

## بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی ایران براساس روش‌های میان‌یابی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

زهرا گرکانی‌نژاد مشیزی<sup>۱</sup>، فاطمه تیموری<sup>۲</sup>، ام‌البنین بذرافشان<sup>۳\*</sup>

۱ و ۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۳. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۱۰)

### چکیده

بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک در تخمین میزان بارندگی به لحاظ کاهش هزینه تعمیر و نگهداری، گامی مهم است. هدف اصلی این تحقیق، تعیین تعداد بهینه ایستگاه‌های سینوپتیک برای تخمین میزان بارندگی است. بر این اساس، ابتدا مقادیر باران ایستگاه‌های سینوپتیک مربوط به دوره آماری مشترک ۱۴ ساله از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد و عملکرد پنج روش مختلف درون‌یابی ارزیابی شد. با توجه به نتایج، روش تابع پایه شعاعی (RBF)، با میزان خطای ۰/۶۳ به‌عنوان مناسب‌ترین روش برآزش داده، انتخاب شد و سپس با استفاده از روش یادشده و PCA بهینه‌سازی ایستگاه‌ها صورت پذیرفت. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد با حذف ایستگاه‌های سینوپتیک در روش PCA خطای برآورد RMSE از ۰/۴۸ به ۰/۵۲ نسبت به حالتی که از همه ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده می‌شد، افزایش یافت و در روش میان‌یابی تابع پایه شعاعی میزان خطا از ۰/۶۳ به ۰/۵۵ کاهش یافت که بیان‌کننده مناسب بودن این روش در بهینه‌سازی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور است. نتایج بیان می‌کند که با حذف ۳۴ نقطه در روش PCA و ۲۲ نقطه در روش میان‌یابی تابع پایه شعاعی از شبکه ایستگاه‌های سینوپتیک ایران مقدار خطای به‌دست‌آمده قابل قبول است.

**کلیدواژه‌گان:** اعتبارسنجی، ایستگاه سینوپتیک، بهینه‌سازی، درون‌یابی، PCA.

## مقدمه

بارندگی یکی از موضوعات مهم در بیشتر مسائل هیدرولوژیکی و مطالعات منابع آب است که در دسترس بودن آمار و اطلاعات مربوط به آن اهمیت ویژه‌ای دارد [۱]. بارندگی یکی از متغیرهای مهم ورودی به سیستم‌های هیدرولوژیک به‌شمار می‌آید. اندازه‌گیری بارش برای مطالعات رواناب، آب‌های زیرزمینی، سیلاب، رسوب و... ضروری است [۲]. داده‌های بارش در وظایف متعددی از مدیریت منابع آب از قبیل آنالیز و ارزیابی بودجه آب، آنالیز و پیش‌بینی سیل، برآورد وضعیت رودخانه‌ها و طراحی سازه‌های هیدرولیکی تأثیر دارند. یک شبکه باران‌سنجی قابل اعتماد و مطلوب می‌تواند داده‌های بارش دقیق و جامع برای طراحی مؤثر اقتصادی و ساختار هیدرولیکی به‌منظور کنترل سیلاب فراهم کند. شبکه باران‌سنجی ایستگاه‌های سینوپتیک معمولاً برای تسهیل در اندازه‌گیری مستقیم داده‌های بارش، تغییرات مکانی-زمانی و تغییر در الگوی بارش منطقه‌ای در نقاط مختلف نصب می‌شود [۳]. شبکه باران‌سنجی باید متراکم‌تر از شبکه‌های استفاده‌شده برای اندازه‌گیری سایر عناصر هواشناسی (مثل دما، رطوبت، تبخیر و فشار) باشد، چرا که الگوهای بارش بسیار متغیر است و توزیع مکانی آن را نمی‌توان به‌طور مؤثر و بدون داشتن شبکه‌ای متراکم نشان داد [۴]. یک شبکه باران‌سنجی خوب طراحی شده باید به تعداد کافی ایستگاه باران‌سنجی داشته باشد تا منعکس‌کننده تنوع مکانی-زمانی بارش در منطقه باشد [۵]. خطای طراحی پروژه‌های منابع آب در نهایت سبب خسارت‌های جانی و اقتصادی بسیار زیادی بر اثر استفاده از داده‌های بارش نادرست می‌شود. بنابراین، شناسایی و انتخاب شبکه باران‌سنجی با ایستگاه‌های بهینه و مکان و تعداد مطلوب از اهداف اصلی طراحی شبکه است. در این صورت می‌توان داده‌های بارش را با کمترین عدم اطمینان و هزینه به‌دست آورد [۶]. از طرفی، داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی در یک محدوده جغرافیایی به‌صورت نقطه‌ای برداشت می‌شود که باید این داده‌ها به منطقه تعمیم داده شوند که این کار را می‌توان به کمک اطلاعات بارندگی ایستگاه‌های مجاور انجام داد. از دیرباز تخمین درست بارندگی در سطح یک منطقه اهمیت فراوانی داشته است چرا که با در اختیارداشتن یک برآورد

صحیح می‌توان به اطلاعات بسیار بااهمیتی در مطالعات منطقه‌ای و مسائل مدیریت منابع آب دست یافت. اصلاح و طراحی یک شبکه باران‌سنجی به‌منظور افزایش دقت در تخمین مقادیر بارش، به یافتن موقعیت بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی نیاز دارد. بیشتر خطاهای تخمین بارش، ناشی از موقعیت باران‌سنج‌ها است که یک طراحی مناسب شبکه باران‌سنجی می‌تواند خطاهای مرتبط با اندازه‌گیری بارش را کاهش دهد [۷]. دو عامل تعداد و چگونگی توزیع مناسب باران‌سنج‌ها تأثیر اساسی در تعیین و محاسبه بارندگی متوسط یک حوضه دارند. به‌بیانی، تعیین دقت تخمین بارندگی در یک منطقه وابسته به صحت و دقت نقطه مکان‌یابی شده به‌عنوان ایستگاه دارد. همچنین این نکته را باید توجه کرد که اگر تعداد ایستگاه‌های مدنظر زیاد باشد، از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست و در صورت کم‌بودن آنها میزان تخمین بارندگی با واقعیت محل، تفاوت فاحشی خواهد داشت. بهینه‌سازی موقعیت شبکه ایستگاه‌های بارندگی می‌تواند در دقت برآوردهای بارندگی و در نتیجه در مطالعات آب‌شناختی، بیلان آبی و مدیریت منابع آب مؤثر باشد [۸]. الگوریتم‌های متفاوتی برای بهینه‌سازی موقعیت شبکه ایستگاه‌های بارندگی وجود دارد که برخی از آنها بر روش‌های زمین‌آماری مبتنی اند [۹]. کریجینگ یک روش کارآمد درون‌یابی است که هر قدر نمونه در فاصله دورتری باشد، به همان نسبت وزن آماری‌ای که به آن داده می‌شود، کمتر است. اما در عین حال موقعیت نمونه نیز مد نظر قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمین، خطای مرتبط به آن را می‌توان محاسبه کرد. به همین دلیل قبل از احداث ایستگاه و آماربرداری، می‌توان میزان کاهش واریانس برآورد را به ازای اضافه‌کردن ایستگاه جدید محاسبه کرد و با برآورد توزیع مکانی واریانس خطا می‌توان مناطقی که دارای خطای بیش از حد آستانه مدنظر است را شناسایی کرد و تحت پوشش ایستگاه‌های جدید قرار داد. در بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی با استفاده از زمین‌آمار، می‌توان ایستگاه‌هایی که مقادیر آنها با دقت مناسبی با استفاده از سایر ایستگاه‌های شبکه قابل تخمین است را مشخص کرد. همچنین می‌توان مناطقی را که در آنجا خطای تخمین زیاد است را برای اضافه‌کردن باران‌سنج برای کاهش

ساده بر اساس میزان خطای ایجادشده در اعتبارسنجی متقابل پیشنهاد می‌شود که بعد از برآزش سطح بهینه بر میزان بارندگی اجرا می‌شود. در ادامه نیز روش دیگری با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی اجرا و عملکرد این دو روش با مقایسه خطای سطوح ایجادشده از حذف نقاط، بررسی می‌شود تا ضمن ارزیابی قابلیت‌های این دو روش، شبکه بهینه برای ایستگاه‌های سینوپتیک معرفی شود.

