ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه (مطالعه موردی: استان خوزستان)

مهدی نادی-مژده جامعی-جواد بذرافشان

چکیده

نقشه‌های همبارش یک منطقه پیش‌نیاز بسیاری از مطالعات هیدرولوژی, هواشناسی و اقلیم‌شناسی می‌باشد. دقت نقشه‌های همبارش وابسته به روش مورد استفاده جهت مکانی کردن داده‌های بارندگی است. با توجه به توپوگرافی پیچیده استان خوزستان و فقدان ایستگاه‌های هواشناسی مرتفع با آمار درازمدت در آن، تعیین روش مناسب درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه در این استان ضروری بنظر می‌رسد. به این منظور، هفت روش درون‌یابی شامل کریجینگ عمومی، کوکریجینگ، کریجینگ با روند خارجی، رگرسیون کریجینگ، وزنی عکس فاصله، اسپلاین و گرادیان خطی سه بعدی با یکدیگر مقایسه شدند. در تحلیل واریوگرافی داده-های بارندگی پنج نوع مدل نیم‌تغییرنما شامل: مدل‌های کروی، نمایی، خطی، خطی دارای حد آستانه و گوسی بر داده‌های بارندگی برازش داده شد. ارزیابی روش‌ها با استفاده از تکنیک اعتبارسنجی حذفی انجام شد و انتخاب روش مناسب درون‌یابی براساس تحلیل رگرسیونی، محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب صورت گرفت. نتایج تحلیل واریوگرافی نشان داد مدل کروی به عنوان بهترین مدل تئوری نیم تغییرنما می‌باشد. همچنین داده‌های بارندگی این منطقه در تمامی ماه‌ها، بجز ماه‌های کم‌بارش دارای ساختار مکانی قوی بودند. تحلیل نتایج نشان داد که تمامی روش‌ها بجز روش رگرسیون کریجینگ در برآورد مقادیر زیاد بارندگی دچار خطای کم برآوردی هستند. با مقایسه روش‌های درون‌یابی مورد بررسی، روش رگرسیون کریجینگ به عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه تشخیص داده شد. همچنین با روش منتخب نقشه همبارش سالانه استان ترسیم شد و از روی آن میانگین بارندگی سالانه منطقه ۳۹۱ میلیمتر بدست آمد که این مقدار به اندازه ۴۱ میلیمتر بیشتر از مقدار ارائه شده توسط سازمان هواشناسی کشور است که دلیل آن استفاده از ارتفاع به عنوان متغیر کمکی می‌باشد که تا حدودی توانست مشکل کمبود ایستگاه‌های مرتفع در منطقه را رفع کند. به علاوه نتایج تحقیق نشان داد روش‌هایی که از متغیر ارتفاع به عنوان متغیر کمکی برای برآورد بارندگی استفاده می‌کنند نسبت به روش‌های دیگر از دقت بالاتری برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: بارندگی، روش‌های درون‌یابی ، رگرسیون کریجینگ، اسپلاین، خوزستان.

مقدمه

در بسیاری از مطالعات اقلیمی و مدیریت منابع آب، مدل‌های هیدرولیکی، پیش‌بینی سیلاب، مطالعات تغییر اقلیم، برآورد بیلان آب، برنامه‌ریزی‌های آبیاری و... وجود داده‌های بارندگی و مخصوصاً توزیع مکانی آن (نقشه همبارش) اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌های مختلفی جهت برآورد منطقه‌ای بارندگی در سطوح وسیع وجود دارد که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به روش‌های زمین‌آماری اشاره کرد. مطالعات مختلفی در زمینه درون‌یابی داده‌های بارندگی در ایران انجام شده است. نادی (۱۳۸۹، ۶۰) با مقایسه دقت و صحت هفت روش درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه در منطقه جنگلی چهارباغ گرگان نشان دادند که روش‌های مورد بررسی تفاوت زیادی با یکدیگر نداشته و روش جدیدی به نام هیبرید خطی و غیرخطی در منطقه توسعه دادند. میرموسوی و همکاران (۱۳۸۹، ۱۱۸) روش‌های کریجینگ ساده، معمولی و یونیورسال را برای تخمین توزیع بارندگی استان اصفهان مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که روش کریجینگ معمولی با مدل دایره-ای مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی مقادیر بارندگی سالانه در منطقه می‌باشد. ثقفیان و رحیمی (۱۳۸۴، ۸۱) جهت بررسی توزیع مکانی بارندگی ماهانه و سالانه در جنوب غرب ایران با مقایسه روش‌های زمین آماری دریافتند که کوکریجینگ تغییرات مکانی بارندگی در منطقه را بهتر نشان می‌دهد. مهدوی و همکاران(۱۳۸۳، ۱۳) با بررسی روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، میانگین متحرک وزنی و اسپلاین جهت برآورد توزیع مکانی بارش سالانه در مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرقی ایران، روش اسپلاین با متغیر کمکی ارتفاع را توصیه نمودند. مهدیزاده(۱۳۸۱، ۸۷) با بررسی چند روش زمین‌آماری جهت درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه روش اسپلاین با توان ۲ را پیشنهاد نمودند. تحقیقات زیادی در دنیا برای معرفی روش مناسب درون‌یابی داده‌های بارندگی انجام شده است. به عنوان نمونه, فرانسیسکو[1](۲۰۱۰، ۶۲۶) نشان داد که در درون‌یابی داده‌های بارندگی الگوریتم‌های چندمتغیره نسبت به الگوریتم‌های ساده دارای خطای کمتری می باشند. ژانگ[2] و سرینیواسان[3](۲۰۰۹، ۹۰۳) با بررسی روش‌های خانواده کریجینگ و وزنی عکس فاصله، نشان دادند که روش کریجینگ با روند خارجی دارای کمترین خطا در بین سایر روش‌هاست. کولیبالی[4] و بیکر[5](۲۰۰۷، ۴۹۹) و جفری[6] و همکاران(۲۰۰۱، ۳۲۱) با مقایسه روش‌های مختلف زمین آماری جهت درون یابی بارندگی سالانه، ماهانه و روزانه روش کریجینگ معمولی را توصیه نمودند. بوئر[7] و همکاران(۲۰۰۱، ۱۵۰) با بررسی ۴ فرم کریجینگ و ۳ فرم اسپلاین نشان دادند که روش رگرسیون کریجینگ سه متغیره بهترین روش برآورد می‌باشد. همچنین کراوچنکو[8] و همکاران(۱۹۹۶، ۲۲۷) برای میان‌یابی بارندگی سالانه نشان دادند که استفاده از روش کریجینگ با روند خارجی واریانس خطا را ۳۰ تا۴۰ درصد نسبت به روش کریجینگ کاهش می‌دهد.

