ارزیابی روش های درون‌یابی بارش سالانه و فصلی در دشت مشهد

سعید صبوری نوقابی*[۱]، سعید گلیان[۲]، ابراهیم اسعدی اسکویی[۳]، ارنستو لوپز بائزا[۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار پژوهشکده هواشناسی

۴- استاد تمام فیزیک کاربردی، دانشگاه والنسیا اسپانیا

(دریافت: ۹۴/۰۳/۲۵، پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۲)

چکیده

برآورد تغییرات مکانی عوامل هواشناسی در بسیاری از مطالعات هواشناسی و منابع آب اجتناب‌ناپذیر است. بارندگی یکی از مهم‌ترین اجزای گردش آب در طبیعت است و توزیع مکانی آن نقش مهمی در مدیریت منابع آب دارد. در بررسی توزیع مکانی بارش، انتخاب روش درون‌یابی یکی از چالش‌های اصلی است.

هدف این تحقیق تعیین بهترین روش درون‌یابی بارش در دشت مشهد، به عنوان قطب اصلی کشاورزی در استان خراسان رضوی است. بدین منظور داده‌های بارش موجود در دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳ گردآوری شد. پس از بررسی کیفیت و خلأهای موجود، مجموعاً ۶۳ ایستگاه شامل ایستگاه‌های هواشناسی(۳۲ ایستگاه باران‌سنجی و ۳ ایستگاه سینوپتیک) و وزارت نیرو (۲۸ ایستگاه باران‌سنجی) مناسب تشخیص داده شد. سپس جهت برآورد توزیع مکانی بارش از ۵ روش درون‌یابی از جمله کریجینگ، کوکریجینگ، رگرسیون، رگرسیون کریجینگ و روش وزنی عکس فاصله استفاده شد. برای انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی محاسبه‌ی ریشه دوم مربع میانگین خطا RMSE[۱] و میانگین انحراف خطا MBE[۲] مدنظر قرار گرفت.

ارزیابی روش‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی حذفی انجام شد و مناسب‌ترین روش درون‌یابی بر اساس تحلیل واریوگرافی نشان داد مدل کروی، به‌عنوان بهترین مدل نظری برای نیم تغییرنما است. بررسی خطاهای روش نشان داد که، روش ترکیبی رگرسیون کریجینگ با RMSE=۵،۸۵۴ و MBE=۰،۳۰۰ به‌عنوان بهترین روش و پس‌ازآن روش رگرسیون سه متغیره (طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع) با RMSE=۷،۵۸۸ و MBE= ۰،۳۴۹ دارای بهترین برآورد از مقادیر بارش سالانه هستند؛ اما برای بارش‌های فصلی به دلیل همبستگی ضعیف داده‌ها بهتر است از روش کریجینگ برای درون‌یابی داده‌های بارش استفاده شود. همچنین روش کوکریجینگ به عنوان ضعیف‌ترین روش شناخته شد.

کلمات کلیدی: بارش، روش‌های درون‌یابی، رگرسیون -کریجینگ، دشت مشهد

مقدمه

برآورد تغییرات مکانی عوامل هواشناسی به خصوص بارش در بسیاری از مطالعات هواشناسی و مدیریت منابع آب، مدل‌های هیدرولیکی، مطالعات تغییر اقلیم، پیش‌بینی سیلاب، برنامه‌ریزی‌های آبیاری، برآورد بیلان آب و مانند آن، اجتناب‌ناپذیر است. لیکن به دلیل عدم امکان پوشش کامل منطقه توسط ایستگاه‌های اندازه‌گیری، برآورد عامل مورد نظر برای مناطق بین ایستگاه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. در مطالعات جغرافیایی برداشت اطلاعات اغلب به صورت نقطه‌ای انجام می‌شود. داده‌های نقطه‌ای داده‌هایی هستند که در مکان یا مکان‌های معینی (مانند ایستگاه‌های هواشناسی) اندازه‌گیری می‌شوند. به منظور تهیه نقشه‌های توزیع مکانی و مطالعه الگوهای مکانی، داده‌های نقطه‌ای طی فرآیند درون‌یابی به سطح تعمیم می‌یابند. درون‌یابی مکانی فرآیندی است که در آن با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در نقاط معلوم، مقادیر نقاط مجهول برآورد می‌شود.

الگوریتم‌های متفاوتی برای درون‌یابی منطقه‌ای بارندگی وجود دارد که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های

* نگارنده رابط: saeed.saboori.ss@gmail.com

1- Root Mean Square Error
2- Mean Bias Error

زمین‌آماری و روش‌های هندسی (ژئومتری) اشاره کرد. امروزه از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی در درون‌یابی به منظور استخراج توزیع مکانی متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در قالب شبکه‌های سلولی و یا مدل‌های برداری استفاده می‌گردد. هر گونه کاستی در انتخاب روش مناسب توزیع مکانی عوامل اقلیمی و بی‌توجهی به دقت روش‌های درون‌یابی می‌تواند موجب بروز خطا در برآوردها طراحی گردد. هدف این پژوهش برآورد توزیع مکانی متغیر اقلیمی بارش با استفاده از مناسب‌ترین روش و متغیرکمکی است.