## مواد و روش

### منطقه مطالعه‌شده

کشور ایران با وسعت ۱،۶۴۰،۱۹۵ کیلومترمربع در نیمه جنوبی منطقه معتدل شمالی بین  $25^{\circ}$  و  $37^{\circ}$ ،  $3^{\circ}$  عرض شمالی از خط استوا و  $44^{\circ}$  و  $63^{\circ}$  طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. سرزمین ایران به‌طور کلی کوهستانی و نیمه‌خشک است و میانگین ارتفاع آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست. بیش از نیمی از مساحت کشور را کوه‌ها و ارتفاعات، یک چهارم آن را دشت‌ها و کمتر از یک چهارم دیگر آن را نیز زمین‌های در زراعی تشکیل می‌دهد [۱۹]. مقادیر باران سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک کشور طی دوره آماری مشترک (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴) استخراج شد (شکل ۱).

## روش‌ها

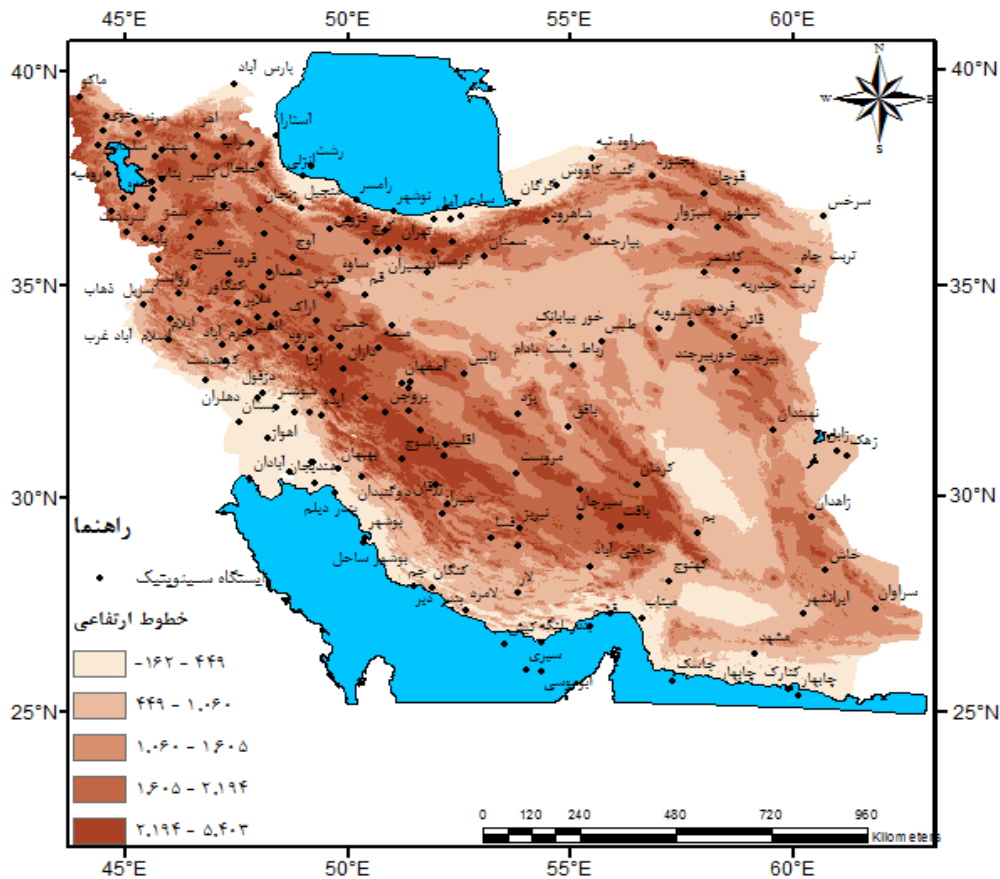
ارزیابی روش‌های درون‌یابی در تخمین میزان بارندگی با توجه به نقطه‌ای بودن برداشت اطلاعات در مطالعات جغرافیایی می‌توان به کمک درون‌یابی، داده‌ها را به سطح تعمیم داد [۱۸]. هدف از درون‌یابی، تخمین مقادیر نامعلوم با استفاده از مقادیر معلوم است [۲۰]. درون‌یابی در سه مرحله اصلی انجام می‌گیرد. ابتدا جست‌وجو و آماده‌سازی داده‌ها که شامل یافتن خطا با تحلیل‌های ساده آماری، تحلیل روند داده‌های موجود و بررسی چگونگی توزیع داده‌هاست [۲۱]. سپس پیاده‌سازی مدل‌های قطعی و یا زمین‌آماري موجود برای ایجاد سطح و در نهایت آنالیز سطوح و تفسیر نتایج است. روش‌های درون‌یابی متنوعی در برآورد میانگین بارندگی استفاده شده است. بررسی منابع نشان می‌دهد روش‌های بهینه به‌دست‌آمده متفاوت بوده و با تغییر مکان تغییر کرده‌اند، از این‌رو، روش

خطای تخمین پیدا کرد [۱۰]. PCA یکی از تکنیک‌های کاهش داده و بر اساس شناسایی مؤلفه‌های توصیف‌کننده واریانس سامانه بود و در تعیین ایستگاه‌های مؤثر در منطقه مطالعه‌شده استفاده شد.

تینکتیکدیس و همکارانش [۱۱] تأثیر افزایش تعداد ایستگاه‌ها را در بهبود نتایج روش کریجینگ بررسی و اثبات کردند که به‌دلیل وجود تابع نیم‌تغییرنما<sup>۱</sup> که ارتباط مکانی معقولی بین نقاط را مشخص می‌کند. لزوماً  $n$  ایستگاه، تخمین بهتری از  $m$  ایستگاه ( $n > m$ ) ارائه نخواهد داد، چرا که تخمین در کریجینگ وابسته به فاصله مکانی است و از این‌رو ممکن است  $n$  ایستگاه در وضعیت بدتری باشند، مگر در حالتی که همه  $m$  ایستگاه زیرمجموعه  $n$  ایستگاه باشند که در آن صورت تخمین بهتر و واریانس خطا کمتر خواهد بود. دیمیتریس و متاکسا [۱۲] به‌منظور ارزیابی مکانی بارش و بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی تایوان با استفاده از داده‌های بارش ساعتی و سالیانه، از روش زمین‌آمار بهره گرفتند. چنگ و همکارانش [۱۳] روشی متشکل از دو معیار طراحی شبکه کریجینگ و آنتروپی را برای یافتن تعداد کافی باران‌سنج‌ها استفاده کردند، به‌طوری که معرف پدیده بارندگی ماهیانه باشد آنها با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک درجه اهمیت ایستگاه‌ها را تعیین کردند. بارسا و همکارانش [۱۴] از دو مدل برآورد ASPDM<sup>۲</sup> (مدل میانگین کوتاه‌ترین مسیر برای به حداقل رساندن فاصله) و مدل کریجینگ برای بهینه‌سازی تعداد باران‌سنج‌ها در حوضه آپولی ایتالیا استفاده کردند. کارآموز و همکارانش [۱۵]، شفیی و همکارانش [۱۶] و ادیب و همکارانش [۱۷] از روش کریجینگ برای بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده کردند. فکی و همکارانش [۱۸] به بهینه‌سازی ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه ناهمگن اقلیمی تونس پرداختند. در این مطالعه از روش کاهش واریانس زمین‌آماري استفاده شده است. نتایج پژوهش آنها نشان داد ایستگاه‌های مرکز و جنوب کارآمدتر است و تعداد زیادی از ایستگاه‌های شمالی باید حذف شود.

هدف اصلی در این تحقیق، بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک کشور در برآورد باران است. بدین‌منظور روشی

1. Semivariogram  
2. The Alliance in Support of the Partiotic Democracy Movement



شکل ۱. نقشه توزیع ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده شده طی دوره آماری مطالعه شده

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (1)$$

که در آن  $\gamma(h)$ : مقدار نیم‌تغییرنما برای جفت نقاطی که به فاصله  $h$  از هم؛  $n$ : تعداد زوج نقاطی است که به فاصله  $h$  از یکدیگر؛  $z(x_i)$ : مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه  $x$  و  $z(x_{i+h})$ : مقدار مشاهده شده متغیری که به فاصله  $h$  از  $x$  قرار دارد.