بررسی نقشه تغییرات توپوگرافی استان خوزستان نشان داد که ارتفاع این منطقه بین صفر تا ۳۷۱۲ متر نوسان می‌کند درحالیکه ایستگاه‌های هواشناسی آن در محدوده ۳ تا ۸۷۵ متر قرار دارند از طرفی بارندگی

---

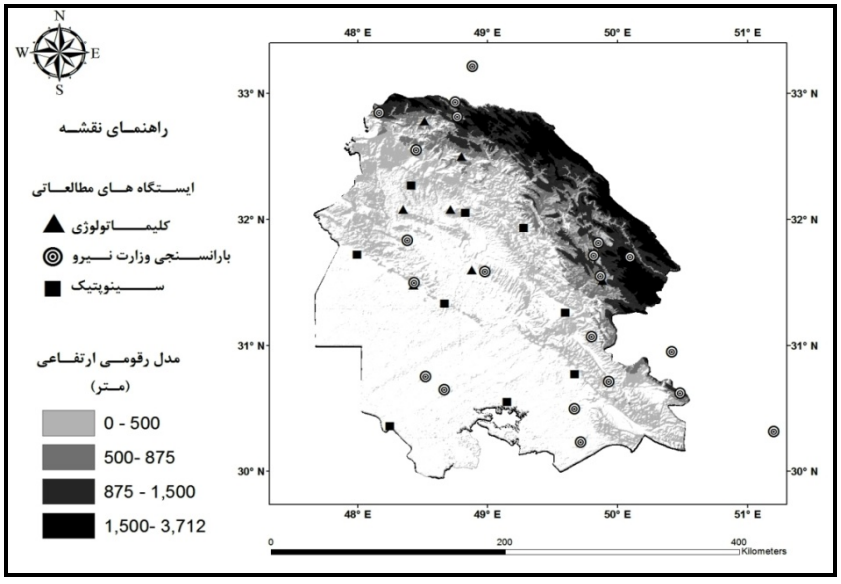
1 . *Francisco*
2 . *Zhang*
3 . *Srinivasan*
4 .*Coulibali*
5 . *Becker*
6 . *Jeffrey*
7 . *Boer*
8 . *Kravchenko*

زیادی در ارتفاعات این منطقه ریزش می‌کند. با توجه به تغییرات توپوگرافیک شدید در این استان و در نتیجه وجود روند در داده‌های بارندگی و اهمیت نقشه همبارش در این منطقه به عنوان قطب کشاورزی کشور، در این تحقیق سعی شد اولاً دقت روش‌های نسبتاً جدید درون‌یابی داده‌های بارندگی به منظور افزایش دقت برآوردهای منطقه‌ای مورد آزمون قرار گیرد سپس با استفاده از نقشه تغییرات بارندگی روش منتخب، یک مقدار جدید برای بارندگی سالانه درازمدت این استان ارائه شود و با مقدار بارش سالانه ارائه شده توسط (سازمان هواشناسی کشور[1]، ۲۰۰۵، ۲۳۶) مقایسه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

استان خوزستان با ۶۴۷۴۶ کیلومترمربع مساحت در جنوب غربی ایران واقع شده است و دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک بوده و از لحاظ توپوگرافی به دو بخش کوهستانی و جلگه‌ای تقسیم می‌گردد. دوره بارندگی این منطقه معمولاً از مهرماه تا اردیبهشت ماه است. برای انجام این تحقیق داده‌های میانگین دراز مدت بارندگی ماهانه و سالانه ۳۷ ایستگاه (سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی و باران‌سنجی وزارت نیرو) طی دوره مشترک آماری ۲۲ ساله(۱۹۸۴-۲۰۰۵) مورد استفاده قرار گرفتند. در این تحقیق از حداکثر ایستگاه‌های قابل اعتماد و دارای آمار کافی استفاده شد که پراکنش آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور درک بهتر از توزیع توپوگرافی منطقه، نقشه تغییرات ارتفاعی(DEM) آن به ۱۰ طبقه تفکیک گردید و مساحت هر طبقه تعیین گردید که مشخص شد بیش از ۸۵٪ منطقه در ارتفاع کمتر از ۸۷۵ متر قرار دارد به عبارتی ایستگاه‌های مورد استفاده ۸۵٪ منطقه را پوشش می‌دهند. و تنها ۱۵٪ از مساحت منطقه در محدوده ارتفاعی(۸۷۵-۳۷۰۰) قرار دارد. همچنین مشخص شد که تنها ۳٪ منطقه بالاتر از خط ۲۰۰۰ متری قرار دارند.



شکل-۱: موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در استان خوزستان

[1] . *Iranian Meteorological Organaization*

روش‌های درون‌یابی

روش‌های درون‌یابی داده های مکانی به منظور تخمین یک متغیر در یک نقطه خاص از روی داده‌های واقعی اندازه گیری شده در نقاط مجاور به کار می‌روند. کلیه روش‌های خانواده کریجینگ به علاوه روش وزنی عکس فاصله از فرمول زیر برای برآورد مقدار یک متغیر درنقاط فاقد اندازه‌گیری استفاده می‌کنند:

