغییرات معنی‌دار حجم بارش در استان‌های مختلف در اثر انجام عملیات بارورسازی در جدول ۱ ارائه شده است. چنان‌که دیده می‌شود علی‌رغم دو تأثیر کاهش برآورد شده در ماه‌های ژانویه و مارس، در مجموع سه ماه در کل منطقه، افزایش بارش در اثر عملیات بارورسازی ابرها تشخیص داده شده که بیشترین سهم از این افزایش بارش مربوط به استان چهارمحال و بختیاری است. لازم به ذکر است به دلیل پراکنش نامناسب ایستگاه‌ها در استان‌های فارس، یزد و کرمان، برآوردهای انجام شده در این استان‌ها از عدم قطعیت بیشتری نسبت به سایر استان‌ها برخوردار است.

## ۳-۴. بررسی منافع حاصل از اجرای عملیات بارورسازی شامل افزایش رواناب و تغذیه آب‌های زیرزمینی

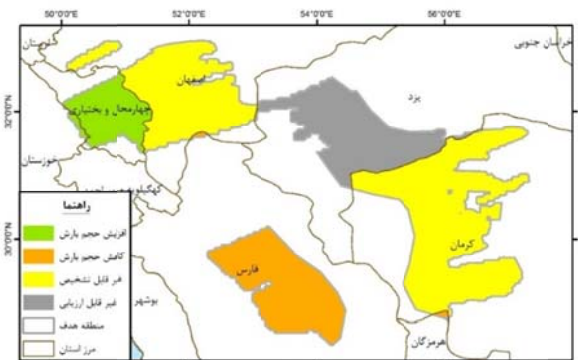
یکی از مهم‌ترین منافع حاصل از اجرای پروژه‌های بارورسازی ابرها، افزایش رواناب در اثر افزایش بارش ناشی از اجرای پروژه است. در همین راستا، تعیین میزان رواناب استحصال حاصل از اجرای پروژه‌های بارورسازی ابرها یک گام مهم در ارزیابی موفقیت پروژه و کارایی اقتصادی آن است. به همین منظور، در این قسمت از دو روش مختلف برای برآورد رواناب استفاده شده است. روش اول، روش شماره منحنی مربوط به اداره حفاظت خاک آمریکا (SCS) است. مزیت این روش، سادگی آن و در نظر گرفتن عوامل اصلی تأثیرگذار بر فرایند شکل‌گیری رواناب است. اما این روش بیشتر مناسب مناطق با سطح محدود و تغییرات ارتفاعی کم است. به همین دلیل، از روش دیگری موسوم به روش استدلالی نیز استفاده شده است. در روش استدلالی، پارامتر اصلی

در شکل ۸ تا شکل ۱۰ نتایج ارزیابی منطقه‌ای نشان داده شده است. ضریب تعیین مدل رگرسیون چندگانه در ماه ژانویه بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۱، در ماه فوریه بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۲ و در ماه مارس بین ۰/۷۷ تا ۰/۹۵ است. بر اساس این نتایج در ماه ژانویه قسمت غربی منطقه شامل استان‌های فارس، چهارمحال و بختیاری و اصفهان که به طور کامل تحت تأثیر عملیات بارورسازی قرار داشته است افزایش معنی‌دار حجم بارش را تجربه کرده است. همچنین در ماه فوریه کل منطقه هدف واقع در استان‌های فارس، چهارمحال و بختیاری، اصفهان، یزد و کرمان افزایش معنی‌دار حجم بارش را تجربه کرده‌اند. اما در ماه مارس تنها استان چهارمحال و بختیاری افزایش معنی‌داری در حجم بارش داشته و در سایر مناطق تأثیر، افزایشی معنی‌داری از بارورسازی تعیین نشده است. همچنین در ماه ژانویه تأثیر کاهش از عملیات بارورسازی در استان یزد تعیین شده و در ماه مارس نیز تأثیر کاهش در استان فارس تعیین شده است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که در ماه مارس قسمت عمده منطقه مورد بررسی غیرقابل ارزیابی (به دلیل پایین بودن ضریب تعیین) و یا غیرقابل تشخیص بوده و به عبارت دیگر اثر بارورسازی در این مناطق معنی‌دار نبوده است. در ماه ژانویه نیز اثر بارورسازی بر قسمت جنوب شرقی حوضه غیرقابل تشخیص است. در صورتی که از نظر مساحت قسمت‌های مختلف منطقه هدف، تأثیر بارورسازی بررسی شود، خواهیم دید که در ماه ژانویه تقریباً نیمی از منطقه مورد بررسی، تأثیر افزایشی ناشی از بارورسازی را با سطح اطمینان ۹۰ درصد تجربه کرده‌اند. اما در نیم دیگر منطقه تأثیر بارورسازی یا قابل تشخیص نبوده (نواحی واقع در استان کرمان) و یا تأثیر کاهش بر بارش داشته است (نواحی واقع در استان یزد). در ماه مارس نیز تنها بخش کوچکی که در استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد تحت تأثیر افزایشی بارورسازی داشته و مابقی منطقه یا تأثیر معنی‌داری نشان نداده‌اند (مانند نواحی واقع در