مطالعات مختلفی در زمینه‌ی درون‌یابی داده‌های بارندگی در ایران انجام شده است. نادی (۱۳۹۱) با مقایسه‌ی دقّت و صحت هفت روش درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه در منطقه‌ی خوزستان نشان داد که در مورد بارش‌های درازمدت سالانه روش رگرسیون-کریجینگ با توجه به عامل ارتفاع بهترین روش درون‌یابی است. فرجی سبکبار (۱۳۸۵) میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی مختلفی مثل تین، معکوس وزنی فاصله، اسپلاین و انواع کریجینگ را برای الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد، ارزیابی کردند؛ نتایج نشان داد که روش‌های تین و کریجینگ عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشتند. معروفی و همکاران (۱۳۸۸) از روش‌های زمین‌آماری برای بررسی توزیع مکانی بارش استان همدان، استفاده کردند. نتایج نشان داد که در خصوص مقادیر میانگین بارندگی، روش کریجینگ ساده با مدل واریوگرام نمائی، در مورد مقادیر حداقل بارش سالانه، روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی با مدل گوسین و در مورد مقادیر حداکثر بارندگی، روش کریجینگ ساده با مدل دایره‌ای بهترین نتایج را دارند. اندرسون (۲۰۰۰) در تحقیق مشابه‌ای با استفاده از روش‌های درون‌یابی فضایی داده‌های دما را به سطح تعمیم داده است. بر اساس نتایج این تحقیق روش‌های کریجینگ دقت بیشتری داشته و روش وزنی عکس فاصله از دقت کمتری برخوردار بوده است که یافته‌های تحقیق حاضر نیز مؤید این موضوع است.

هم‌زمان با توسعه روش‌های جدید درون‌یابی مقایسه میزان دقت برآورد آن‌ها نیز ضرورت دارد. مطالعات تطبیقی چندی توسط محققین انجام پذیرفته است تا به ارزیابی میزان دقت روش‌ها بپردازند. سیسکا (۱۹۹۹) از آماره خطای ریشه‌ی دوم میانگین(RMSE[1]) برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی استفاده کرد. نادی (۱۳۹۱) به منظور ارزیابی روش‌های درون‌یابی، از روش اعتبارسنجی حذفی (cross validation) و برای مقایسه و انتخاب بهترین روش، از تحلیل رگرسیونی و محاسبه‌ی شاخص‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب استفاده کردند.

این مطالعه جهت تعیین بهترین روش درون‌یابی بارش برای ارزیابی تغییرات مکانی، الگوی توزیع جغرافیایی و صحت سنجی پهنه‌بندی بارش در دشت مشهد، به عنوان یکی از دشت‌های بحرانی کشور و قطب اصلی کشاورزی در استان خراسان رضوی صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

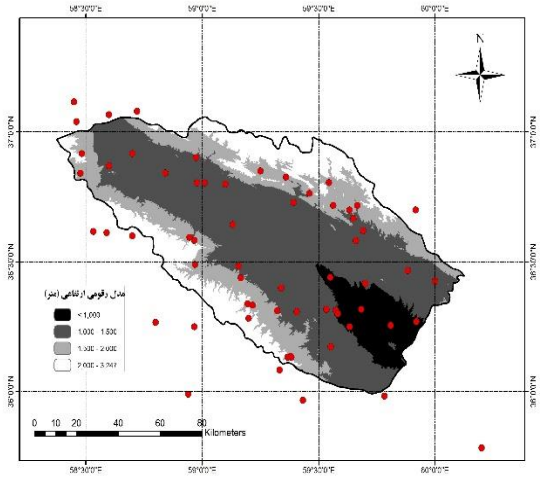
منطقه موردمطالعه و داده‌ها

دشت مشهد جزو حوضه آبریز کشف رود بوده وسعتی بالغ بر ۱۶۵۰۰ کیلومتر مربع دارد که از این وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع آن را دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد، این دشت در شمال شرقی ایران (موقعیت جغرافیایی آن از جنوب به شمال در عرض ۳۶،۰۰۰ تا ۳۷،۱۰۱ درجه شمالی و از غرب به شرق در طول جغرافیایی ۵۸،۳۷۲ تا ۶۰،۱۱۱ درجه شرقی) واقع‌شده است.

در این حوضه از حداکثر ایستگاه‌های قابل‌اعتماد و دارای آمار کافی، مجموعاً ۶۳ ایستگاه شامل ایستگاه‌های هواشناسی (۳۲ ایستگاه باران‌سنجی و ۳ ایستگاه سینوپتیک) و وزارت نیرو (۲۸ ایستگاه باران‌سنجی) طی دوره آماری ده‌ساله (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳) استفاده شد که پراکنش آن‌ها در شکل شماره‌ی یک نشان داده‌شده است. جمع‌آوری داده‌ها به‌گونه‌ای بوده است، که از حداکثر داده‌های مشترک در ایستگاه‌های موجود در

1- Root Mean Square Error

ناحیه مطالعه شده استفاده شود، به‌این‌علت از میانگین داده‌های بارش در یک بازه زمانی ۱۰ ساله استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌ها

با توجه به مختصات موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها نقشه رقومی ایستگاه‌های هواشناسی تولید شد. سپس مراحل مدل‌سازی فضایی در نرم‌افزار GIS انجام شد و در نهایت نتایج حاصل از این روش‌ها با هم مقایسه شدند.