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

رابطه (۱) بیان می‌کند که مقدار یک متغیر هواشناسی در یک نقطه برابر است با ترکیب خطی n ایستگاه مجاور آن(حسنی پاک ،۱۳۸۶، ۱۸۲). تفاوت روش‌های مختلف درون‌یابی در λ_i های به کار گرفته شده برای هر ایستگاه می‌باشد که وزن ایستگاه نام دارد. در روش وزنی عکس فاصله λ_i ها برابر عکس فاصله بین ایستگاه تا نقطه مورد بررسی به توان a است. در این روش هرچه a بزرگتر باشد یعنی اهمیت ایستگاه‌های نزدیک در برآورد بیشتر است(رحیمی و مهدیان، ۱۳۸۴، ۶۶). کریجینگ یک روش تخمین زمین آماری نااریب با کمترین واریانس تخمین است. برای ارضای شرط نااریب بودن باید مجموع ضرایب ایستگاه‌ها برابر ۱ شود. در این روش تعیین λ_i ها بر اساس آنالیز نیم‌تغییرنما می‌باشد که نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین ایستگاه‌های هواشناسی را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو ایستگاه و با توجه به جهت و فاصله آن‌ها نشان می‌دهد و دارای سه مشخصه اثر قطعه‌ای[1] (بخش توجیه نشده نیم‌تغییرنما(C_0))، آستانه[2] (حداکثر مقدار نیم‌تغییرنما که برابر است با مجموع بخش ساختاردار(C) و بدون ساختار(C_0)) و دامنه تأثیر[3] (فاصله‌ای که در آن نیم‌تغییرنما به حد ثابتی می‌رسد) می‌باشد.(حسنی پاک ،۱۳۸۶، ۱۸۲). هنگامی که از متغیر اصلی در منطقه به اندازه کافی داده نداشته باشیم اما داده‌های یک متغیر کمکی همبسته با متغیر اصلی در منطقه موجود باشد می توان با استفاده از تکنیک‌هایی روش کریجینگ را با متغیر کمکی ترکیب نمود. چنانچه متغیر کمکی در تمام نقاط شبکه موجود نباشد روش کوکریجینگ روش مناسبی است(فرانسیسکو،۲۰۱۰، ۶۲۱). این روش با استفاده از رابطه مکانی بین متغیر کمکی و اصلی دقت تخمین‌ها را افزایش می دهد. چنانچه متغیر کمکی در تمام نقاط شبکه موجود باشد روش کریجینگ با روند خارجی[4] روش مناسبی است. که این روش با استفاده از رابطه خطی بین متغیر اصلی و کمکی به پیش بینی متغیر اصلی می‌پردازد (بوئر و همکاران، ۲۰۰۱، ۱۵۰). در شرایطی که در منطقه متغیر اصلی دارای روند باشد می-توان از روش رگرسیون کریجینگ استفاده نمود. در این روش ابتدا باید روند موجود درداده‌ها را با یک معادله محاسبه نموده و از داده‌های اصلی کم کرد سپس باقیمانده‌ها(جزء بدون روند) را با یک روش زمین آماری درون‌یابی نموده و به مقادیر روند اضافه نمود به عنوان مثال روند موجود در داده‌ها با استفاده از یک رابطه رگرسیون خطی چندگانه بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌ها محاسبه شده و نقشه تغییرات آن ترسیم می‌شود سپس نقشه تغییرات باقیمانده‌ها با روش کریجینگ محاسبه و نقشه نهایی از حاصل جمع این دو نقشه بدست می‌آید. معادله نهایی روش رگرسیون کریجینگ به صورت زیر می‌باشد(اوده[5] و همکاران، ۱۹۹۵، ۲۲۱).

---

[1] . *Nugget Effect*
[2] . *Sill*
[3] . *Range of Influence*
[4] . *Kriging with external drift*
[5] . *Odeh*

$$\hat{f}(s_0) = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 x + \hat{\beta}_2 y + \hat{\beta}_3 h + \sum_{i=1}^{n} w_i z^*(s_i) \qquad (۲)$$

در معادله فوق x ، y و h به ترتیب طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع نقاط می‌باشد.

اسپلاین‌ها توابع غیرپارامتری با قابلیت ارتجاعی بالایی هستند و می‌توان آن‌ها را یک تابع چندجمله‌ای تکه‌ای نامید یعنی توابع پیچیده‌ای شامل قطعاتی از چندجمله‌ای ها با درجات مختلف بین هر دو نقطه از فضا که درمحل اتصالات نرم شده‌اند (مهدیزاده، ۱۳۸۱، ۵۷). می‌توان گفت این روش نوع خاصی از روش کریجینگ جامع است با این تفاوت که برای محاسبه فاکتورهای وزنی به جای آنالیز نیم تغییرنما به برآورد پارامتر پیرایشی[۱] نیاز دارد که با تغییر آن می توان بهترین مدل را بر داده‌ها برازش داد(هاتچینسون[۲] و گسلر[۳]، ۱۹۹۴، ۵۶). در روش گرادیان خطی سه بعدی فرض بر آن است که در راستای طول و عرض و ارتفاع منطقه روند خطی وجود دارد که با برازش یک رابطه رگرسیون خطی چندگانه بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی می‌توان در نقاط مختلف با داشتن طول و عرض و ارتفاع آن، مقدار متغیر اصلی را تخمین زد.

در این تحقیق به منظور تعیین بهترین روش مکانی‌کردن داده‌های بارندگی هفت روش میان‌یابی شامل کریجینگ عمومی، کوکریجینگ، کریجینگ با روند خارجی، رگرسیون کریجینگ، وزنی عکس فاصله، اسپلاین و گرادیان خطی سه بعدی با یکدیگر مقایسه شدند. با توجه به همبستگی خوب بارندگی با ارتفاع در استان خوزستان و همچنین به پیشنهاد (گوارتز[۴]، ۲۰۰۰، ۱۲۶) در این تحقیق از متغیر ارتفاع به عنوان متغیر کمکی استفاده شد. در تحلیل واریوگرافی پنج نوع مدل نیم تغییرنما شامل مدل‌های کروی، نمایی، خطی، خطی دارای حد آستانه و گوسی بر داده‌ها برازش داده شد واز بین آن‌ها نیم تغییرنمای مناسب بر اساس ضریب همبستگی بیشتر و نسبت بخش ساختاردار به بی‌ساختار بالاتر انتخاب گردید. نرم افزارهای مورد استفاده در این تحقیق شامل *GS+* و *Mini Tab* و *Arc Gis* بودند.

معیارهای ارزیابی روش‌ها

به منظور ارزیابی روش‌های درون‌یابی مورد بررسی از روش اعتبارسنجی حذفی[۵] استفاده شد. جهت مقایسه و و انتخاب بهترین روش از تحلیل رگرسیونی و محاسبه شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا[۶] و میانگین خطای اریب[۷] استفاده شد که به صورت زیر محاسبه می گردند(ویلکس[۸]، ۲۰۰۶، ۲۸۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right]^2}{N}} \qquad (۳)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right]}{N} \qquad (۴)$$

که در آن، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده و $\hat{Z}(x_i)$ مقدار برآوردشده و N تعداد داده‌ها می‌باشند. در روش تحلیل رگرسیونی بین داده های واقعی و برآوردی یک رابطه رگرسیونی خطی ساده به صورت زیر برقرار می شود

$$Y_{es} = a + bY_{ac} \qquad (۵)$$

---

[1] . *Smoothing*
[2] . *Hutchinson*
[3] . *Gessler*
[4] . *Goovaerts*
[5] . *Cross Validation*
[6] . *Root Mean Square Error (RMSE)*
[7] . *Mean Bias Error (MBE)*
[8] . *Wilks*

سپس این معادله با خط ۱:۱ مقایسه می‌گردد. به عبارتی هر چه عرض از مبدأ(a) به صفر و شیب(b) به یک نزدیکتر و ضریب همبستگی مقادیر واقعی(Y_{ac}) و برآوردی(Y_{es}) بالاتر باشد روش مورد نظر از دقت بالاتری برخوردار است.