#### کریجینگ (Kriging)

برای انجام روش‌های زمین‌آمار، داده‌های استفاده شده باید دو ویژگی داشته باشند: یکی توزیع نرمال فضایی داده‌ها این است که و دیگری میانگین و واریانس در مکان تغییر زیادی نداشته باشد [۲۵]. بیان ریاضی روش زمین‌آمار به صورت رابطه ۲ است:

$$Z(s) = \alpha(s) + \varepsilon(s) \quad (2)$$

در این رابطه  $Z(s)$ : مقدار متغیر ناحیه‌ای،  $\alpha(s)$  روند قطعی و مؤلفه ساختاری،  $\varepsilon(s)$  خطای نمونه نسبت یا مؤلفه تصادفی است.

منتخب در یک منطقه را نمی‌توان به سایر مناطق تعمیم داد [۱۱]. از جمله روش‌های پرکاربرد روش‌های وزن‌دهی معکوس (IDW<sup>۱</sup>)، تابع پایه شعاعی (RBF<sup>۲</sup>)، کریجینگ ساده (SK<sup>۳</sup>)، کریجینگ عادی (OK<sup>۴</sup>) و کریجینگ عمومی (UK<sup>۵</sup>) هستند [۲۲] که در این تحقیق از ArcMap برای میان‌یابی استفاده شد.

#### واریوگرام

برای تعیین میزان همبستگی مکانی یک متغیر در فواصل نمونه‌برداری شده و استخراج پارامترهای لازم در مراحل درون‌یابی از واریوگرام استفاده می‌شود [۲۳]. واریوگرام اولین قدم برای مدل‌سازی ساختار مکانی به‌منظور استفاده در کریجینگ است. واریوگرام از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴].

1. Inverse Distance Weighting
2. Radial Basis Function
3. Simple Kriging
4. Ordinary Kriging
5. Universal Kriging

روش عکس فاصله (IDW)

$$\text{CRS: } \Psi(d) = \ln\left(\frac{cd}{\gamma}\right) + E_1(cd)^\gamma + \gamma \quad (5)$$

$$\text{IMQ: } \Psi(d) = \left(\sqrt{d^\gamma + c^\gamma}\right)^{-1} \quad (6)$$

$$\text{MQ: } \Psi(d) = \sqrt{d^\gamma + c^\gamma} \quad (7)$$

$$\text{ST: } \Psi(d) = \ln\left(\frac{cd}{\gamma}\right) + I_1(cd) + \gamma \quad (8)$$

$$\text{TPS: } \Psi(d) = c^\gamma d^\gamma \ln(cd) \quad (9)$$

در این معادلات  $d$ ، فاصله بین نقاط نمونه‌برداری شده و پیش‌بینی‌شده؛  $c$ ، فاکتور ملایم کردن انحنای سطح زمین؛  $I_0$ ، تابع بسل اصلاح‌شده و  $\tau$ ، ثابت اوپلر است. استفاده از هریک از این جواب‌های متفاوتی به‌دست می‌دهند.

برای مقایسه روش‌های درون‌بایی می‌توان از اعتبارسنجی متقابل<sup>۶</sup> استفاده کرد. اساس روش این است که تعدادی از نقاط از فرایند درون‌بایی (به‌صورت تصادفی یا انتخابی) حذف و درون‌بایی با بقیه نقاط انجام می‌گیرد. در گام بعدی نقاط قبلی حذف‌شده به‌عنوان نقاط آموزش استفاده شده و تعدادی نقاط دیگر برای آزمون انتخاب می‌شود. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که همه ایستگاه‌های بررسی شده به‌عنوان ایستگاه آزمون استفاده شده باشند و در نهایت مقادیر محاسبه‌شده و پیش‌بینی‌شده با هم مقایسه می‌شوند. در صورتی که نقاط به‌صورت دسته‌ای حذف شوند، روش مقایسه را اعتبارسنجی<sup>۷</sup> گویند [۲۷]. از جمله فرمول‌های رایج در اعتبارسنجی، ریشه خطای میانگین مربعات (RMSE)<sup>۸</sup> است که توسط رابطه ۱۰ بیان می‌شود [۷].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2} \quad (10)$$

که در آن  $Z^*(x_i)$ : مقدار برآورده‌شده متغیر  $i$  ام،  $Z(x_i)$ : مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر  $i$  ام و  $n$ ، تعداد نقاط مشاهده‌ای است.

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

PCA از روش‌های آماری چندمتغیره است که می‌توان از آن برای کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه مسئله در مواردی استفاده کرد که با حجم زیادی از اطلاعات

در این روش برای هریک از نقاط، وزنی براساس فاصله بین نقطه اندازه‌گیری می‌شود تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می‌گیرند و وزن‌دهی‌ها توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شوند. بنابراین، در این روش صحت‌سنجی با تغییر توان انجام می‌گیرد؛ به‌صورتی که توان‌های بزرگ‌تر، تأثیر نقاط دورتر را از نقطه برآوردی کاهش می‌دهند و توان‌های کوچک‌تر، وزن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تری بین نقاط هم‌جوار توزیع می‌کنند [۲۶]. رابطه ۳ معادله تخمین در روش معکوس فاصله را نشان می‌دهد.

$$Z(X_i) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{d_i^a} z(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{d_i^a} z} \quad (3)$$

که در آن  $d_i$ : فاصله بین نقطه تخمین تا هریک از نمونه‌های واقع در همسایگی آن،  $Z(x_i)$ : مقدار تخمین خاصیت مد نظر در نقطه  $x_i$  مقدار مشاهده‌شده خاصیت مد نظر در نقطه  $x_i$  و  $a$  عبارت از توان عکس فاصله هستند.

روش تابع شعاعی (RBF)

این روش یک تابع عمومی را به‌کار می‌گیرد که وابسته به فاصله بین نقاط درون‌بایی شده و نمونه‌برداری شده است. تعریف ریاضی این روش در معادله ۲ آمده است.

$$Z(x) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x) + \sum_{j=1}^n b_j \Psi(d_j) \quad (4)$$

در این معادله  $\Psi(d)$  تابع پایه شعاعی،  $d_j$  فاصله بین نقاط نمونه‌برداری شده و پیش‌بینی‌شده نقطه  $X$  را نشان می‌دهد.  $F(x)$  روند تابع و عضو اساسی برای چندجمله‌ای‌های با درجه کمتر از  $m$  است. روش تابع شعاعی خود، برحسب نوع تابع، دارای پنج نوع اسپیلاین کاملاً منظم (CRS)<sup>۱</sup>، اسپیلاین کششی (IMQ)<sup>۲</sup>، اسپیلاین چند ربعی (MQ)<sup>۳</sup>، اسپیلاین چندربعی معکوس (IMQ)<sup>۴</sup> اسپیلاین صفحه‌ای نازک (TPS)<sup>۵</sup> است که هریک از آنها معادله‌ای دارد که به‌ترتیب در روابط ۵ تا ۹ آمده است [۲۴].

1. Completely Regularized Spline
2. Spline With Tension
3. Multi Quadratic
4. Inverse Multi Quadratic
5. Thin Plate Spline

6. Cross Validation  
7. Validation  
8. Root Mean Square Error

می‌شود. آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای تک تک ماتریس‌های  $X$  انجام می‌شود و ضریب همبستگی هر ایستگاه با مؤلفه‌های اصلی از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{Corr}(Z_j, X_i) = \lambda_j^{\sqrt{\lambda}} a_{i,j} \quad (11)$$

که در آن  $\text{Corr}(Z_j, X_i)$ : آمین مؤلفه مد نظر،  $a_{i,j}$ : آمین بردار ویژه متناظر با آمین مؤلفه،  $\lambda_j^{\sqrt{\lambda}}$ : آمین متغیر اصلی است در هر آنالیز مؤلفه اصلی، اگر ضریب همبستگی یک ایستگاه با مؤلفه‌های اصلی بیش از ۰/۹ باشد، آن ایستگاه به‌عنوان ایستگاه اصلی یا ایستگاه مؤثر در پایش شناخته می‌شود [۲۰] و اهمیت نسبی هر ایستگاه از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود. این نسبت اهمیت هر ایستگاه را نسبت به ایستگاه‌های دیگر نشان می‌دهد. پس می‌توان برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها، ایستگاه‌های سینوپتیک کم‌اهمیت را در پایش میزان بارندگی حذف کرد. حذف ایستگاه‌های کم‌اهمیت تا جایی ادامه می‌کند که متوسط ضریب تغییرات بارش زیاد نباشد. بدین‌منظور باید به‌ترتیب ایستگاه‌هایی که اهمیت نسبی کمتر از ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و غیره دارند، حذف شوند و خطای ایجادشده در سطح به‌دست آید.