روش‌های درون‌یابی

برآورد تغییرات مکانی عوامل هواشناسی بدون توجه به چگونگی انتخاب روش‌های مناسب می‌تواند از عوامل مهم ایجاد خطا در مطالعات باشد. روش‌های مختلفی برای برآورد توزیع مکانی بارندگی و سایر عوامل هواشناسی وجود دارد. ازنظر محدودیت‌ها باید اشاره کرد که روش‌های توزیع مکانی عموماً برای درون‌یابی بین ایستگاه‌ها هستند و در مناطق برون‌یابی با اشکال کاهش دقت روبرو هستند. همچنین باید توجه داشت که یک روش عمومی و جهانی برای تهیه نقشه‌های عوامل هواشناسی وجود ندارد.

تمام روش‌های خانواده‌ی کریجینگ، به‌علاوه‌ی روش وزنی عکس فاصله، از رابطه‌ی شماره‌ی یک برای برآورد مقدار یک متغیر در نقاط فاقد اندازه‌گیری استفاده می‌کنند.

$$Z^* = \sum_{i=1}^{n} \omega_i Z(x_i) \qquad (۱)$$

رابطه‌ی شماره (۱) بیان می‌کند که مقدار یک متغیر هواشناسی در یک نقطه، برابر است با ترکیب خطّی n ایستگاه مجاور آن (حسنی پاک، ۱۳۸۶).

تفاوت روش‌های مختلف درون‌یابی در نحوه محاسبه وزن‌ها هست. برآورد مقادیر مجهول بر این اصل استوار است که مقادیر معلوم که در اطراف و همسایگی نقطه فاقد اندازه‌گیری (مجهول) قرار دارند، همبستگی بیشتری با مقدار متغیر در نقطه مجهول نسبت به نقاط دورتر دارند و لذا انتظار می‌رود وزن نقاط نزدیک‌تر بیشتر باشد.

روش عکس فاصله‌ی وزنی(IDW)

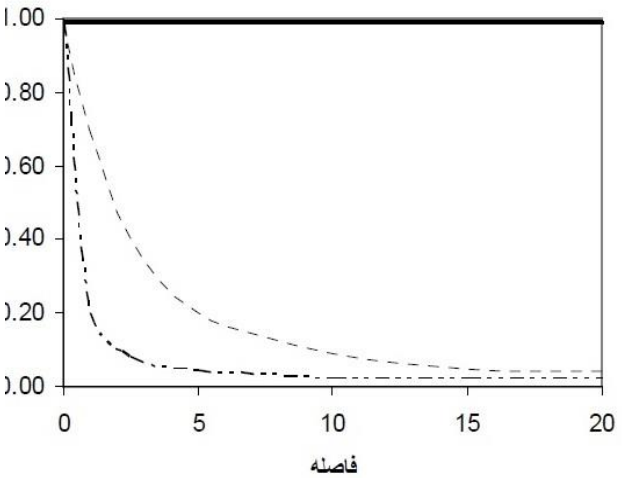
از مهم‌ترین روش‌های درون‌یابی، روش عکس فاصله وزنی می‌باشد. در این روش وزن نقاط نمونه بر روی نقطه مجهول بر اساس فاصله‌ی بین نقاط معلوم و نقطه مجهول محاسبه می‌شود. این اوزان توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شوند، به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه‌ی مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به طول یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. معادله‌ی زیر چگونگی محاسبه‌ی اوزان در این روش را نشان می‌دهد:

$$\omega_i = \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^{\alpha} - 1 \qquad (۲)$$

که در آن: ω_i وزن نقطه موردنظر، D_i فاصله بین نقطه نمونهiام و نقطه مجهول، α توان وزن‌دهی و D_o شعاع همسایگی می‌باشد. نسبت کاهش وزن بستگی به مقدار α دارد. اگر $\alpha = 0$ در نظر گرفته شود در این صورت کاهش در وزن با فاصله ایجاد نمی‌شود. بنابراین وزن در سطح فضا برابر فرض می‌شود، با افزایش مقدار α وزن برای نقاط دور با سرعت بیشتر کاهش می‌یابد. اگر مقدار α خیلی بزرگ باشد تنها نقاط مشاهده در پیش‌بینی تأثیر خواهد داشت. شکل شماره ۲ تأثیر تغییرات α را بر تغییرات مقادیر پیش‌بینی بر اساس فاصله از ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در مطالعات این مقدار معمولاً برابر ۲ در نظر گرفته

می‌شود، معمولاً متناسب با نیاز و ماهیت اطلاعات و تغییرات فضایی آن باید مقدار α تعیین شود.

انتخاب توان در روش معکوس فاصله وزنی می‌تواند توسط روش اعتبارسنجی تقاطعی صورت گیرد. نکته‌ای که در این روش وجود دارد این است که به نقاط دارای فاصله‌ی یکسان از نقطه‌ی مورد تخمین، وزن یکسان داده می‌شود و موقعیت و آرایش آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۲- تأثیر عامل α بر وزن نسبی

(α=۰ _____ ، α=۱ _ _ _ _ ، α=۲ _ _ _ _ _ _)

کریجینگ

کریجینگ یک روش زمین‌آمار برای درون‌یابی داده‌ها بر اساس واریانس فضایی است. مانند معکوس فاصله وزنی که در آن نزدیکی به نقاط نمونه به‌عنوان وزن برآورد محسوب می‌شد. در کریجینگ نیز واریانس فضایی تابعی از فاصله شناخته می‌شود (اندرسون، ۲۰۰۰).