یافته‌های تحقیق

آزمون نرمال بودن و نرمال‌سازی داده‌ها

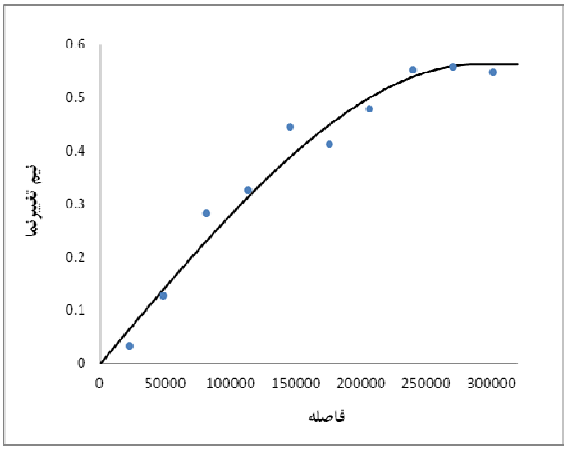
قبل از مکانی کردن داده‌های بارندگی نرمال بودن توزیع احتمالاتی آن‌ها توسط آزمون اندرسون دارلینگ مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمامی موارد به جز ماه‌های ژانویه و دسامبر توزیع داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ با توزیع نرمال اختلاف معناداری ندارد. که برای نرمال‌سازی داده‌های مربوط به ماه‌های ژانویه و دسامبر از تبدیل لگاریتمی استفاده شد.

آنالیز نیم تغییرنما

نتایج انتخاب مناسب‌ترین مدل نیم تغییرنما از بین پنج مدل مورد بررسی برای داده‌های ماهانه و سالانه به همراه خصوصیات آن‌ها در جدول(۱) نشان داده شده است. بررسی نسبت بخش ساختاردار به بی‌ساختار نشان داد که در بیش از ۸۵ درصد موارد, نقش مؤلفه ساختاردار به بی‌ساختار خیلی بیشتر بوده که این حاکی از ساختار مکانی مناسب داده‌های بارندگی در منطقه است. همچنین باتوجه به جدول مذکور می‌توان دریافت که در ماه‌های گرم سال ساختار مکانی داده‌ها ضعیف می‌شود. این موضوع, اولاً به دلیل رخداد بارندگی‌های کم در این ماه‌ها و ثانیاً ماهیت محلی بودن بارش‌هاست که کاهش دامنه تأثیر بارندگی ایستگاه‌ها در اغلب ماه-های گرم مؤید این واقعیت است. دامنه تأثیر داده‌های بارندگی ایستگاه‌ها نیز بین ۸۱/۱ در ماه‌های گرم تا ۲۵۰/۳ کیلومتر در ماه‌های سرد نوسان می‌کند. دیگر محققین در ایران مانند رحیمی و مهدیان(۱۳۸۴، ۶۷)، مهدیزاده(۱۳۸۱، ۷۲) و اختری و همکاران(۱۳۸۶، ۳۳) به ترتیب مقادیر دامنه تأثیر ۳۰۰، ۲۵۰ و ۱۲۵ کیلومتر را بدست آوردند که دامنه تأثیر بدست آمده در این تحقیق با نتایج ایشان مطابقت دارد همچنین نتایج جدول ۱ بیانگر آن است که به استثنای ماه‌های ژوئن و ژوئیه, مدل تئوری نیم تغییرنمای بهینه در سایر ماه‌ها و در مقیاس سالانه از نوع کروی می باشد, که یک نمونه از آن در شکل(۲) برای داده‌های بارندگی ماه فوریه نشان داده شده است.

جدول-۱: پارامترهای نیم تغییرنماهای بهینه برای داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه در استان خوزستان

ماه	مدل	اثر قطعه‌ای (C0)	دامنه تأثیر (km)	آستانه (C+C0)	C/(C+C0)	ضریب همبستگی
ژانویه	کروی	۰/۰۰۰۱	۲۵۰/۳	۰/۲۷	۱	۰/۹۵
فوریه	کروی	۰/۰۰۱	۲۳۵/۱	۰/۳۸	۰/۹۹	۰/۹۵
مارس	کروی	۰/۰۰۱	۲۶۲/۳	۰/۳۷	۰/۹۹	۰/۹۴
آوریل	کروی	۰/۰۲۶	۲۸۵/۹	۰/۶۲	۰/۹۵	۰/۸۷
می	کروی	۰/۲۴۲	۳۱۰/۷	۱/۳۲	۰/۸۱	۰/۹۳
ژوئن	نمایی	۰/۰۷۳	۹۵/۵	۰/۲۵	۰/۷۰	۰/۶۷
ژوئیه	نمایی	۰/۱۶۶	۸۱/۱	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۱
آگوست	کروی	۰/۰۶۷	۹۵/۹	۰/۲۳	۰/۷۱	۰/۹۰
سپتامبر	کروی	۰/۲۴۴	۱۰۰/۱	۰/۴۶	۰/۵۱	۰/۷۰
اکتبر	کروی	۰/۰۸۵	۱۳۰/۴	۰/۴۱	۰/۷۹	۰/۹۵
نوامبر	کروی	۰/۰۰۰۱	۱۵۰/۲	۰/۲۵	۱	۰/۹۶
دسامبر	کروی	۰/۰۰۰۱	۱۹۰/۵	۰/۲۸	۱	۰/۹۴
سالانه	کروی	۰/۰۰۰۱	۱۷۵/۶	۰/۳۰	۱	۰/۹۵



شکل-۲: نیم تغییرنمای تجربی و تئوری کروی مربوط به داده‌های بارندگی ماه فوریه

ارزیابی روش‌های درون‌یابی مورد بررسی

اعمال تکنیک اعتبارسنجی حذفی بر تکنیک‌های درون‌یابی موردبررسی و محاسبه شاخص‌های خطا نشان داد: در روش وزنی عکس فاصله، توان‌های ۱ تا ۵ عکس فاصله مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد توان ۳ در بیشتر ماه‌ها کمترین خطا را دارد که به عنوان توان بهینه در این روش انتخاب گردید. همچنین بررسی نقاط همسایگی مختلف نشان داد که تغییر نقاط همسایگی، تقریباً تأثیری بر روی دقت این روش ندارد. در مورد روش کوکریجینگ بررسی نیم تغییرنماهای متقاطع[1] بارندگی-ارتفاع در موارد مختلف ارتباط مکانی قوی‌ای