روبه‌رو هستیم [۲۸]. با اعمال این روش، متغیرهای اولیه به مؤلفه‌های جدید و مستقل از یکدیگر (با ضریب همبستگی صفر برای هر دو مؤلفه) تبدیل می‌شوند [۲۹]. مؤلفه‌های جدید ایجادشده ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند [۳۰]. با استفاده از تکنیک PCA، ترکیباتی خطی از  $P$  متغیر اولیه،  $X_1, X_2, \dots, X_p$ ، برای ایجاد  $P$  مؤلفه مستقل (معادل با تعداد متغیرهای اولیه استفاده‌شده)،  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$  ایجاد می‌شود [۱۷]. در آنالیز مؤلفه‌های اصلی باید تعداد متغیرها (ایستگاه‌های سینوپتیک)،  $P$  کمتر و یا حداکثر برای تعداد داده‌های مشاهده‌شده (تعداد سال‌های آماری)،  $n$  باشد [۳۱]. با توجه به اینکه در این تحقیق از آمار سالانه بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور ایران که از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۴ ثبت شده در دسترس است، تعداد داده‌ها و یا مشاهدات هر ایستگاه ۱۴ مورد است و برای پایش هر ایستگاه سینوپتیک از ۱۴ ایستگاه سینوپتیک مجاور استفاده شد. بنابراین، ماتریس داده‌ها،  $X$  برای آنالیز مؤلفه‌های اصلی هر ایستگاه یک ماتریس  $14 \times 14$  است. وقتی ماتریس  $X$  برای یک ایستگاه سینوپتیک تعریف می‌شود از داده‌های خود ایستگاه استفاده نمی‌شود بلکه فقط از ۱۴ ایستگاه مجاور استفاده

$$\text{مجموع دقتی که در هر ایستگاه محاسبات ایستگاه‌های دیگر به عنوان مؤثر شناخته شده} = \frac{\text{مجموع دقتی که هر ایستگاه در همسایگی ایستگاه‌های دیگر ظاهر شده}}{\text{اهمیت نسبی هر ایستگاه سینوپتیک}} \quad (12)$$

### روش حداقل واریانس وارد

این روش در سال ۱۹۶۳ توسط وارد<sup>۱</sup> پیشنهاد شد. در این روش در هر مرحله از تحلیل، ترکیب هر جفت از نمونه‌ها ممکن است مورد توجه قرار گیرد و هر دو دسته‌ای که ادغام آنها سبب افزایش مقدار واریانس به اندازه یک واحد شود، در یک دسته قرار می‌گیرند. در این روش خوشه‌بندی برای کاهش تلفات ناشی از داده‌های دورافتاده<sup>۲</sup> از معیاری جدید برای محاسبه عدم شباهت بین خوشه‌ها استفاده می‌کند. در روش وارد از مجموع مربعات تفاضل هر داده از یک خوشه بردار میانگین آن خوشه به‌عنوان معیاری برای سنجش یک خوشه استفاده می‌شود. با استفاده از رابطه زیر مقدار متوسط عدم قطعیت یا خطای پایش به ازای حذف ایستگاه‌های سینوپتیک غیر مؤثر قابل محاسبه است [۲۰].

$$\text{Cor}(Z_j, X_i) = \lambda_j^{\sqrt{\lambda}} a_{i,j} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳  $cv_m$  مقدار متوسط ضریب تغییرات میزان بارش بعد از حذف ایستگاه‌های غیرمؤثر بوده و ( $cv_{mo}$ ) مقدار متوسط ضریب تغییرات میزان بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی با وجود همه ایستگاه‌هاست.

### نتایج

با توجه به نرمال‌نبودن داده‌ها در روش‌های درون‌یابی تبدیل‌های لوگ و باکس-کاکس در نرم‌افزار MINITAB17 روی داده‌ها اعمال شد تا پیش‌فرض روش‌های کریجینگ برقرار شود که نرمال‌بودن داده‌هاست [۲۱]. روش‌های مختلف درون‌یابی، کریجینگ که شامل Ordinary Kriging، Simple Kriging و Universal Kriging، وزن‌دهی معکوس (IDW)، تابع شعاعی پایه (RBF) است روی مقدار متوسط بارندگی اعمال شد. با استفاده از روش‌های درون‌یابی سعی

1. Ward  
2. Outlier

شد ابتدا حالت بهینه برای هر روش محاسبه و سپس با روش‌های دیگر مقایسه شود (جدول ۱). در نهایت، روش تابع شعاعی پایه با نیم‌تغییر نمای اسپیلاین تنشی و چندگانه با RMSE برابر با ۰/۶۳ به‌عنوان بهترین روش تخمین سطح تعیین شد. بیشترین خطا مربوط به روش کریجینگ عمومی با نیم‌تغییر نمای دایره‌ای بود که در آن میزان خطا ۰/۸۷ محاسبه شد. روش تابع پایه شعاعی در نیم‌تغییر نمای اسپیلاین کاملاً منظم نیز با میزان خطای ۰/۶۴ دومین روش بهینه بود. برمبنای شکل ۲ و روش میان‌یابی RBF، تعداد هفت ناحیه اقلیمی برحسب تغییرات بارش در ایران مشهود است.

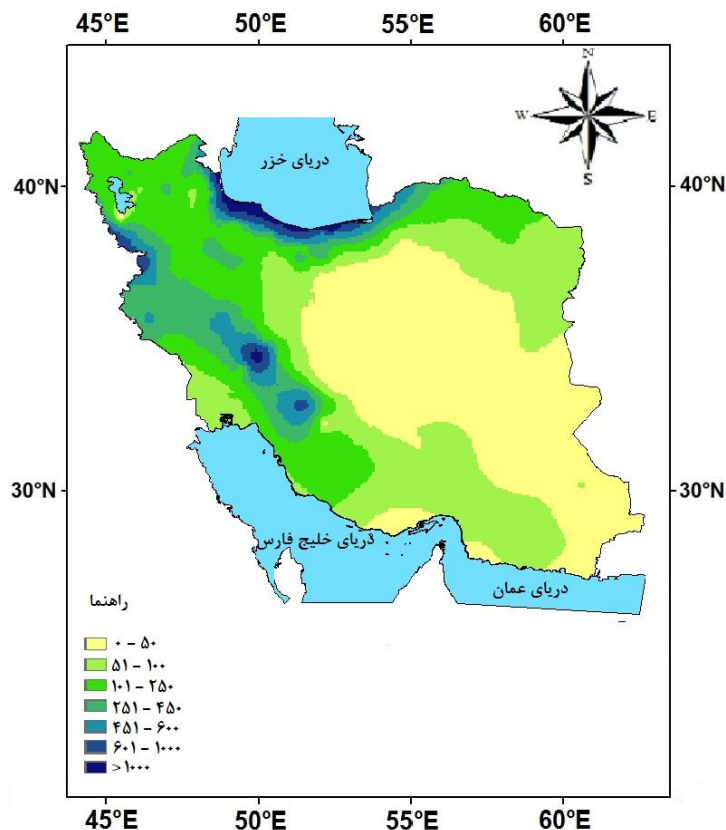
جدول ۲ تقسیم‌بندی نواحی اقلیمی بر حسب تغییرات میزان بارش را نشان می‌دهد [۱۹]. بیشترین وسعت مربوط به بارندگی ۵۰-۰ میلی‌متر نواحی اقلیمی بیابانی بسیار خشک است که در پهنه ایران مرکزی قرار دارد و تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک کمترین پراکنش را در این بخش دارند. پس از آن بخش عمده کشور را بارندگی ۲۵۰-۵۱ میلی‌متر و شرایط اقلیمی نیمه‌بیابانی و خشک تشکیل می‌دهد که پراکنش مناسبی دارد. حال آنکه در بخش غربی، شمال غربی و شمال کشور با توجه به وسعت کم، مناطق با بارندگی بیش از ۴۵۰ میلی‌متر تا ۲ هزار میلی‌متر هستند.