شرط استفاده از این تخمین‌گر این است که متغیر Z دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا اینکه با تبدیل‌های مناسب توزیع متغیر را به نرمال تبدیل کرد. کریجینگ بهترین تخمین گر خطی ناریب و عاری از خطای سیستماتیک است. همچنین واریانس تخمین در آن حداقل است. بنابراین:

$$E[z(x_i) - z^*(x_i)] = 0 \qquad (۳)$$

که در آن $z(x_i)$ مقدار مشاهده شده در نقطه‌ی iام با مختصات معلوم، $z^*(x_i)$ مقدار تخمینی در همان نقطه‌ی iام و E امید ریاضی است.

کوکریجینگ

چنانچه متغیر کمکی در تمام نقاط شبکه موجود نباشد، روش کوکریجینگ روش مناسبی است (فرانسیسکو، 2010). این روش با استفاده از رابطه‌ی مکانی بین متغیر کمکی و اصلی، دقّت تخمین‌ها را افزایش می‌دهد.

$$z^*(x_i) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i . Z(x_i) \sum_{k=1}^{n} \omega_k . U(x_k) \qquad (۴)$$

که در آن ω_i وزن مربوط به متغیر Z در موقعیت x_i، ω_k وزن مربوط به متغیر U در موقعیت x_k، $U(x_k)$ مقدار مشاهده‌ای متغیر کمکی در موقعیت x_k.

محاسبه‌ی نیم تغییر نمای متقابل برای محاسبه‌ی وزن‌ها به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{zy}(h) = \tfrac{1}{2} n[Z(x_i + h) - Z(x_i)] \qquad (۵)$$
$$\times [Y(x_k + h) - Y(x_k)]$$

که در آن $\gamma_{zy}(h)$ نیم تغییرنمای متقابل Z و Y، $Z(x_i)$ متغیر مشاهده‌شده، $Y(x_k)$ متغیر کمکی می‌باشند (ثقفیان، 1384).

رگرسیون

در روش رگرسیون مناسب‌ترین تابع به نقاط مشاهده‌ای بر اساس کم‌ترین مربع انحراف برازش داده می‌شود. در مورد بارندگی و دما، رگرسیون تک یا چند متغیره با ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی بیش‌ترین کاربرد را دارد.

رگرسیون -کریجینگ

در شرایطی که در منطقه متغیر اصلی دارای روند باشد، می‌توان از روش رگرسیون کریجینگ استفاده کرد. در این روش، نخست باید روند موجود در داده‌ها را با یک رابطه محاسبه کرده و از داده‌های اصلی کم کرد. سپس باقیمانده‌ها

(جزء بدون روند) را با یک روش زمین‌آماری درون‌یابی و به مقادیر روند اضافه کرد. برای مثال، روند موجود در داده‌ها با استفاده از یک رابطه‌ی رگرسیون خطّی چندگانه بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌ها محاسبه‌شده و نقشه‌ی تغییرات آن ترسیم می‌شود. سپس نقشه‌ی تغییرات باقیمانده‌ها با روش کریجینگ محاسبه و نقشه‌ی نهایی از حاصل جمع این دو نقشه به دست می‌آید. معادله‌ی نهایی روش رگرسیون کریجینگ به‌صورت رابطه‌ی شماره ی شش است (اوده و همکاران، ۱۹۹۵).

(۶)

$$f(s_o) = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 h + \sum_{i=1}^{n} w_i\, z^*(s_i)$$

در این رابطه x،y و h به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع نقاط هستند.

در این پژوهش، از ارتفاع ایستگاه‌ها به‌عنوان متغیر کمکی استفاده شده است. بررسی نیم تغییر نمای داده‌ها در کل دوره آماری بیانگر مناسب بودن آن‌ها برای انجام روش‌های زمین‌آماری است.

معیارهای ارزیابی روش‌ها

از روش اعتبارسنجی متقاطع برای ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده شد. در این روش برای هر یک از نقاط مشاهده شده، برآورد تخمینی با به‌کارگیری روش درون‌یابی مورد نظر انجام می‌گیرد. معیارهای مختلفی برای مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده وجود دارد که در این مطالعه از دو روش میانگین انحراف خطا (MBE)[1] و ریشه دوم مربع میانگین خطا (RMSE) استفاده شد.

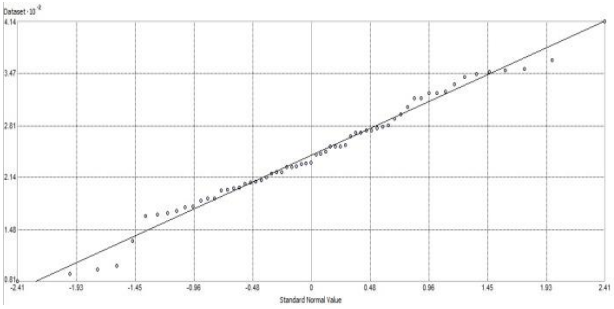
نرمال‌سازی داده‌ها

نرمال بودن توزیع داده‌ها به وسیله‌ی آزمون اندرسون دارلینگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که به جز فصل تابستان، توزیع داده‌های فصل‌ها دیگر در سطح اطمینان ۹۵٪ با توزیع نرمال، اختلاف معنی‌داری ندارد. نرمال‌سازی داده‌های فصل تابستان توسط تبدیل لگاریتمی انجام شد.