[1] . *Cross Variogram*

نشان نداد که این باعث شد ارزیابی این روش به طور کلی از محاسبات حذف گردد. در روش کریجینگ با روند خارجی از ۶۰۰۰ نقطه ارتفاعی مستخرج از نقشه توپوگرافی به عنوان متغیر کمکی استفاده شد. در روش رگرسیون کریجینگ نقشه تغییرات باقیمانده‌ها توسط روش کریجینگ ترسیم شد که مدل نیم‌تغییرنمای باقیمانده‌ها در اکثر موارد مدل کروی بود. البته در این تحقیق نیز طبق معمول، نیم تغییرنماهای باقیمانده‌ها در ماه‌های مختلف مخصوصاً در ماههای گرم ارتباط مکانی قوی‌ای از خود نشان ندادند. نتایج روش گرادیان خطی سه بعدی نشان داد که در تمامی ماه‌ها گرادیان‌های نصف النهاری و مداری و ارتفاعی مثبت است. به عبارتی تغییرات بارندگی از غرب به شرق و از جنوب به شمال منطقه و با افزایش ارتفاع افزایشی است. در مورد روش اسپلاین در هیچ یک از موارد نتایج رضایت بخشی بدست نیامد که می توان دلیل آن را مربوط به توپوگرافی پیچیده و اثر آن بر توزیع منطقه ای بارش دانست به طوریکه صفحات نازک انعطاف پذیر برازش درستی بر داده‌ها ندارند.

نتایج تحلیل رگرسیونی(جدول ۲) نشان داد که دو روش رگرسیون کریجینگ و کریجینگ با روند خارجی نسبت به سایر روش‌ها بهتر بوده و برآوردهای حاصل از این روش‌ها همخوانی بیشتری با داده‌های واقعی دارند اما نتایج روش رگرسیون کریجینگ در بیش از ۸۵ درصد موارد بیشترین همخوانی را با داده‌های واقعی داشت. البته تحلیل رگرسیونی نتایج حاصل از روش کریجینگ عمومی نیز همبستگی خوبی با داده‌های واقعی دارد اما مقادیر بزرگ بارندگی را کم برآورد می‌کند. بررسی ریشه میانگین مربعات خطا(جدول ۳) نشان می‌دهد که در بیش از ۶۰ درصد موارد روش رگرسیون کریجینگ کمترین میزان خطا را دربر دارد. بررسی میانگین خطای اریب روش‌ها نشان داد که روش گرادیان خطی سه بعدی در برآورد بارش ماهانه و سالانه دارای کمترین خطای اریب بوده که دلیل آن برآورد پارامترهای این معادله با تکنیک حداقل مربعات خطا است. اما میانگین مربعات خطای این روش زیاد بوده و همچنین نتایج تحلیل رگرسیونی آن نیز رضایت بخش نبود.

جدول-۲: نتایج تحلیل رگرسیونی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های ماهانه و سالانه در منطقه مطالعاتی

ماه	کریجینگ			رگرسیون-کریجینگ			کریجینگ با روند خارجی			وزنی عکس فاصله			گرادیان خطی سه بعدی			اسپلاین		
	r^2	a^3	b^4	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b
ژانویه	۰/۸۵	۱۷/۸	۰/۷۹	**۰/۸۷**[1]	**۶/۱۶**[1]	**۰/۹۵**[1]	۰/۸۱	۱۴	۰/۸۵	۰/۸۷	۲۷/۶	۰/۶۵	۰/۷۹	۲۸/۲	۰/۶۶	۰/۷۶	۳۲/۲	۰/۵۹
فوریه	۰/۹۱	۸/۶	۰/۸۶	**۰/۹۳**	**۳/۰۲**	**۰/۹۶**	۰/۸۲	۳/۵۴	۰/۹۸	۰/۹۲	۱۱/۳	۰/۷۹	۰/۸۲	۱۷/۸	۰/۷۱	۰/۷۹	۲۳/۸	۰/۶۵
مارس	۰/۸۹	۸/۰۶	۰/۸۷	۰/۹۲	۵/۳۸	۰/۹۰	**۰/۸۶**	**۲/۹۴**	**۰/۹۷**	۰/۹۰	۱۱/۳	۰/۸۰	۰/۸۲	۱۷/۸	۰/۷۱	۰/۸۴	۱۴/۸	۰/۷۲
آوریل	۰/۹۳	۴/۷	۰/۸۶	**۰/۹۴**	**۲/۰۲**	**۰/۹۲**	۰/۸۶	۰/۲۴	۱/۰۳	۰/۹۲	۷/۲	۰/۷۶	۰/۸۱	۱۰/۷	۰/۶۹	۰/۷۴	۱۸/۷	۰/۶۹
می	۰/۸۶	۳/۰۵	۰/۴۹	**۰/۸۷**	**۱/۶۴**	**۰/۸۴**	۰/۷۹	۱/۹	۰/۷	۰/۸۵	۲/۲۶	۰/۷۰	۰/۶۲	۵/۰۸	۰/۴۵	۰/۵۰	۵/۱۵	۰/۴۲
ژوئن	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۰۶	**۰/۳۷**	**۰/۱۲**	**۰/۱۴**	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۲	۰/۱۳	۰/۳۰	۰/۲۲	۰/۱۱
ژوئیه	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱	**۰/۲۴**	**۰/۱۲**	**۰/۱۴**	۰	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۲	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۰
آگوست	۰/۳۷	۰/۱۵	۰/۲	**۰/۵۴**	**۰/۱۸**	**۰/۳۱**	۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۱۰	۰/۲	۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۲۱
سپتامبر	۰	۰/۶۳	۰	**۰/۵۳**	**۰/۶۴**	**۰/۳۳**	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۳۱	۰/۴۶	۰/۶۳	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۸۴	۰/۲۲
اکتبر	۰/۷۱	۶/۹۴	۰/۳۲	**۰/۷۷**	**۳/۴۷**	**۰/۸۲**	۰/۷۵	۴/۹۸	۰/۵۳	۰/۷۹	۴/۳	۰/۶۷	۰/۶۲	۷/۶۴	۰/۴۲	۰/۵۶	۹/۶۹	۰/۳۸
نوامبر	۰/۹۱	۹/۵۵	۰/۸۲	**۰/۹۰**	**۴/۸۹**	**۰/۹۰**	۰/۸۴	۵/۷۸	۰/۹۱	۰/۸۹	۱۳	۰/۷۵	۰/۷۸	۱۹/۵	۰/۶۴	۰/۷۴	۱۴/۳	۰/۶۴
دسامبر	۰/۸۷	۲۶/۲	۰/۶۶	**۰/۸۵**	**۹/۴۳**	**۰/۹۲**	۰/۸۲	۱۳/۹	۰/۸۴	۰/۸۵	۳۳/۴	۰/۵۹	۰/۷۷	۳۴/۲	۰/۶۳	۰/۷۲	۲۸/۲	۰/۵۹
سالانه	۰/۹۲	۹۱/۴	۰/۷۲	**۰/۹۲**	**۱۴/۵**	**۰/۹۹**	۰/۸۹	۳۰/۲	۰/۹۱	۰/۹۱	۱۳۵	۰/۶۲	۰/۸۱	۱۲۷	۰/۶۹	۰/۶۹	۱۳۳	۰/۶۲