جدول ۱. مقدار خطا در هر یک از انواع روش درون‌یابی

روش درون‌یابی	نوع توابع	RMSE
وزن‌دهی معکوس (IDW)	$Z(so) = \sum \lambda_i \times Z(S_i)$	۰/۷۹
تابع پایه شعاعی (RBF)	اسپیلاین کاملاً منظم	۰/۶۴
	اسپیلاین تنشی	۰/۶۳
	چندگانه	۰/۶۳
	چندگانه معکوس	۰/۶۹
	اسپیلاین صفحه نازک	۰/۶۵
	دایره‌ای	۰/۷۲
	گوسی	۰/۷۷
	کروی	۰/۷۴
	نمایی	۰/۷۳
	دایره‌ای	۰/۸۷
کریجینگ ساده (SK)	گوسی	۰/۸۶
	کروی	۰/۸۷
	نمایی	۰/۸۴
	دایره‌ای	۰/۸۳
کریجینگ عمومی (UK)	گوسی	۰/۸۶
	کروی	۰/۸۷
	نمایی	۰/۸۴
	دایره‌ای	۰/۸۳
کریجینگ عادی (OK)	گوسی	۰/۸۶
	کروی	۰/۸۷
	نمایی	۰/۸۴

جدول ۲. طبقه‌بندی اقلیمی برحسب تغییرات بارش [۳]

نوع اقلیم	میزان بارش (mm)
بیابانی	۵۰-۰
نیمه‌بیابانی	۱۰۰-۵۰
خشک	۲۵۰-۱۰۰
نیمه‌خشک	۴۰۰-۲۵۰
نیمه مرطوب	۶۰۰-۴۰۰
مرطوب	۱۰۰۰-۶۰۰
خیلی مرطوب	>۱۰۰۰



شکل ۲. میان‌یابی به‌روش میان‌یابی تابع شعاعی پایه (RBF)

شمارش و بر تعداد دفعاتی که هر ایستگاه در همسایگی ایستگاه‌های دیگر شمارش شده، تقسیم می‌شود (رابطه ۱۲). عدد به‌دست‌آمده بین صفر تا یک است که اهمیت نسبی ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهد. جدول ۳ نتایج به‌دست‌آمده از اهمیت نسبی هر ایستگاه سینوپتیک را نشان می‌دهد.

برای بهینه‌سازی ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، به‌ترتیب ایستگاه‌هایی که اهمیت نسبی کمتر از ۰/۱، ۰/۲، ... و ۱ داشتند حذف شدند. نمودار خطای ضریب تغییرات (نسبت واریانس به میانگین) برآورد حاصل در سطح ایجادشده به‌زای حذف نقاط در شکل ۳ ارائه شده است. حذف ایستگاه‌های کم‌اهمیت تا جایی ادامه می‌یابد که متوسط ضریب تغییرات میزان بارش سالانه زیاد نباشد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است به‌زای حذف ایستگاه‌هایی که اهمیت نسبی کمتر از ۰/۴ دارند، متوسط ضریب تغییرات از ۰/۴۸ به ۰/۵۲ درصد تغییر می‌کند. یعنی با حذف ۳۴ ایستگاه سینوپتیک، خطای برآورد میزان بارندگی سالانه از ۰/۴۸ به ۰/۵۸ درصد نسبت به حالتی که از همه ایستگاه‌ها

در ادامه، آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای تک‌تک ایستگاه‌های سینوپتیک انجام گرفت که بدین‌منظور برای انجام آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای یک ایستگاه، با توجه به ۱۴ سال آماری، ۱۴ ایستگاه سینوپتیک مجاور انتخاب شد و سپس آنالیز مؤلفه‌های اصلی روی آنها انجام گرفت تا ایستگاه‌های مؤثر در پایش ایستگاه مد نظر مشخص شود. برای اجرای آنالیز یادشده، در محیط MATLAB، ۱۷۹ (تعداد ایستگاه) ماتریس ۱۴ × ۱۴ (سال آماری) براساس همسایگی اقلیدسی برای هر نقطه شکل گرفت و آنالیز PCA روی تک‌تک ایستگاه‌ها صورت پذیرفت. مؤلفه اول PCA بیشترین واریانس را دارد و به‌ترتیب واریانس در مؤلفه‌های بعدی کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه سهم متغیرها در مؤلفه‌های اصلی در سه مؤلفه اول خود را نمایان می‌سازد. از این‌رو، ستون اول می‌تواند ملاک اصلی تعیین ایستگاه مد نظر باشد. بعد از مشخص شدن مؤلفه‌های اصلی با کمک آزمون PCA باید اهمیت نسبی هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک مشخص شود. برای محاسبه این کمیت، ابتدا تعداد دفعاتی که هر ایستگاه، ضریب همبستگی بیش از ۰/۹ با مؤلفه‌های PCA داشته باشد



وجود ندارد. بیشترین تعداد ایستگاه حذف‌شده در این روش مربوط به مناطق اقلیمی با بارش بیش از ۶۰۰ میلی‌متر است که شامل نواحی شمالی و شمال‌غربی دریای خزر و بخش‌های اقلیمی با باران ۴۰-۶۰۰ میلی‌متر در اطراف دریاچه ارومیه است.

نقاط ایستگاهی حذف‌شده در روش RBF هیچ شباهتی با نقاط حذف‌شده در روش PCA ندارد و فقط تعدادی ایستگاه را در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و گاه نیمه‌مرطوب حذف کرده است. این در حالی است که تراکم ایستگاهی در شمال و غرب بسیار زیاد است و به‌صورت ظاهری نیز به‌وضوح مشخص است.

استفاده شده، افزایش می‌یابد. همچنین در روش میان‌بایی تابع شعاعی پایه نیز ۲۲ ایستگاه سینوپتیک حذف شد و میزان خطا از ۰/۶۳ به ۰/۵۵ درصد کاهش یافت که این کارایی زیاد روش میان‌بایی در بهینه‌سازی ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهد.

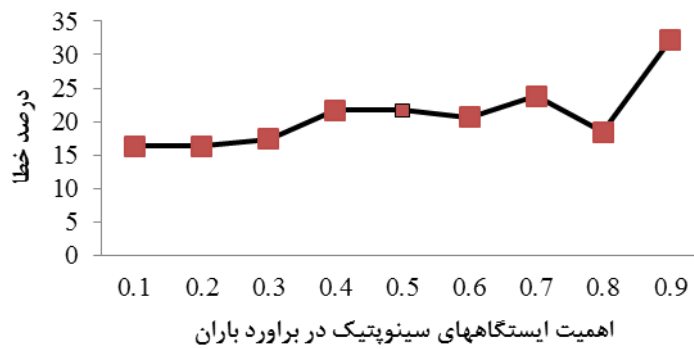
شکل ۴ تعداد ایستگاه‌های حذف‌شده در طبقات مختلف اقلیمی ایران بر حسب روش PCA و RBF را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، در روش PCA در اقلیم بیابانی تعداد دو ایستگاه حذف شده است که به‌دلیل نزدیکی فاصله به هم بوده است. در واقع دلیل آن عدم پراکنش مناسب ایستگاه‌های سینوپتیک است. در حالی که در نقاطی در بخش‌های شمالی کویر لوت هیچ ایستگاهی

جدول ۳. اهمیت نسبی محاسبه‌شده برای هر نقطه بر اساس دفعات تکرار و دفعات مؤثر بودن هر ایستگاه در PCA