شکل ۸. نتایج ارزیابی منطقه‌ای در ماه ژانویه در ایران مرکزی.



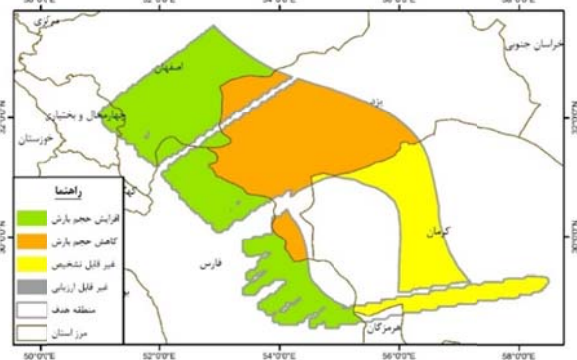
شکل ۹. نتایج ارزیابی منطقه‌ای در ماه فوریه در ایران مرکزی.



شکل ۱۰. نتایج ارزیابی منطقه‌ای در ماه مارس در ایران مرکزی.

تعیین کننده میزان رواناب، ضریب رواناب است که بیانگر درصدی از بارش است که تبدیل به رواناب می‌شود. عامل اصلی تأثیرگذار بر ضریب رواناب شیب منطقه مورد بررسی است. بر همین اساس ضریب رواناب بر اساس نیم‌رخ شیب منطقه تعیین می‌شود. برای مطالعه جزئیات بیشتر در مورد این دو روش به صفوی (۱۳۸۸) مراجعه شود. در جدول ۲ تا جدول ۴، میزان رواناب تولیدی حاصل

از افزایش بارش در اثر انجام پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵ (سال آبی ۹۳-۹۴)، بر اساس دو روش SCS و روش استدلالی ارائه شده است. مقادیر رواناب ارائه شده بر حسب میلیون مترمکعب هستند. لازم به ذکر است در این بخش، تنها استان‌هایی مد نظر هستند که بر اساس بررسی‌های آماری، افزایش معنی‌دار حجم بارش در این استان‌ها تشخیص داده شده است.



جدول ۱. میزان افزایش حجم بارش برآورد شده در هر استان در مجموع ۳ ماه مورد بررسی (میلیون مترمکعب).

اصفهان	چهارمحال و بختیاری	فارس	یزد	خوزستان	کهگیلویه و بویراحمد	اصفهان
۶۱۵	۱۵۳۵	۱۸۸	۳۵۲	۱۴۷	۳۵	۱۰۲۳

جدول ۲. رواناب استحصالی برآورد شده ناشی از افزایش بارش در اثر انجام پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵، ماه ژانویه (MCM).

نام استان	اصفهان	فارس	چهارمحال و بختیاری
روش SCS-CN	۰	۳۵/۵	۰/۱
روش استدلالی	۲۶	۵۹	۳/۷

جدول ۳. رواناب استحصالی برآورد شده ناشی از افزایش بارش در اثر انجام پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵، ماه فوریه (MCM).