ارزیابی روش‌های درون یابی

به منظور امکان استفاده از هر یک از ۵ مدل به بررسی روند، همبستگی مکانی و ناهمسان‌گری داده‌ها پرداخته شد و در نهایت مدل‌های قابل اجرا انتخاب شدند. توان فاصله (Power)، تعداد نقاط همسایگی (Neighbor point)، شعاع همسایگی (Neighbor distance) و پارامتر هموارسازی از جمله مهم‌ترین پارامترهایی بودند که قبل از اجرای مدل، بهینه‌سازی شدند. از روش اعتبارسنجی متقاطع پارامترهای هر مدل بهینه شده و پارامتری که کمترین میزان خطا را داشت به عنوان پارامتر بهینه آن مدل انتخاب شد.

برای انتخاب روش مناسب برای درون‌یابی داده‌های بارش سالانه، به بررسی و تجزیه و تحلیل توصیفی داده‌ها پرداخته شد. بدین منظور ابتدا شاخصه‌های آمار توصیفی برای متغیر بارش محاسبه شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف یک نمونه‌ای و ترسیم نمودار q–q بررسی شد (شکل۳).



شکل ۳– ترسیم نمودار q-q متغیر بارش به‌منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها

آنالیز نیم تغییرنما

نتایج انتخاب مناسب‌ترین مدل نیم تغییر نما از بین پنج مدل مورد بررسی برای دادهای فصلی و ده ساله همراه با خصوصیات آنها در جدول شماره‌ی (۱) نشان داده شده است.

1- Mean Bias Error

بهترین الگوی نظری با توجه به رفتار نیم تغییر نما در نزدیکی مبدأ مختصات، کمترین مجموع مربعات باقی مانده‌ها (RSS)، بیشترین ضریب همبستگی (R^2)، بیشترین تناسب ساختار مکانی ($C/C+C_O$) و نتایج اعتبارسنجی متقابل تعیین شد. تناسب ساختار مکانی نسبت کل بخش ساختار واریانس (C) به کل واریانس ($C+C_O$) است که هر اندازه به یک نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر است (دیتسج و جورنل،۱۹۹۸).

با توجه به این جدول می‌توان دریافت که در فصل تابستان ساختار مکانی داده‌ها نسبت به فصل‌های دیگر ضعیف‌تر است. دلیل این موضوع بارندگی‌های کم در این فصل و ماهیّت محلّی بودن بارش‌هاست که کاهش دامنه‌ی تأثیر بارندگی ایستگاه‌ها مویّد آن است.

پژوهشگران دیگر در ایران مانند نادی و همکاران (۱۳۹۱) دامنه‌ی تأثیر بارندگی را بین ۸۰ در ماه‌های گرم تا ۲۵۰ در ماه‌های سرد بدست آوردند که دامنه‌ی تأثیر بدست آمده در این پژوهش با نتایج ایشان همسان است.

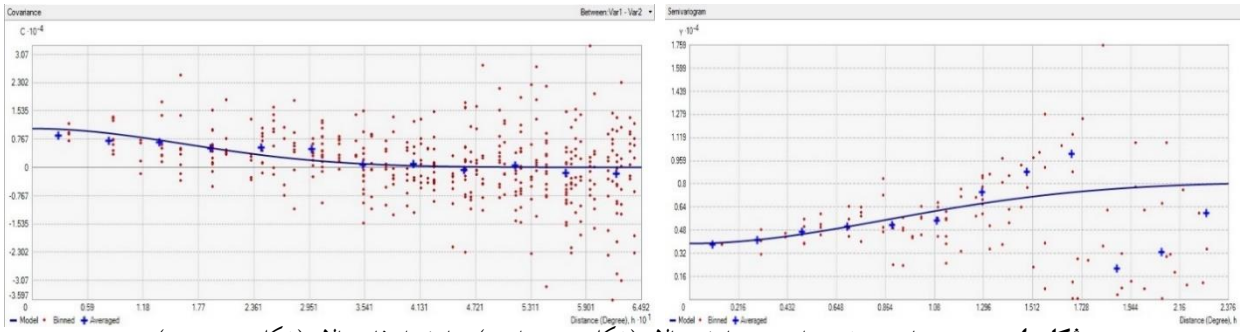
به‌منظور محاسبه معادله رگرسیون بارندگی با ارتفاع ابتدا ضریب همبستگی محاسبه شد و سپس معادله رگرسیونی ترسیم شد (جدول ۱ و شکل ۶).

بر اساس روش ارزیابی متقابل، مدل‌نمایی کمترین میزان خطا را برای متغیر بارش نشان داد. لذا از این مدل برای انجام روش کریجینگ استفاده شد. بعد از بهینه کردن بهترین مدل نیم تغییر نما، ترسیم نیم تغییر نما برای متغیر بارندگی بر اساس مدل کروی انجام شد که با یافته‌های محققان دیگر مطابقت داشت (فرجی سبکبار، ۱۳۸۵؛ دلبری، ۱۳۹۱؛ لیلود، ۲۰۰۵؛ مایر و فاریس، ۲۰۱۰).