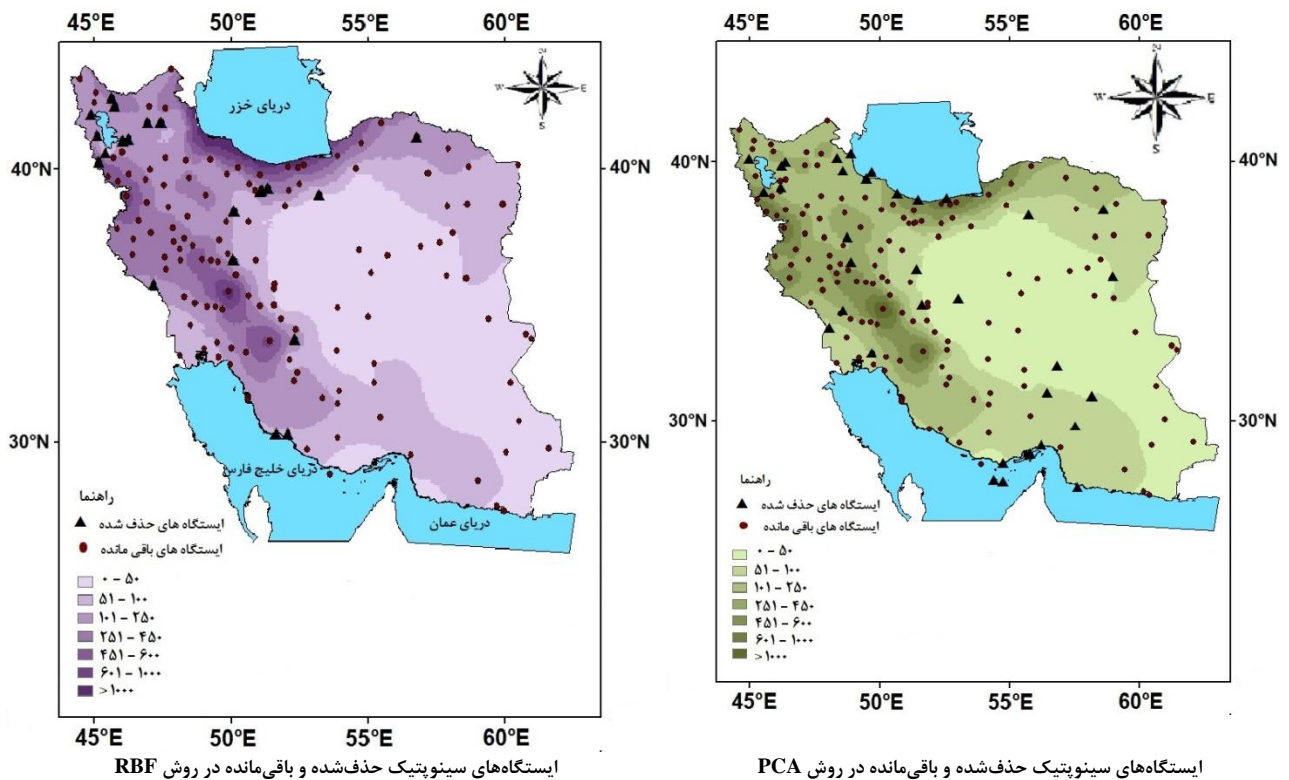
ایستگاه	تکرار	نسبی	تأثیر	ایستگاه	تکرار	نسبی	تأثیر	ایستگاه	تکرار	نسبی	تأثیر
اهر	۱۳	۰/۵۳	۷	ترت جام	۱۷	۰/۶۴	۱۱	قروه	۱۴	۰/۴۲	۶
بناب	۱۷	۰/۴۱	۷	ترت حیدریه	۱۵	۰/۸	۱۲	مریوان	۱۰	۰/۸	۸
تبریز	۲۳	۰/۳۴	۸	سیزوار	۲۲	۰/۴	۹	بافت	۲۵	۰/۳۲	۸
جلفا	۱۳	۰/۶۱	۸	سرخس	۱۴	۰/۸	۱۲	بم	۲۰	۰/۲۵	۵
سراب	۱۵	۰/۴۶	۷	قوچان	۱۸	۰/۷۷	۱۴	سیرجان	۲۱	۰/۵۲	۱۱
سهند	۲۲	۰/۳۶	۸	کاشمر	۱۵	۰/۸	۱۲	شهر بابک	۱۷	۰/۶۴	۱۱
کلیبر	۲۱	۰/۴۲	۹	کلمکان	۱۳	۰/۶۱	۸	کرمان	۱۷	۰/۱۱	۲
مراغه	۲۴	۰/۵	۱۲	گناباد	۱۶	۰/۷۵	۱۲	کهنوج	۲۸	۰/۱	۳
مرند	۱۵	۰/۶	۹	مشهد	۱۳	۰/۹۲	۱۲	اسلام‌آباد غرب	۷	۰/۸۵	۶
ملکان	۱۸	۰/۳۷	۵	نیشابور	۳۲	۰/۳۷	۱۲	روانسر	۱۰	۰/۷	۷
ارومیه	۱۶	۰/۴۳	۷	بجنورد	۱۳	۰/۵۳	۷	سرپل ذهاب	۸	۰/۵	۴
پیرانشهر	۱۲	۰/۸۳	۱۰	آبادان	۹	۰/۶۶	۶	کرمانشاه	۱۶	۰/۵	۸
تکاب	۱۴	۰/۵۷	۸	امیدیه	۴	۱	۴	کنگاور	۱۲	۰/۷۵	۹
خوی	۹	۰/۵۵	۵	امیدیه - پ	۱۳	۰/۳۸	۵	دوگنبدان	۱۷	۰/۹۴	۱۶
سردشت	۱۱	۰/۸۱	۹	اهواز	۱۳	۰/۸۴	۱۱	ياسوج	۱۶	۰/۹۳	۱۵
سلماس	۱۲	۰/۱۶	۲	ایذه	۱۵	۰/۸۶	۱۳	گرگان	۷	۰/۵۷	۴
قرضیالدين	۸	۰/۶۲	۵	بستان	۹	۰/۳۳	۳	گنبد کاووس	۱۲	۰/۷۵	۹
ماکو	۵	۰/۴	۲	بندر ماهشهر	۸	۱	۸	مراوه تپه	۱۱	۰/۹	۱۰
مهاباد	۱۳	۰/۵۳	۷	بهبهان	۱۵	۰/۸	۱۲	آستارا	۹	۰	۰
میاندوآب	۱۲	۰/۶۶	۸	دزفول	۲	۰	۰	انزلی	۸	۰/۱۲	۱
نقده	۱۳	۰/۰۷	۱	رامهرمز	۱۷	۰/۸۸	۱۵	رشت	۶	۰/۱۶	۱
اردبیل	۹	۰/۲۲	۲	شوشتر	۹	۰/۷۷	۷	منجیل	۹	۰/۴۴	۴
پارس‌آباد	۶	۰/۱۶	۱	صفی دزفول	۱۳	۰/۸۴	۱۱	ازنا	۱۳	۰/۸۴	۱۱
خلخال	۱۲	۰/۲۵	۳	مسجد سلیمان	۱۵	۰/۸۶	۱۳	الشتَر	۱۴	۰/۷۸	۱۱
مشکین	۱۵	۰/۴	۶	هندیجان	۱۲	۰/۹۱	۱۱	الیگودرز	۱۴	۰/۹۲	۱۳

ادامه جدول ۳. اهمیت نسبی محاسبه شده برای هر نقطه بر اساس دفعات تکرار و دفعات مؤثر بودن هر ایستگاه در PCA