نام استان	کرمان	یزد	اصفهان	فارس	چهارمحال و بختیاری	کهگیلویه و بویراحمد	خوزستان	لرستان
روش SCS-CN	۳۲۰/۴	۱۱۴/۸	۸۴/۲	۷۵/۳	۳۳۰/۹	۱۷/۹	۶۳/۱	۰/۶
روش استدلالی	۱۸۶/۹	۷۲/۳	۱۰۷/۶	۵۳/۸	۲۸۶/۲	۱۸/۸	۶۱/۷	۰/۹

به منظور تعیین ضریب نفوذ آب زیرزمینی، محدوده‌های مطالعاتی قرار گرفته در محدوده منطقه هدف هر استان بر اساس نقشه‌های GIS استخراج شده و ضریب نفوذ هر محدوده مطالعاتی بر اساس گزارش‌های بیلان طرح جامع آب کشور استخراج شده است. سپس بر اساس مساحت هر ناحیه مطالعاتی، میانگین وزنی ضریب نفوذ نواحی مطالعاتی قرار گرفته در منطقه هدف هر استان، به عنوان ضریب نفوذ آن استان در نظر گرفته شده است. به این ترتیب نفوذ آب زیرزمینی در استان‌های مختلف محاسبه شده که این مقادیر برای استان‌های مختلف در جدول ۵ ارائه شده است.

در مجموع در پروژه ایران مرکزی، بر اساس روش SCS، مجموعاً ۱۳۱۸/۵ میلیون مترمکعب افزایش رواناب برآورد شده و بر اساس روش استدلالی مقدار افزایش رواناب ۱۳۲۹/۵ میلیون مترمکعب بوده است. بخش دیگری از منافع حاصل از پروژه‌های بارورسازی ابرها مربوط به میزان افزایش نفوذ و تغذیه منابع آب زیرزمینی در اثر افزایش بارش در مناطق مختلف است. به منظور تعیین میزان تغذیه آب زیرزمینی، لازم است ضریب نفوذ به آب زیرزمینی در مناطق مختلف تعیین شود. این ضریب، نشان‌دهنده سهمی از بارش است که نفوذ کرده و سبب تغذیه آب زیرزمینی می‌شود.

جدول ۴. رواناب استحصالی برآورد شده ناشی از افزایش بارش در اثر انجام پروژه بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵، ماه مارس (MCM).

نام استان	چهارم‌محال و بختیاری	خوزستان
روش SCS-CN	۲۶۶/۷	۹
روش استدلالی	۴۳۷/۶	۱۵

جدول ۵. مقادیر افزایش نفوذ به آب زیرزمینی در اثر افزایش بارش ناشی از اجرای پروژه‌های بارورسازی ابرها در سال ۲۰۱۵ (MCM).

زمان (ماه)	اصفهان	فارس	چهارم‌محال و بختیاری	کهگیلویه و بویراحمد	خوزستان	کرمان	سمنان	قزوین	تهران	البرز	یزد	لرستان
ژانویه	۳۰/۲	۷۱/۸	۳/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۳	۳/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
فوریه	۸۰/۹	۶۹/۲	۱۲۹/۴	۴/۲	۱/۸	۱۱۲/۶	۰/۰	۰/۰	۳۲/۶	۴/۶	۲۷/۳	۰/۳
مارس	۰/۰	۰/۰	۱۵۵/۷	۰/۰	۰/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰

منطقه به دو روش ایستگاهی و منطقه‌ای انجام شده که نتایج آن را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:  
(الف) نتایج هر دو روش ارزیابی ایستگاهی و منطقه‌ای حاکی از اثر معنی‌دار عملیات بارورسازی بر افزایش بارش در نواحی واقع در منطقه هدف عملیات بارورسازی بوده و به طور مشخص اثر افزایش در ماه فوریه قابل توجه بوده است. به گونه‌ای که حجم بارش در تمام منطقه هدف افزایش معنی‌داری در اثر عملیات بارورسازی ابرها تجربه کرده است. در دو مورد نیز اثر کاهشی معنی‌دار در اثر عملیات بارورسازی ابرها در ارزیابی حجم بارش استانی (استان یزد در ماه ژانویه و استان فارس در ماه مارس)

به این ترتیب در پروژه ایران مرکزی در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس به ترتیب ۱۰۵/۳، ۴۲۵/۶ و ۱۵۶/۳ میلیون مترمکعب افزایش نفوذ به آب زیرزمینی برآورد شده است.