به منظور بررسی امکان استفاده از مدل کوکریجینگ، نیم تغییر نمای متقابل بارندگی و ارتفاع ترسیم شد. بارش و ارتفاع در نیم تغییر نما همبستگی مکانی نشان دادند، لذا امکان استفاده از روش کوکریجینگ وجود داشت (شکل ۴).

جدول ۱- بررسی مدل‌های مختلف نیم تغییر نما برای متغیر بارش

فصل	مدل ساختار مکانی	دامنه تاثیر(KM)	آستانه CO+C	اثر قطعه‌ای CO	تناسب ساختارمکانی C/(C+CO)	ضریب همبستگی R^2	RSS
بهار	کروی	۲۳۵،۱	۳،۰۶۴	۱،۴۸۳	۰،۵۱۶	۰،۸۷۱	۰،۰۸۱
تابستان	نمایی	۱۲۱،۲	۰،۷۹۰	۰،۵۰۲	۰،۳۶۴	۰،۲۲۷	۰،۱۹۳
پاییز	کروی	۲۰۲،۱	۰،۱۳۶	۰،۰۲۱	۰،۸۴۱	۰،۷00	۰،۰۰۱
زمستان	کروی	۲۸۰،۵	۰،۱۴۱	۰،۰۵۹	۰،۵۸۱	۰،۴۳۵	۰،۰۰۲
سالانه	کروی	۲۱۰،۹	۰،۳۲۴	۰،۰۵۰	۰،۸۴۴	۰،۷۴۳	۰،۰۰۶



شکل ٤- نیم تغییر نما ترسیم‌شده برای متغیر بارش سالانه (شکل سمت راست) و بارش ارتفاع سالانه (شکل سمت چپ)

به منظور تعیین توزیع مکانی بارندگی فصلی و سالانه دشت مشهد، روش‌های مختلف میان‌یابی شامل روش‌های زمین آماری و رگرسیون خطی ارزیابی شد. به دلیل فاصله‌ی بسیار زیاد تا دریا، متغیر کمکی فاصله تا خط ساحلی مورد ارزیابی قرار نگرفت. روش‌های چند جمله‌ای محلی (LPI)[1] و چند جمله‌ای جهانی (GPI)[2] در بیشتر دوره‌ها نتایج مناسبی به دست نداده‌اند. آپادین و همکاران (۲۰۰۴) این دو روش را به عنوان دو روش غیر دقیق برای بررسی توزیع مکانی بارندگی در مناطق با تغییرات ارتفاعی زیاد معرفی کرده‌اند.

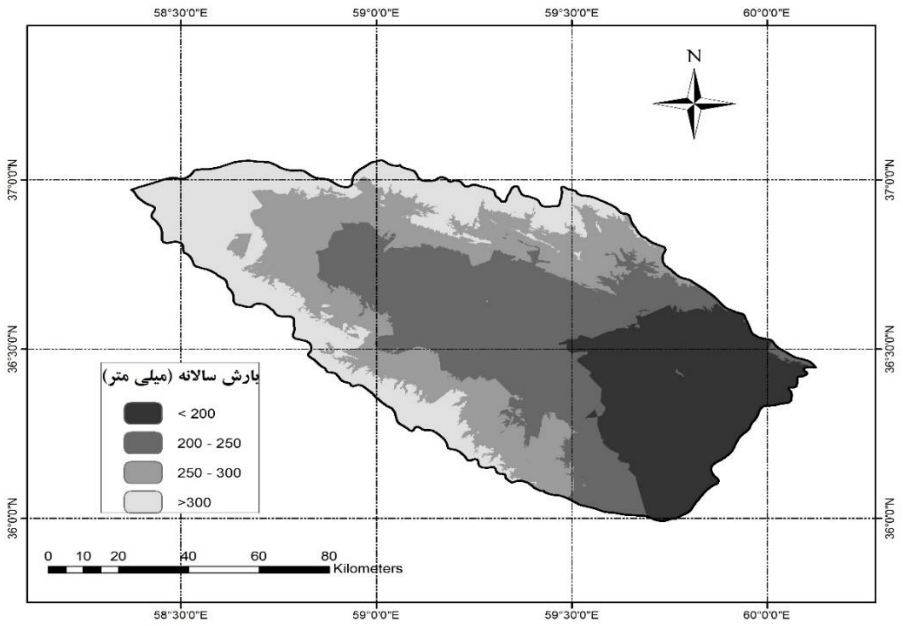
نتایج اغلب پژوهش‌های در نقاط مختلف ایران و جهان به منظور انتخاب بهترین روش درون‌یابی حاکی از آن است که استفاده از متغیر کمکی ارتفاع در مناطق با اختلاف ارتفاع زیاد مناسب‌تر از سایر روش‌ها بوده است (مایر و فاریس،۲۰۱۰؛ نادی، ۱۳۹۱). از این جهت متغیرکمکی ارتفاع برای ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده شد.

با بهره‌گیری از متغیرکمکی ارتفاع، روش‌های مختلف درون‌یابی محاسبه شد و نتایج خطای حاصل از هر کدام از روش‌ها (جدول ۲) مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که در هر فصل بهار، تابستان، پاییز، زمستان و سالانه، روش رگرسیون-کریجینگ با داشتن کمترین مقدار RMSE، بیشترین دقت تخمین بارندگی را داشته است.