نسبی	تأثیر	تکرار	ایستگاه	نسبی	تأثیر	تکرار	ایستگاه	نسبی	تکرار	تأثیر	ایستگاه
۰/۶۲	۱۰	۱۶	بروجرد	۰/۸۴	۱۱	۱۳	خدابنده	۰/۰۸	۱	۱۲	اصفهان
۰/۴۶	۷	۱۵	پل دختر	۰/۷۷	۷	۹	زنجان	۰/۶	۶	۱۰	خور
۰/۷۲	۸	۱۱	خرم‌آباد	۰/۴۶	۶	۱۳	ماه‌نشان	۰/۷۲	۱۳	۱۸	داران
۰/۶۶	۸	۱۲	درود	۰/۲۵	۴	۱۶	بیارجمند	۰/۶۳	۱۲	۱۹	ش- اصفهان
۰/۸۵	۱۲	۱۴	کوه‌دشت	۰/۶۳	۱۲	۱۹	سمنان	۱	۱۱	۱۱	شهرضا
۰/۵۷	۸	۱۴	نورآباد لرستان	۰/۶۴	۹	۱۴	شاهرود	۰/۲۷	۳	۱۱	کاشان
۰/۵۴	۶	۱۱	آمل	۰/۷	۷	۱۰	گرمسار	۰/۶۶	۸	۱۲	کیوترباد
۰	۰	۰	بابلسر	۰/۸	۴	۵	ایرانشهر	۰/۶۸	۱۱	۱۶	گلپایگان
۰/۰۶	۱	۱۶	رامسر	۰/۸	۴	۵	چابهار	۰/۵	۸	۱۶	میمه
۰/۴۴	۴	۹	ساری	۰/۵	۳	۶	خاش	۰/۲۸	۴	۱۴	نابین
۰/۵۸	۷	۱۲	سیاه بیشه	۰/۴	۲	۵	زابل	۰/۶۹	۹	۱۳	کرج
۰/۸۳	۱۵	۱۸	قائم‌شهر	۰/۶۳	۷	۱۱	زاهدان	۰/۸۸	۸	۹	ایلام
۰/۳۳	۲	۶	نوشهر	۰/۵	۱	۲	زهک	۰/۶۴	۹	۱۴	دهلران
۰/۷۷	۱۴	۱۸	اراک	۰/۶۶	۲	۳	سراوان	۰/۵۵	۵	۹	بندر دیر
۰/۱۳	۳	۲۲	تفرش	۰/۸	۴	۵	کنارک	۰/۷۸	۱۱	۱۴	بندر دیلم
۰/۶۴	۹	۱۴	خمین	۰/۹۳	۱۴	۱۵	آباده	۰/۸	۸	۱۰	بوشهر
۰/۷۵	۶	۸	ساوه	۰/۹۴	۱۸	۱۹	اقلید	۰/۷۵	۹	۱۲	بوشهر ساحل
۰/۲۷	۶	۲۲	بندرعباس	۰/۷۲	۱۳	۱۸	ایزد خواست	۰/۶۶	۶	۹	کنگان جم
۰/۳۵	۵	۱۴	بندر لنگه	۰/۵۵	۱۵	۲۷	حسن‌آباد داراب	۰/۷۶	۲۰	۲۶	تهران
۰/۰۷	۱	۱۳	جاسک	۰/۹۱	۲۲	۲۴	زرقان	۰/۶۶	۱۶	۲۴	چیتگر
۰/۲۲	۲	۹	ابوموسی	۰/۵	۷	۱۴	سد درودزن	۰/۸۶	۱۹	۲۲	دوشان تپه
۰/۲۲	۲	۹	سیری	۱	۱۲	۱۲	شیراز	۰/۸	۱۶	۲۰	ژئوفیزیک
۰/۲۳	۴	۱۷	قشم	۰/۸۳	۱۵	۱۸	فسا	۰/۸۸	۲۲	۲۵	شمیران
۰/۷۲	۸	۱۱	کیش	۰/۶۶	۱۰	۱۵	لار	۰/۷۱	۱۵	۲۱	فیروزکوه
۰/۵	۱۵	۳۰	حاجی‌آباد	۰/۶۲	۱۰	۱۶	لامرد	۰/۵۲	۹	۱۷	فیروزکوه
۰/۴۷	۱۰	۲۱	میناب	۰/۷۸	۱۵	۱۹	نیریز	۰/۸۸	۱۶	۱۸	بروجن
۰/۲۵	۴	۱۶	ملایر	۰/۸۸	۸	۹	آوج	۰/۷	۱۴	۲۰	شهرکرد
۰/۷۵	۱۲	۱۶	نهاوند	۰/۷۵	۱۵	۲۰	قزوین	۰/۸	۱۷	۲۱	کوه‌رنگ
۰/۶۸	۱۱	۱۶	همدان	۰/۷۸	۱۵	۱۹	معلم‌کلیه	۰/۷۸	۱۱	۱۴	بشرویه
۰/۳۵	۵	۱۴	همدان نوژه	۰/۷	۱۲	۱۷	قم	۰/۴	۶	۱۵	بیرجند
۰/۴۷	۹	۱۹	بافق	۰/۷۳	۱۱	۱۵	بانه	۰/۶۶	۱۰	۱۵	خوربیرجند
۰/۵۳	۷	۱۳	رباط پشت بادام	۰/۵۳	۸	۱۵	بیجار	۰/۶۶	۴	۶	طیس
۰/۸۸	۸	۹	مروست	۰/۸۲	۱۴	۱۷	زرینه‌آباتو	۰/۶۶	۶	۹	فردوس
۰/۸۵	۶	۷	یزد	۰/۷۳	۱۱	۱۵	سقر	۰/۲۷	۳	۱۱	قائن
				۰/۹۳	۱۴	۱۵	سنندج	۰/۵	۲	۴	نهبندان



شکل ۳. نمودار خطی ایجاد شده در برآورد میزان بارندگی با حذف ایستگاه‌های سینوپتیک بر اساس اهمیت نسبی خطای حاصل از ضریب تغییرات CV



شکل ۴. ایستگاه‌های سینوپتیک حذف شده و باقی‌مانده در روش PCA و RBF

شده است. این در حالی است که بیشتر ادوات این ایستگاه‌ها وارداتی و همه تجهیزات همراه آنها نیز وابستگی ۱۰۰ درصدی به کشور صادرکننده دارد. در این تحقیق برای بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک کشور ایران، بعد از اخذ اطلاعات مربوط به بارش ۱۷۹ ایستگاه سینوپتیک روش‌های درون‌یابی برای پهنه‌بندی متوسط

### نتیجه‌گیری

زیادبودن هزینه تعمیر و نگهداری ایستگاه‌های سینوپتیک، ضرورت بهینه‌کردن تعداد این ایستگاه‌ها را در برآورد فاکتورهای مختلف هواشناسی در سطح کشور می‌رساند تا سال ۲۰۱۰ بیش از ۱۷۰ ایستگاه سینوپتیک فعال در کشور وجود داشته و در حال حاضر تعداد آنها نیز بیشتر

شمال و شمال غرب کشور است که میزان تراکم ایستگاه‌های سینوپتیک بیشتر است قرار دارد، ولی در قسمت مرکزی و شرقی تراکم ایستگاه‌ها اندک است و این نشان‌دهنده عدم توزیع مناسب و همگون ایستگاه‌های سینوپتیک ایران است. با حذف ایستگاه‌های سینوپتیک در روش PCA خطای برآورد RMSE از ۰/۴۸ به ۰/۵۲ درصد نسبت به حالتی که از همه ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده می‌شد، افزایش یافت و در روش میان‌یابی تابع شعاعی میزان خطا از ۰/۶۳ به ۰/۵۵ کاهش یافت که بیان‌کننده مناسب‌بودن روش PCA در بهینه‌سازی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور است.

نتایج بیان می‌کند که با حذف ۳۴ ایستگاه از شبکه ایستگاه‌های سینوپتیک در روش PCA مقدار خطای به‌دست‌آمده قابل پذیرش است و می‌توان دقت اندازه‌گیری میزان بارندگی در بقیه ایستگاه‌های سینوپتیک و صرفه‌جویی در زمان و هزینه به همان دقت سطح اولیه رسید.

#### منابع

- [1]. Yousefi H, Nohegar A, Khosravi Z, Azizabadi Farahani M. Drought Modeling and Management Using SPI and RDI Indexes (Case study: Markazi provin). The University of Tehrans Scientific Journals Database. 2015; 2(3): 337- 344. (In Persian)
- [2]. Mohammadi M, Karami H, Farzin S, Farokhi A. Prediction of Monthly Precipitation Based on Large-scale Climate Signals Using Intelligent Models and Multiple Linear Regression (Case Study: Semnan Synoptic Station), The University of Tehrans Scientific Journals Database. 2017; 4(1): 201- 214. (In Persian)
- [3]. Sajal KA, Abdullah GY, Nitin M. Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. Hydrol.Process. 2014.
- [4]. Pardo-Igúzquiza E. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. Journal of Hydrology. 1998; 210: 206-220.
- [5]. Xie, Y., bin Chen, T., Mei Lei, Jun Yang, Qing-jun Guo, Bo Song, Xiao-yong Zhou, 2011, Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis, Chemosphere, Vol. 82, No. 3, PP. 468- 476.