#### ۴. جمع‌بندی

پروژه "ایران مرکزی ۵" مربوط به ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس سال ۲۰۱۵ میلادی است. منطقه هدف این پروژه شامل استان‌های یزد، کرمان، فارس، اصفهان، چهارم‌محال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد بوده است. ارزیابی اثرات پروژه باروری در سه ماه موردنظر در این



تعیین شده است.

(ب) در صورتی که تأثیر بارورسازی از نظر اثرگذاری بر مساحت‌های مختلف در منطقه هدف بررسی شود، مشاهده می‌شود که در ماه ژانویه تقریباً در نیمی از منطقه، تأثیر بارورسازی قابل تشخیص نبوده (نواحی واقع در استان کرمان) و یا تأثیر کاهشی بر بارش داشته است (نواحی واقع در استان یزد). در ماه مارس نیز تنها بخش کوچکی که در استان چهارمحال و بختیاری قرار گرفته، تأثیر افزایشی بارورسازی داشته است. باقی منطقه یا تأثیر معنی‌داری نشان نداده‌اند (مانند نواحی واقع در استان‌های کرمان و اصفهان) و یا تأثیر کاهشی در اثر بارورسازی را تجربه کرده‌اند (قسمت‌های واقع در استان فارس). تنها در ماه فوریه است که تمام منطقه مورد بررسی تحت تأثیر بارورسازی افزایش معنی‌دار در بارش را تجربه کرده‌اند. علی‌رغم موارد اشاره شده در فوق، حجم کل بارش افزایش یافته برآورد شده در منطقه هدف در مجموع ۳ ماه قابل توجه بوده و به‌خصوص افزایش بارش در استان چهارمحال و بختیاری (با توجه به مساحت کم منطقه هدف واقع در این استان) چشمگیر بوده است.

(ج) رواناب حاصل از افزایش بارش ناشی از باروری با استفاده از دو روش SCS و روش استدلالی تعیین شده است. بر همین اساس با روش SCS مجموعاً ۱۳۱۸/۵ میلیون مترمکعب و با روش استدلالی ۱۳۲۹/۵ میلیون مترمکعب رواناب حاصل از اجرای پروژه باروری تعیین شده است. همچنین از نظر میزان تغذیه آب زیرزمینی نیز در پروژه ایران مرکزی در سه ماه ژانویه، فوریه و مارس به ترتیب ۱۰۵/۳، ۴۲۵/۶ و ۱۵۶/۳ میلیون مترمکعب افزایش نفوذ آب زیرزمینی برآورد شده است. لازم به ذکر است که با توجه به مبنای آماری روش برآورد، عدم قطعیت‌های اعداد برآورد شده زیاد و صرفاً در ارزیابی کلی حدود اثربخشی عملیات باروری قابل استفاده هستند و اعداد به‌طور دقیق نباید مبنای برنامه‌ریزی منابع آب قرار گیرند.

برخی محدودیت‌ها در ارزیابی ایستگاهی و منطقه‌ای به

روش فوق وجود دارد که ذکر آن حائز اهمیت است. اولاً با توجه به اینکه منطقه کنترل باید در بالادست منطقه تحت تأثیر مواد باروری انتخاب شود، ایستگاه‌های کنترل در پاره‌ای از مواقع فاصله قابل توجهی با برخی ایستگاه‌های هدف دارند. این مسئله ممکن است در مواردی منجر به برقراری رابطه رگرسیون بین یک ایستگاه و ایستگاه دیگری شود که فاصله زیادی با ایستگاه مورد نظر دارد. همچنین با توجه به اینکه منطقه کنترل فقط محدود به بالادست منطقه تحت تأثیر مواد باروری است، تعداد ایستگاه‌های کنترل محدود است که این مسئله نیز می‌تواند بر کارایی روش اثر بگذارد. با این حال در منطقه مورد بررسی در اغلب موارد ضرایب تعیین رگرسیون مقادیر مناسبی داشته‌اند و بر همین اساس می‌توان گفت ارزیابی ایستگاهی و منطقه‌ای در این محدوده تحت تأثیر این محدودیت‌ها قرار نگرفته است.