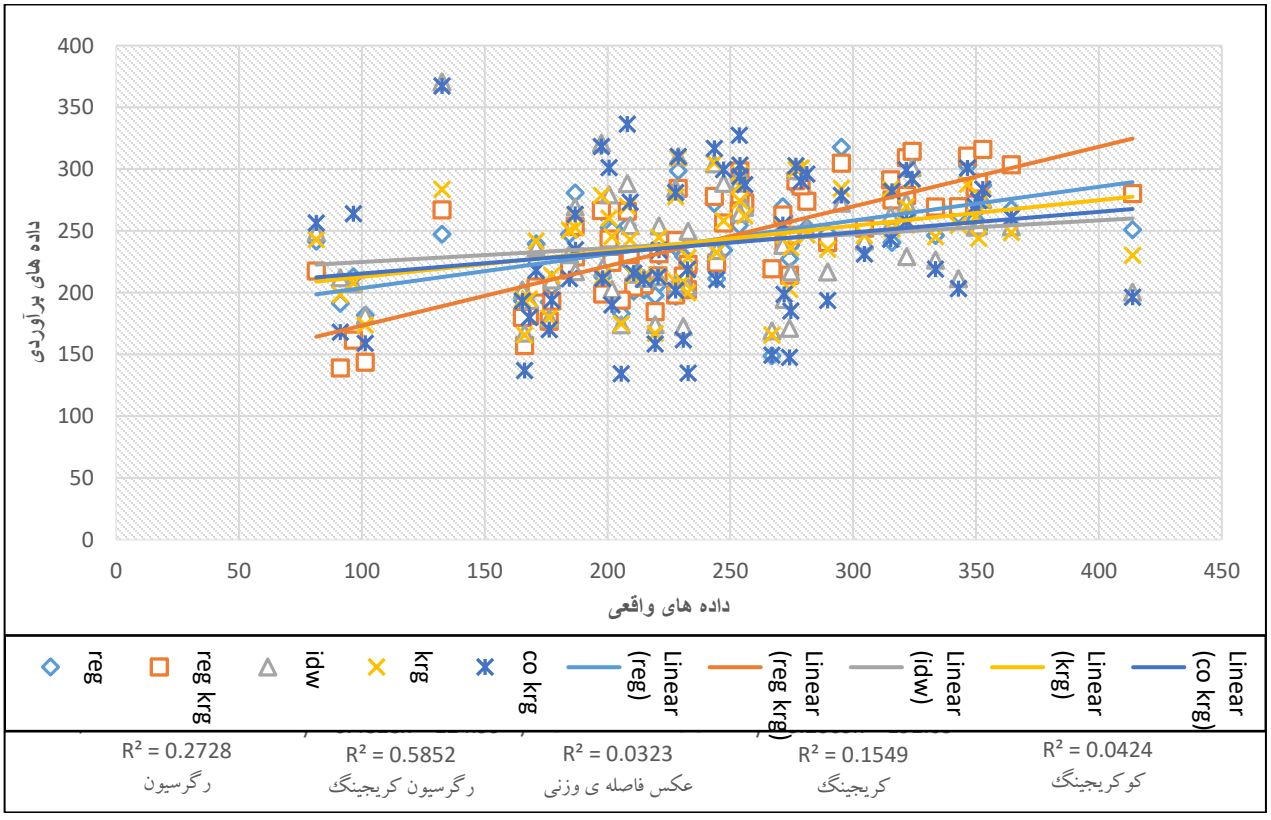
جدول ۲- ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های بارش در دشت مشهد

فصل	خطا	کریجینگ	رگرسیون کریجینگ	رگرسیون	وزنی عکس فاصله	کو کریجینگ
بهار	RMSE	3,097	0,994	2,540	3,118	3,146
	MBE	0,956	1,329	0,411	0,436	3,250
تابستان	RMSE	1,138	0,648	0,919	1,103	1,087
	MBE	0,013	0,542	0,235	0,253	1,942
پاییز	RMSE	2,061	1,731	2,063	1,969	2,138
	MBE	0,054	0,267	0,282	0,652	0,516
زمستان	RMSE	4,944	4,104	4,597	4,870	5,539
	MBE	0,682	1,787	0,313	1,732	5,341
سالانه	RMSE	8,265	5,854	7,588	9,612	10,235
	MBE	3,049	۰،۳00	0,349	0,301	0,005

1- Local polynomial interpolation
2- Global polynomial interpolation



شکل ۵- نقشه پیوسته توزیع مکانی بارش متوسط سالانه بر اساس مناسب‌ترین روش (رگرسیون کریجینگ) برای متغیر بارش



شکل ٦- تحلیل رگرسیونی روش‌های مختلف تحلیل مکانی داده‌های بارش سالانه

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دقت ۵ روش مختلف درون‌یابی ارزیابی شد. این ارزیابی از طریق تجزیه و تحلیل میانگین ده‌ساله‌ی بارش در منطقه‌ی دشت مشهد به وسیله‌ی نرم‌افزارهای GIS و GS+ صورت گرفت.