بارندگی سالانه اعمال شدند. روش میان‌یابی تابع شعاعی پایه با کمترین میزان RMSE سطح پهنه را تخمین زده و براساس روش یادشده، ایران به هفت نقطه اقلیمی برحسب تغییرات بارش تقسیم شد که بیشترین وسعت منطقه اقلیمی مربوط به مناطق با باران کمتر از ۵۰ میلی‌متر است. نتایج نشان داد در این منطقه اقلیمی کمترین ایستگاه به لحاظ تعداد و پراکنش وجود دارد و در مناطق شمالی و غرب کشور بیشترین نقاط ایستگاهی و پراکنش وجود دارد. در واقع سیاست تأسیس ایستگاه در سازمان مربوط به آن نیز براساس تغییرپذیری فاکتورهای هواشناسی و اهمیت پایش آنها در نقاط مختلف کشور به لحاظ سیاسی، اجتماعی و مدیریتی است.

نتایج میان‌یابی نشان داد بیشترین خطای برآورد مربوط به روش کریجینگ عمومی و عادی و کمترین خطا مربوط به روش RBF معرفی شد. که با نتایج کارآموز و همکارانش [۱۵]، شفیع و همکارانش [۱۶]، ادیب و همکارانش [۱۷] و فکی و همکارانش [۱۸] در مقیاس کوچک، همسو نیست. به عقیده شفیع و همکارانش [۱۶] یکی از اصول میان‌یابی به روش کریجینگ، وجود اطلاعات نقطه‌ای پایه، تعداد کافی و مناسب و همچنین پراکنش صحیح ایستگاه‌های سنجش و اندازه‌گیری است که این امر با توجه به شکل پراکنش نامناسب و ناکافی ایستگاه‌های سینوپتیک در کشور، سبب افزایش خطا و کاهش دقت میان‌یابی می‌شود.

نتایج روش‌های میان‌یابی در این تحقیق نشان داد دقت برآورد بارش در بخش‌های مرکزی ایران نسبت به مناطق پرباران شمالی و غرب کشور، کمتر است. عساکره [۱۹] معتقد است بسیاری از نواحی کشور به‌خصوص نواحی داخلی و ایران مرکزی که کانون‌های آبگیر کشور به‌شمار می‌آیند، از نظر اقلیمی کمترین تباین و ارتفاع بیش از ۲۶۰۰ متر دارند و فاقد ایستگاه ثبت مقدار بارش هستند که خود این مسئله سبب کاهش دقت برآورد در این مناطق می‌شود. در مقابل نتایج در بخش‌های غربی و شمالی کشور به سبب توزیع نسبتاً مناسب ایستگاه‌ها قابل اعتمادتر هستند.

نتایج بهینه‌سازی ایستگاه‌های سینوپتیک در برآورد بارش نشان می‌دهد، ۳۴ ایستگاه سینوپتیک کم‌اهمیت در روش PCA و ۲۲ ایستگاه در روش میان‌یابی تابع شعاعی پایه حذف شد. بیشتر ایستگاه‌های حذف‌شده در قسمت

- [6]. Kassim AHM, Kottegoda NT. Rainfall network design through comparative kriging methods. *Hydrological Sciences Journal*. 1991; 36: 223-240.
- [7]. Mohd Aziz M, Yusof F, Mohd Daud Z, Yusop A, Afif M. Optimal design of rain gauge network in Johor by using geostatistics and particle swarm optimization. *International Journal of GEOMATE*. 2016; 11(25): 2422-2428.
- [8]. Adhikary SK, Yilmaz AG, Muttill N. Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. *HYDROLOGICAL PROCESSES*. 2014; 29(3): 2582-2599.
- [9]. Mishra AK, Coulibaly P. Developments in hydrometric network design: a review. *Reviews of Geophysics*. 2009. 47: RG2001.
- [10]. Chebbi A, Bargaoui ZK, da Conceição Cunha M. Development of a method of robust rain gauge network optimization based on intensity-duration-frequency results. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013; 17: 4259-4268.
- [11]. Tsintikidis D, Georgakakos KP, Sperflag JA, Smith DE, Carpenter TM. Precipitation Uncertainty and Raingauge Network Design Within Folsom Lake watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2002; 7(2): 175-184.
- [12]. Dimitris M, Metaxa G. 2006. Geostatistical Analysis of Spatial Variability of Rainfall and Optimal Design of a Raingauge Network, *Water Resources Management*. 2006; 10: 107-127.
- [13]. Cheng KS, Wei C, Cheng YB, Yeh HC. Effect of spatial variation characteristics on contouring of design storm depth, *Hydrol Process* 2003; 17(9): 1755-69.
- [14]. Barca E, Passarella G, Uricchio V. 2008. Optimal Extension of the Rain Gauge Monitoring Network of the Apulian Regional Consortium for Crop Protection, *Environ Monitring Assessment*. 2008; 145(58): 375-386.
- [15]. Karamouz M, Kerachian R, Akhbari M, Hafez B. Design of river water quality monitoring networks: a case study, *Environ Model Assess* 2009; 14(6): 705-14.
- [16]. Shafiei M, Ghahraman B, Saghafian B. 2013. Evaluation and optimization of raingauge network based on probability kriging (case study: Gorgan-Rud watershed). *Iran-Water Resources Research*. 2013; 9(2): 9-18. (In Persian)
- [17]. Adib A, Moslemzadeh M. Optimal Selection of Number of Rainfall Gauging Stations by Kriging and Genetic Algorithm Methods. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2016; 6(4):581-594.
- [18]. Feki H, Slimani M, Cudennec CH. 2016. Geostatistically based optimization of a rainfall monitoring network extension: case of the climatically heterogeneous Tunisia. *Hydrology Research*. 2016; 48(1).
- [19]. Asakere H, Kriging interpolation method is used in the case of Iran, the interpolation of precipitation 12/26/1376. *Journal of Geography and Development*. 2004; 5(12): 25-42. (In Persian)
- [20]. Gurunathan K, Ravichandran S. 1994. Analysis of water quality data using a multivariate statistical technique - a case study. *IAHS Pub*. 1994; 219.
- [21]. Salah H. Geostatistical analysis of groundwater levels in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS. *GIS Ostrava*. 2009; 25: 1-10.
- [22]. Taghizadeh R, Zareian M, Mahmudi SH, Heidari A, Sarmadian F. Evaluation methods temporal interpolation to determine the spatial variability of water quality characteristics of groundwater in Rafsanjan. *Watershed Management Science and Engineering Iran*. 2008; 2(5): 63-70. (In Persian)
- [23]. Bastin G, Lorent B, Duque C, Gevers M. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations, *Water Resour Res*. 1984; 20(4): 463-70.
- [24]. Webster R and Oliver MA. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, UK. 2001; 271.
- [25]. Asghari moghadam A, Nurani V, Nadiri A. Predict when and where the groundwater level in the city of Tabriz metro area using neural kriging model. *Iran Water Resources Research*. 2008; 13(1): 14-24. (In Persian)
- [26]. Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989, *An Introduction to Applied Geostatistic*, Oxford University Press New York, P.561.
- [27]. Sun Y, Kang S, Li F and Zhang L. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling & Software*. 2009; 24:1163-1170.
- [28]. 28. Camdevyren HN, Demyr A, Kanik S, Keskin. "Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction

- of Chlorophyll-a in reservoirs.” *Ecol. Model.* 2005; 181: 581–589.
- [29]. Manly BFJ. *Multivariate statistical methods: A primer*, 2nd Ed., Chapman and Hall, London.1986.
- [30]. Lu, W. Z., W. J. Wang, X. K. Wang, Z. B. Xu and A. Y. T. Leung. “Using improved neural network to analyze RSP, NOX and NO2 levels in urban air in Mong Kok, Hong Kong.” *Environmental Monitoring and Assessment.* 2003; 87: 235–254.
- [31]. Petersen W. Process identification by principal component analysis of river water-quality data. *Ecol. Model.*2001; 138: 193-213.