۱: روش درون‌یابی منتخب در ماه مورد نظر **۲**: ضریب همبستگی **۳**: عرض از مبدأ خط رگرسیون **۴**: شیب خط رگرسیون

جدول-۳: مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای روش‌های مورد استفاده برای داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه

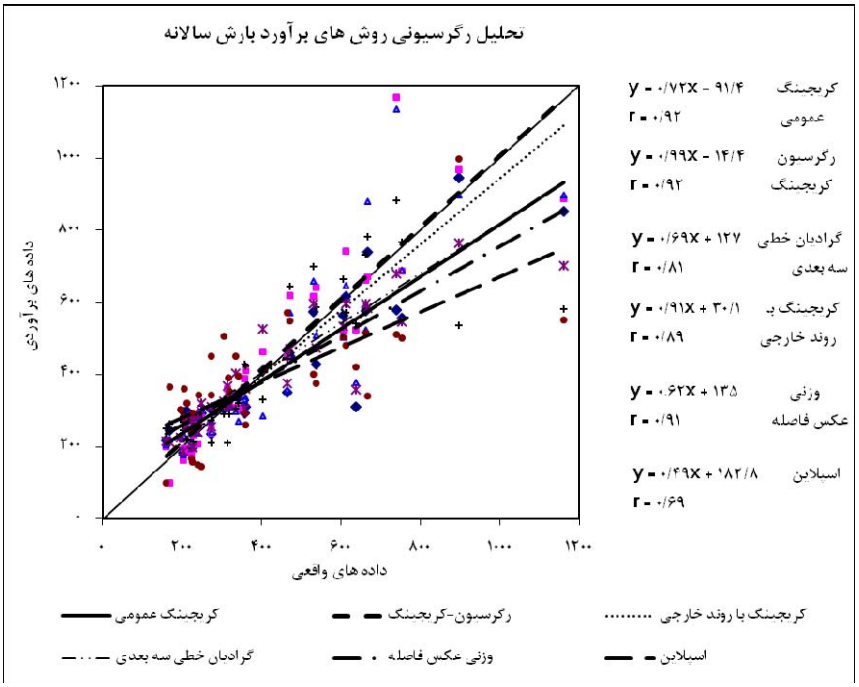
ماه	ریشه میانگین مربعات خطا(میلیمتر)					
	کریجینگ	رگرسیون کریجینگ	کریجینگ با روند خارجی	وزنی عکس فاصله	گرادیان خطی سه بعدی	اسپلاین
ژانویه	۲۱/۱۶	۲۱/۹	۲۵/۱۸	***۲۰/۳۶**	۲۵/۰۴	۳۲/۱۹
فوریه	۱۶/۱۷	**۱۵/۲۶**	۲۶/۰۵	۱۶/۴۵	۲۲/۱۵	۲۷/۴۸
مارس	۱۵/۴۶	**۱۴/۰۵**	۱۹/۸۸	۱۵/۱۶	۱۹/۴۲	۲۴/۸۷
آوریل	۹/۰۲	**۸/۱۹**	۱۴/۶۶	۹/۹۲	۱۴/۰۲	۱۶/۴۲
می	۶/۷۹	**۵/۷**	۶/۹۲	۶/۳۲	۸/۷۶	۹/۵۲
ژوئن	۰/۴۲	**۰/۴۰**	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۴۸
ژوئیه	۰/۳۱	**۰/۲۵**	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۴۴
آگوست	۰/۵۱	**۰/۴۴**	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۶۴
سپتامبر	۱/۲۸	**۱/۰۰**	۱/۰۳	۱/۰۸	۱/۱۵	۱/۳
اکتبر	۶/۹۹	۶/۱۴	۵/۹۸	**۵/۳۹**	۷/۰۱	۸/۱۷
نوامبر	**۱۲/۶۲**	۱۳/۳۲	۱۷/۹۶	۱۳/۵۴	۱۸/۴۸	۲۶/۳۱
دسامبر	**۲۳/۹۱**	۲۶/۳۷	۲۷/۴۱	۲۵/۲۴	۲۹/۳۸	۴۴/۶۶
سالانه	**۹۸/۱۷**	۱۰۰/۴۲	۱۱۰/۱۷	۱۰۹/۳۹	۱۳۳/۰۴	۱۷۶/۰۹