با بررسی نتایج تحلیل رگرسیونی و میانگین مربعات خطا بهترین روش درون‌یابی در مورد بارش‌های درازمدت سالانه رگرسیون- کریجینگ انتخاب شد و نقشه پیوسته توزیع مکانی بارش بر اساس آن رسم شد (شکل ۵)، اما درمورد بارش‌های درازمدت فصلی با توجه به نتایج ضعیف ضریب همبستگی و همچنین پراکندگی بارش، روش رگرسیون -کریجینگ مناسب نیست و باید از روش کریجینگ به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی استفاده شود (جدول ۲).

دلیل اصلی انتخاب روش رگرسیون -کریجینگ استفاده از ارتفاع به‌عنوان متغیرکمکی است که تا حدودی توانست مشکل کمبود ایستگاه‌های مرتفع در منطقه را رفع کند.

با توجه به اینکه بیشترین بارش‌ها در ارتفاعات صورت می‌گیرد و از طرفی امکان وجود ایستگاه‌های هواشناسی در ارتفاع زیاد در این منطقه نیست؛ استفاده از روش رگرسیون- کریجینگ تخمین دقیق‌تری از بارش در ارتفاعات ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که، استفاده از متغیرکمکی ارتفاع، سبب افزایش دقت برآوردهای مکانی داده‌های بارش در دشت مشهد می‌شود.

منابع

۱- ثقفیان، ب.، سیما، مقایسه‌ی روش‌های درون‌یابی و برون‌یابی برای برآورد توزیع مکانی مقدار بارندگی سالانه، دو فصل‌نامه‌ی تحقیقات منابع آب ایران، سال اول، شماره۲، صفحه۷۴ الی ۸۴ ، ۱۳۸۴.

۲- فرجی سبکبار، ح.، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی مطالعهٔ موردی: الگوسازی بارندگی حوزهٔ کارده مشهد، دوره ۳۸، شماره ۵۸، صفحه ۱ الی ۱۵، ۱۳۸۵.

۳- حسنی پاک، ع.، زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک)، چاپ دوم، ۱۳۸۸، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

۴- دلبری، م.، جهانی، س.، ارزیابی استفاده از مدل رقومی ارتفاع در تخمین بارش ماهانه و سالانه استان گلستان، مجله آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۶، صفحه ۱۱۸ الی ۱۳۲، ۱۳۹۱.

۵- میرموسوی، س، مزیدی، ا.، تعیین بهترین روش زمین آمار جهت تخمین توزیع بارندگی با استفاده ازGIS (مطالعه موردی استان اصفهان)، فصل‌نامه‌ی فضایی جغرافیایی، سال دهم، شماره ۳۰، صفحه ۱۰۵ الی ۱۲۰، ۱۳۸۹.

۶- معروفی، ص، گل محمدی، گ، محمدی، ک.، ارزیابی روش‌های زمین آمار در برآورد توزیع مکانی بارش در استان همدان در محیط GIS، مجله دانش آب و خاک، دوره۱۹، شماره ۲، صفحه ۱ الی ۱۸، ۱۳۸۸.

۷- نادی، م.، ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۴، صفحه ۱۱۷ الی ۱۳۰، ۱۳۹۱.

8- Anderson. Sharolyn, An Evaluation of Spatial Interpolation Methods pn Air Temperature in Phoenix،AZ, 2000.

9- Apaydin, H., Sonmez, F.K. and Yildirim, Y.E. "Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey". *Climate Research*. Vol. 28. No. 1: 31-40, 2004

10- Coulibaly, M., Becker, S., Spatial Interpolation of Annual Precipitation in South Africa Comparison and Evaluation of Methods, International Water Resources Association, Water International, Vol. 3, No. 23, PP. 494-502, 2007.

11- Deutsch, C.V. and Journel, A.G.,*GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. 2nd ed. NewYork: Oxford University Press, 1988.

12- Francisco, J. M., Comparison of Different Geostatistical Approaches to Map Climate Variables:

Application to Precipitation International Journal of Climatology, No. 30, PP. 620-631, 2010.

13- Goovaerts, P., Geostatistical Approaches for Incorporating Elevation Into the Spatial Interpolation of Rainfall, Journal of Hydrology, Vol. 228, PP. 113-129., 2000.

14- Kravchenko, A., Zhang, R., Tung, Y, Estimation of Mean Annual Precipitation in Wyoming Using Geostatistical Analysis, 16th Annual Hydrology Days, Colorado., 1996.

15- Lloyd, C. "Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain". *Journal of Hydrology*. Vol. 308: 128-150. 2005.

16- Mair, A. and Fares, A. "Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of atropicalisland". *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 16. No. 4: 371-383. 2010.

17- Odeh, I. O. A., McBratney, A.B., Chittleborough, D. J., Geoderma, Further Results on Prediction of Soil Properties from Terrain Attributes: Heterotopic Cokriging and Regression-Kriging Vol. 67, No.3, PP. 215-226, 1995.

18- Siska،peter .P. and I-Kuai Hung, Assessment of kriging Accuracy in the GIS Environment, Http://gis.esri.com/userconf/proc01/professional/papers/pap280/ p280.htm, 2001.

19- Zhang, X., Srinivasan, R., GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A Comparison of Geostatistical Approaches, Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), Vol. 45, No. 4, PP. 894- 906., 2009.