

مقایسه روش‌های زمین آمار به منظور تعیین بهترین روش درون‌یابی داده‌های زیست‌اقليمی در مدل‌سازی پراکنش گونه‌های جانوری در مرکز ایران

رسول خسروی^۱، محمود رضا همای^{۱*}، منصوره ملکيان^۱

(تاریخ دریافت: 1392/12/22؛ تاریخ پذیرش: 1393/06/10)

چکیده

شاخص‌های زیست‌اقليمی که شامل روندهای سالانه، رژیم و حدود آستانه یا فاکتورهای محدود کننده محیط‌زیستی می‌باشند، از مهم‌ترین متغیرهای مستقل در مدل‌های پراکنش توزیع گونه‌ها به‌شمار می‌روند. از آنجا که در اکوسیستم‌های خشک مرکز کشور، آب و دما، عوامل کنترل کننده فعالیت‌های زیستی است، بنابراین نقشه‌سازی عوامل اقلیمی در مدل‌های پراکنش گونه‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مطالعه ابتدا نحوه استخراج ۲۰ متغیر مهم زیست‌اقليمی از داده‌های اقلیمی بیان شده و سپس روش وزنی معکوس فاصله، سه روش کریجینگ (کریجینگ معمولی، کریجینگ با روند خارجی، کوکریجینگ) و پنج روش توابع شعاع محور با یکدیگر مقایسه شدند. داده‌های نرمال اقلیمی (۲۰۱۰-۱۹۵۰) در ۲۶ ایستگاه سیوپتیک در مرکز کشور برای استخراج داده‌های زیست‌اقليمی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی هم‌بستگی مکانی، ناهمسان‌گردی و روند داده‌ها با استفاده از سه مدل نیم تغییرنمای کروی، نمایی و گوسی انجام شد و بهترین مدل با استفاده از روش ارزیابی متقاطع انتخاب شد. انتخاب مدل بهینه برای درون‌یابی متغیرهای زیست‌اقليمی بر اساس محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب انجام گرفت. نتایج تحلیل نیم تغییرنما، مدل نمایی را بهترین مدل ریاضی برازش نیم تغییرنمای تجربی معرفی کرد. هم‌چنین مقایسه روش‌های مختلف نشان داد که بهترین روش برای درون‌یابی متغیر متوسط دمای سالانه روش کوکریجینگ و برای بارندگی سالانه IDW است. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از متغیر ارتفاع به‌عنوان متغیر کمکی نقش مهمی در بهینه کردن روش‌های درون‌یابی داده‌های اقلیمی و زیست‌اقليمی دارد.

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی، کوکریجینگ، متغیرهای زیست‌اقليمی، مدل‌سازی پراکنش، مرکز ایران، نیم تغییرنما