*: مقدار خطای روش درون یابی منتخب در ماه مورد نظر

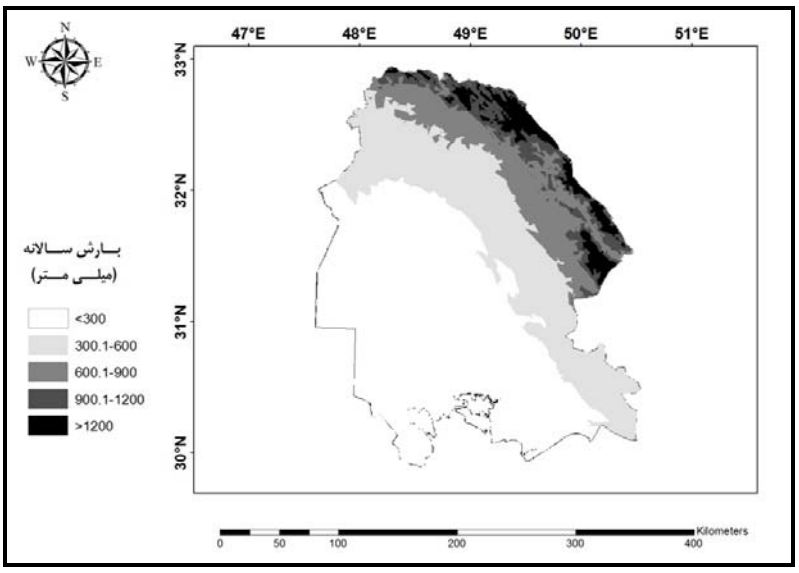
با توجه به نتایج بدست آمده، برای مکانی کردن داده‌های بارندگی ماهانه در این منطقه روش رگرسیون کریجینگ معرفی می‌گردد اما با توجه به مقادیر مثبت میانگین خطای اریب این روش، باید توجه داشت که این روش در پیش‌بینی داده‌ها کمی دارای رفتار بیش‌برآوردی است. در مورد انتخاب بهترین روش درون‌یابی داده‌های بارندگی سالانه نتایج تحلیل رگرسیونی آن(شکل ۳) معادله خط بدست آمده از روش رگرسیون کریجینگ را نسبت به سایر روش‌ها به خط ۱:۱ نزدیک‌تر نشان می‌دهد اما نتایج جدول(۳) نشان می‌دهد که روش کریجینگ عمومی دارای کمترین خطای برآورد در بین سایر روش‌هاست. با توجه به اینکه مقدار متوسط خطای این روش تفاوت اندکی با روش کریجینگ عمومی دارد(جدول ۳) و از طرفی در ارتفاعات این منطقه بارندگی‌های زیادی ریزش می‌کند و همچنین متأسفانه ایستگاه‌های هواشناسی مرتفع کمی وجود دارد، استفاده از روش کریجینگ عمومی باعث می‌شود که مقدار بارش ارتفاعات کم برآورد گشته و در نتیجه بارش منطقه به درستی برآورد نگردد زیرا در این روش بارندگی قسمت‌های مرتفع تنها از روی ایستگاه‌های کم ارتفاع منطقه برآورد می‌شوند. اما در روش رگرسیون کریجینگ از متغیر کمکی ارتفاع استفاده می‌کند که در آن اثر ارتفاعات بر روی بارندگی لحاظ می‌شود که در نتیجه بارش ارتفاعات دقیق‌تر برآورد می‌شود. بنابراین روش رگرسیون کریجینگ به عنوان مناسب‌ترین روش برآورد بارش سالانه در استان خوزستان پیشنهاد می‌گردد اما با توجه به مثبت بودن میانگین خطای اریب(۳ درصد) باید توجه به رفتار بیش‌برآوردی این روش داشته باشیم. در شکل(۴) نقشه توزیع مکانی بارش سالانه این استان با روش رگرسیون کریجینگ ارائه شده است همچنین به منظور مقایسه روش کریجینگ عمومی به عنوان رقیب اصلی روش رگرسیون کریجینگ در مورد داده‌های بارش سالانه، نقشه تغییرات بارش سالانه با این روش در شکل (۵) نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ به وضوح تفاوت بین روش منتخب رگرسیون کریجینگ را با روش کریجینگ عمومی

نشان می‌دهد. یکی از تفاوت‌های واضح این دو نقشه در عدم وجود طبقه بارش بیش از ۱۲۰۰ میلیمتر در نقشه ترسیم شده بر اساس روش کریجینگ عمومی است.

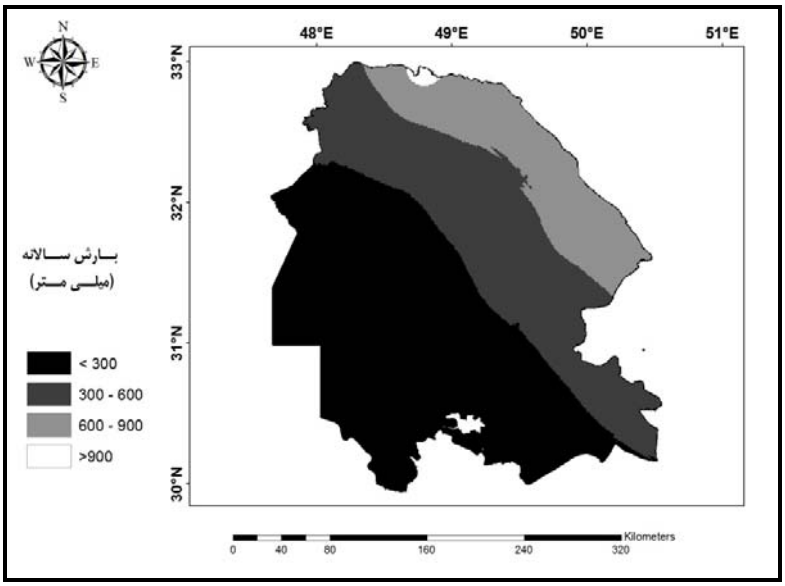
به منظور ارائه میانگین دقیق‌تر از بارندگی سالانه این منطقه، نقشه همبارش جدید(شکل ۴) به ۱۰ پهنه تقسیم و مساحت آن‌ها محاسبه شد. با توجه به رفتار بیش برآوردی این روش به اندازه ۳٪، میانگین پهنه‌های بارش در ۰/۹۷ ضرب شد سپس به روش میانگین‌گیری وزنی، میانگین بارندگی درازمدت سالانه استان خوزستان ۳۹۱ میلیمتر بدست آمد که در مقایسه با میانگین ارائه شده توسط سازمان هواشناسی کشور(۲۰۰۵، ۲۳۶) که ۳۵۰ میلیمتر گزارش کرده بود، به اندازه ۴۱ میلیمتر تفاوت دارد.



شکل-۳: تحلیل رگرسیونی روش‌های مختلف مکانی کردن داده‌های بارش سالانه



شکل-۴: توزیع مکانی بارش سالانه در استان خوزستان براساس روش رگرسیون کریجینگ



شکل-۵: توزیع مکانی بارش سالانه در استان خوزستان براساس روش کریجینگ عمومی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تعیین بهترین روش درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه در استان خوزستان هفت روش درون‌یابی شامل کریجینگ عمومی، کوکریجینگ، کریجینگ با روند خارجی، رگرسیون کریجینگ، وزنی عکس فاصله، اسپلاین و گرادیان خطی سه بعدی با یکدیگر مقایسه شدند. بررسی نتایج تحلیل رگرسیونی و میانگین مربعات خطا نشان داد که در مورد بارش‌های دراز ماهانه روش رگرسیون کریجینگ بهترین روش درون‌یابی می باشد اما در مورد داده‌های بارش دراز مدت سالانه نتایج تحلیل رگرسیونی و میانگین مربعات خطا به ترتیب روش‌های رگرسیون کریجینگ و کریجینگ عمومی را به عنوان بهترین روش درون‌یابی معرفی کردند اما با توجه به مسأله کم‌برآوردی بارش ارتفاعات در روش کریجینگ عمومی و اهمیت بارش ارتفاعات در این منطقه و از طرفی اختلاف ناچیز میانگین مربعات خطای این دو روش در مجموع روش رگرسیون کریجینگ به عنوان بهترین روش درون‌یابی داده‌های بارش سالانه انتخاب شد. انتخاب روش رگرسیون کریجینگ به عنوان بهترین روش درون‌یابی داده‌های بارش در استان خوزستان نشان می دهد که استفاده از متغیر کمکی ارتفاع باعث افزایش دقت برآوردهای مکانی داده‌های بارش در این منطقه می‌شود. با توجه به اینکه ایستگاه‌های هواشناسی استان خوزستان در ناحیه کم ارتفاعی قرار دارند و از طرفی ارتفاعات این استان بارش‌های زیادی دریافت می‌کنند، استفاده از روش رگرسیون کریجینگ تخمین دقیق‌تری از بارش ارتفاعات این استان را در اختیار قرار می‌دهد به همین دلیل میانگین بارش سالانه منطقه‌ای استان خوزستان با میانگین‌گیری وزنی از نقشه بارش سالانه به روش رگرسیون کریجینگ محاسبه شد که به اندازه ۴۱ میلیمتر بیشتر از مقدار ارئه شده توسط سازمان هواشناسی کشور است که این اختلاف به دلیل درنظر گرفتن بارش ارتفاعات منطقه در این تحقیق می‌باشد.