### تشکر و قدردانی

نتایج ارائه شده در این مقاله، بخشی از نتایج پروژه ارزیابی عملیات باروری ابرها در سال ۹۳-۹۴ هستند که به سفارش مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها و با حمایت مالی مؤسسه تحقیقات آب توسط مؤسسه آب دانشگاه تهران صورت گرفته است. در بخش‌هایی از این طرح تحقیقاتی، خانم دکتر مریم قرایلو عضو هیأت علمی دانشگاه تهران و خانم مهندس هما صالح‌آبادی همکاری کردند. بدین‌وسیله از راهنمایی‌های ارزشمند آقای دکتر جوادیان‌زاده، ریاست وقت مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها و خانم

مهندس سیدحسنی کارشناس ارشد آن مرکز که در مراحل مختلف این تحقیق، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار قرار دادند، تشکر و تقدیر می‌شود.

### مراجع

سیدحسنی، م.، مرادیان، ف.، قادر، س.، گلکار، ف. و



صفوی، ح. ر.، ۱۳۸۸، هیدرولوژی مهندسی، ویرایش دوم، انتشارات ارکان دانش.  
 مؤسسه آب دانشگاه تهران، ۱۳۹۶، ارزیابی پروژه‌های باروری ابرها در سال آبی ۹۳-۹۴ (منطقه عملیاتی ایران مرکزی).

حاتم‌پور، م.، ۱۳۹۷، تعیین مناطق هدف در پروژه‌های عملیاتی بارورسازی ابرها در ایران به کمک شبیه‌سازی پخش مواد باروری با استفاده از مدل پاشندگی HYSPLIT، مجله ژئوفیزیکی ایران، ۱۲(۴)، ۱-۳۰.

- Abedini, M. J., Nasserri, M. and Ansari, A., 2008, Cluster-based ordinary kriging of piezometric head in West Texas/New Mexico-testing of hypothesis, *Journal of Hydrology*, 351, 360-367.
- ASCE, 2016, Guidelines to cloud seeding to augment precipitation, American Society of Civil Engineers, 2<sup>nd</sup> Edition.
- DeFelice, T. P., Golden, J., Griffith, D., Woodley, W., Rosenfeld, D., Breed, D., Solak, M. and Boe, B., 2014, Extra area effects of cloud seeding-An updated assessment, *Atmospheric Research*, 135, 193-203.
- Dennis, A. S., 1980, Weather Modification by cloud seeding, International Geophysics Series, 24, Academic Press, New York.
- Griffith, D. A., Yorty, D. and Beall, S., 2015, Target/control analyses for Santa Barbara county's operational winter cloud seeding program, *The Journal of Weather Modification*, 47(1)-10.
- Griffith, D. A., Solak, M. E. and Yorty, D. P., 2009, 30+ Winter seasons of operational cloud seeding in Utah, *WMA Journal of Weather Modification*, 41, 23-37.
- Griffith, D. A., Solak, M. E. and Yorty, D. P., 2011, A Winter operational cloud seeding program: Upper Gunnison river basin, Colorado, *WMA Journal of Weather Modification*, 43, 29-43.
- Kulkarni, J. R., Morwal, S. B. and Deshpande, N. R., 2019, Rainfall enhancement in Karnataka state cloud seeding program "Varshadhare" 2017, *Atmospheric Research*, 219, 65-76.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J. and Neter, J., 2005, Applied linear statistical models, McGraw Hill.
- Manton, M. J., Peace, A. D., Kemsley, K., Kenyon, S., Speirs, J. C., Warren, L. and Denholm, J., 2017, Further analysis of a snowfall enhancement project in the Snowy Mountains of Australia, *Atmospheric Research*, 193, 192-203.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. and Vining, G. G., 2012, Introduction to linear regression analysis, Fifth edition, John Wiley & Sons.
- NRC, 2004, Critical issues in weather modification research. National Academies Press.
- Orville, H. D., Boe, B. A., Bomar, G. W., Cotton, W. R., Marler, B. L. and Warburton, J. A., 2004, A Response by the Weather Modification Association to a National Research Council Report. Weather Modification Association.
- Silverman, B. A., 2007, On the use of ratio statistics for the evaluation of operational cloud seeding programs, *WMA Journal of Weather Modification*, 39, 50-59.
- Silverman, B. A., 2009, An Independent statistical evaluation of the Vail operational cloud seeding program, *WMA Journal of Weather Modification*, 41, 7-14.
- Silverman, B. A., 2010, An evaluation of eleven operational cloud seeding programs in the watersheds of the Sierra Nevada Mountains, *Atmospheric Research*, 97, 526-539.
- Weisberg, S., 2013, Applied linear regression, John Wiley & Sons.