سپاسگزاری

از دفتر تحقیقات و استانداردهای مهندسی آب، سازمان آب و برق خوزستان به عنوان حمایت کننده پژوهش تشکر می‌نماییم.

منابع

اختری،روح انگیز. مهدیان، محمدحسین. مرید، سعید. ، ۱۳۸۵، تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی SPI و EDI در استان تهران. تحقیقات منابع آب ایران. ۲(۳) ۲۷-۳۸

ثقفیان، بهرام و سیما رحیمی‌بندرآبادی، ۱۳۸۴، **مقایسه روشهای درونیابی و برونیابی برای برآورد توزیع مکانی مقدار بارندگی سالانه**، دو فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، سال اول، شماره ۲، صص۸۴-۷۴.

حسنی پاک، علی‌اصغر، ۱۳۷۷، **زمین آمار (ژئواستاتیستیک)**، انتشارات دانشگاه تهران.

رحیمی بندرآبادی، سیما و محمدحسین مهدیان، ۱۳۸۴، بررسی روش‌های توزیع مکانی بارندگی روزانه و ماهانه در حوضه دریای خزر، فصلنامه پژوهش و سازندگی، شماره ۳(پیاپی۶۹)، صص ۷۲-۶۳.

مهدوی، محمد و ابراهیم حسینی چگینی و محمدحسین مهدیان و سیما رحیمی‌بندرآبادی، ۱۳۸۳، مقایسه روش های زمین آمار در برآورد توزیع مکانی بارش سالانه در مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرقی ایران، فصلنامه منابع طبیعی ایران، جلد پنجاه و هفتم، شماره ۲، صص۱۷-۱.

میرموسوی، سید حسن و احمد مزیدی و یونس خسروی، ۱۳۸۹، **تعیین بهترین روش زمین آمار جهت تخمین توزیع بارندگی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: استان اصفهان)**، فصلنامه فضای جغرافیایی، سال دهم، شماره ۳۰، صص ۱۲۰-۱۰۵.

مهدیزاده مهیار، ۱۳۸۱، **ارزیابی روش های زمین آماری برای برآورد دما و بارندگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه**، گروه آبیاری و آبادانی، کرج، دانشگاه تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۵۲.

نادی، مهدی، ۱۳۸۹، **استفاده از تکنیک های مختلف پهنه بندی داده‌های اقلیمی برای تعیین مهمترین فاکتورهای مؤثر بر رویش درختان ناحیه مرتفع چهارباغ گرگان**، گروه آبیاری و آبادانی، کرج، دانشگاه تهران،پایان نامه کارشناسی ارشد.

Akhtari, R., Mahdian, M.H., Morid, S., 2007, **Assessment of spatial analysis of SPI and EDI drought indices in Tehran province**, Iran-water resources research. Vol. 2, No. 3, PP. 27-38.

Boer, E P J., Beurs K M d., Dewi Hartkamp A., 2001, **Kriging and thin plate splines for mapping climate variables**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 3, No. 2, PP. 146-154.

Coulibaly, M., Becker, S., 2007, **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.

Francisco, J.M., 2010, **Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: application to precipitation**, International Journal of Climatology, No. 30, PP. 620-631.

Goovaerts, P., 2000, **Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall**, Journal of Hydrology, Vol. 228, PP. 113–129

Hassani Pak, A.A., 2007, **Geostatistics**, 2th Ed., University of Tehran Press.

Hutchinson, M.F., Gessler P.E., 1994, **Splines - more than just a smooth interpolator**, Geoderma, No. 62, PP. 45-67.

Iranian Meteorological Organaization, 2005, **Meteorological Year Book. 790p.**

Jeffrey, S.J., Carter, J.O., Moodie, K.M., Beswick, A.R., 2001, **Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data,** Environmental Modeling and Software, Vol. 16, No. 4, PP. 309-330.

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

Mahdavi, M., Hosseini chegini, M., Mahdian, M.H., Rahimi, S., 2004, **Application of geostatistical method for estimation of annual spatial rainfall in arid and semiarid regions of south east of Iran**, Iranian Journal Of Natural Resource, Vol. 57, No. 2, PP. 1-17.

Mahdizadeh, M. ,2002, **Assessment of geostatistical Methods for estimation of temperature and precipitation in oroumieh catchment**, M. Sc. thesis, faculty of agriculture, University of Tehran, Iran

MirMousavi,S H., Mazidi,A., Khosravi,Y.,2010, **The Determination of Optimum Geo-statistics Method for Estimating Precipitation Distribution Using GIS (Case Study of Esfahan Province),** Geographic Space, Vol. 10, No. 30, PP. 105-120.

Nadi, M., 2010, **Application of various interpolation techniques of climatic data for determining the most important factors affecting the trees growth at the elevated areas of Chaharbagh Gorgan,** M. Sc. thesis, faculty of agriculture, University of Tehran, Iran

Odeh, I. O. A., McBratney, A.B., Chittleborough, D. J. 1995. **Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging**. *Geoderma.* Vol. **67, No.**3, PP. 215–226.

Rahimi, S., Mahdian, M.H., 2005, **Comparison of estimation methods for spatial distribution of daily and monthly rainfall in Caspian Sea watershed**, Pajouhesh & Sazandegi, No. 69, PP. 63-72.

Saghafian, B., Rahimi, S., 2005, **Comparison of Interpolation and Extrapolation Methods for Estimating Spatial Distribution of Annual Rainfall**, Iran-Water Resources Research, Vol. 1, No. 2, PP. 74-84.

Wilks, D.S., 2006, **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**, Second Edition, Academic Press is an imprint of Elsevier, Cornell University, USA

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