## Statistical Evaluation of Cloud Seeding Operations in Central Plateau of Iran in the 2015 Water Year

Zahraie, B.<sup>1\*</sup>, Poursepahy Samian, H.<sup>2</sup>, Nasserri, M.<sup>3</sup> and Taheri, S. M.<sup>4</sup>

1. Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Post-Doc Researcher, Water Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Professor, School of Engineering Science, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 4 Nov 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

### Summary

Iran is located in an arid and semi-arid region and has experienced a reduction of average rainfall in recent years. This has turned the attention to the use of new methods such as cloud seeding to achieve more water resources. In this regard, cloud seeding operations have been carried out in the country since 1998. The purpose of this study was to evaluate cloud seeding projects in the 2015 water year (January, February, and March 2015) in the central region of Iran, including the provinces of Yazd, Kerman, Fars, Isfahan, and some adjacent provinces. The evaluation was performed statistically using stepwise multiple regression. Two different approaches have been used for evaluation. In the first approach, precipitation at stations located in the target area of cloud seeding operations is estimated based on the precipitation at stations in the control area using stepwise multiple regression and then taking into account a 90% confidence interval for this estimate, the effectiveness or ineffectiveness of the cloud seeding operation at each station is determined. In the second approach, the volume of precipitation in each province in the target area is estimated based on the precipitation in stations outside in the control area using stepwise multiple regression and then by considering a 90% confidence interval for this estimate, the effectiveness of cloud seeding operations on the rainfall volume of each province has been investigated. The target area in different months was selected based on the HYSPLIT model results. Due to the inconsistent spatial distribution of rain gauges in the target areas, parts of the target areas lacking enough rain gauges were excluded from further analysis. To define the boundaries of the exclusion areas, Inverse Distance Weighted (IDW) method was used to find the influence of the radius around each rain gauge. The influence radius values were selected as 93940, 89569, and 149015 m for the months of January, February, and March, respectively. Finally, the minimum value of 89569 m was selected as the influence radius. The results of both methods indicate the impact of cloud seeding operations this year in these areas. In particular, the volume of precipitation in February in all provinces located in the target area of cloud seeding operations has increased from 15 to 80 percent. Surface runoff generated from the increased precipitation due to cloud seeding were estimated by the two methods of Soil Conservation Service (SCS) and Rational method. The estimated surface runoffs generated by SCS and rational methods were 1318.5 and 1329.5 million m<sup>3</sup>, respectively. The groundwater recharge in the three months of January, February, and March is estimated as 105.3, 425.6, and 156.3 million m<sup>3</sup>, respectively. It is important to note that runoff and groundwater recharge estimations by the method used in this study are subject to high uncertainties, and the estimations can only represent the order of magnitude of impacts of cloud seeding operations, and therefore, exact numbers should not be used for water resources planning and management purposes. Further investigation in areas with more rain gauges can assist in a more accurate assessment of cloud seeding operations.

**Keywords:** Weather Modification, Stepwise Multiple Regression, Linear Multiple Regression, Statistical Analysis, Cloud Seeding, Central Plateau of Iran.

\* Corresponding author:

bzahraie@ut.ac.ir