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mrhemami@cc.iut.ac.ir

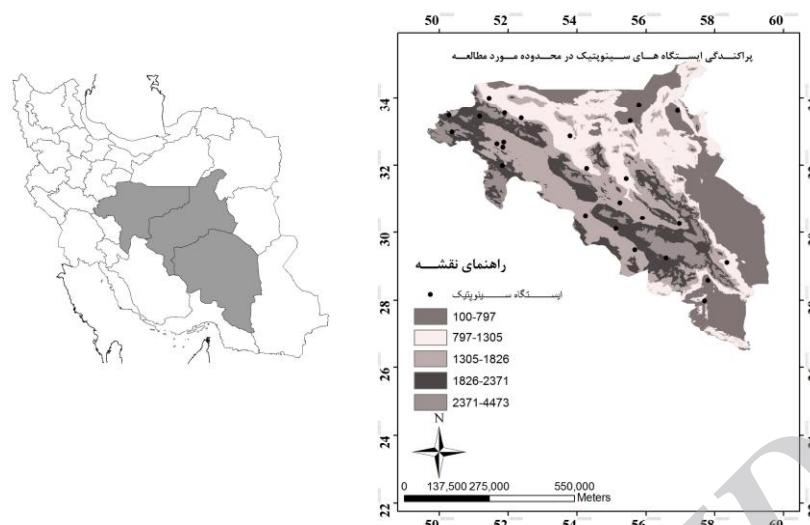
مقدمه

مدل‌های پیش‌بینی کننده توزیع گونه‌ها (SDMs) با تعیین فاکتورهای موثر بر حضور و مطلوبیت زیستگاه گونه، ابزار مهمی در تصمیم‌گیری‌های حفاظتی تنوع زیستی به شمار می‌روند. این مدل‌ها ارتباط اکولوژی، زیست جغرافیا و حفاظت گونه‌ها را فراهم می‌کنند (4 و 15). تا کنون مدل‌های متنوعی برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها معرفی شده است که تفاوت آنها را می‌توان در الگوریتم‌های آماری استفاده شده، نوع داده‌های وارد شده به مدل و فرضیات به کار گرفته شده در هر مدل بیان کرد. روش مدل‌سازی زیست-اقلیمی (8)، DOMAIN (9)، BRT (10) آشیان بوم‌شناختی (14) بیشینه آنتروپی (19) مهم‌ترین روش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها بشمار می‌روند. متغیرهای زیست اقلیمی یکی از مهمترین متغیرهای محیطی بوده که در اکثر مطالعات مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها استفاده می‌شوند (13، 15 و 24). تغییرات اقلیمی با ایجاد محدودیت‌های فیزیولوژیکی نقش مهمی در پراکنش گونه‌های گیاهی و جانوری دارد (5). ارتباط بین اقلیم و توزیع گونه‌ها در یک سیمای سرزمین به سازگاری‌های محلی گونه‌ها، موانع انتشار و میزان دسترسی گونه به زیستگاه، بستگی دارد. متغیرهای زیست اقلیمی از مقادیر دما و بارش ماهیانه استخراج می‌شوند و معنی داری زیستی بیشتری، نسبت به متغیرهای اقلیمی دارند. این متغیرها شامل روندهای سالانه، رژیم و حدود آستانه یا فاکتورهای محدودکننده محیط‌زیستی می‌باشند (6). در بیشتر مطالعاتی که تا کنون در رابطه با مدل‌سازی زیستگاه گونه‌ها استفاده شده است از 19 متغیر زیست اقلیمی وبگاه اقلیم جهانی (Worldclim) استفاده شده است (13، 15 و 24).

بخش زیادی از مساحت کشور را سه استان یزد، اصفهان و کرمان به خود اختصاص داده‌اند که جزء مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شوند و زیستگاه‌های بیابانی بخش وسیعی از این مناطق را پوشانده است. با وجود محدودیت‌های محیطی زیاد، تنوع گونه‌های گیاهی و جانوری این بخش از کشور بالا بوده و گونه‌های کلیدی بسیاری از جمله یوزپلنگ آسیای

(*Gazella subgutturosa*)، آهویایرانی (*Acinonyx jubatus*)، جیبر (*Gazell bennetti*)، هوبره (*Chlamydotis undulata*)، کاراکال (*Caracal caracal*) و گور ایرانی (*Equus onager*) در این بخش از کشور زیست می‌کنند. متأسفانه در سال‌های اخیر به دلیل افزایش دخالت‌های انسانی، جمعیت بسیاری از این گونه‌ها به شدت کاهش یافته است. این موضوع اهمیت مطالعات علمی در خصوص عوامل موثر بر توزیع گونه‌های این بخش از کشور را دوچندان می‌کند. عوامل اقلیمی به خصوص دما و بارندگی عامل محدود کننده پراکنش گونه‌های جانوری و گیاهی زیست‌بوم‌های این مناطق معرفی می‌شوند. لذا استفاده از فاکتورهای اقلیمی در مدل‌سازی پراکنش گونه‌های جانوری در زیست‌بوم‌های بیابانی مرکز کشور از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. از آنجا که در کشور ما تا کنون در رابطه با نحوه استخراج و درون‌یابی داده‌های زیست اقلیمی به‌منظور کاربرد این متغیرها در مدل‌های پیش‌بینی کننده توزیع گونه‌ها، مطالعات چندانی صورت نگرفته است، به همین منظور این مطالعه با هدف تعیین بهترین روش درون‌یابی داده‌های زیست اقلیمی در مرکز کشور به‌منظور کاربرد این داده‌ها در مدل‌سازی پراکنش گونه‌های این مناطق اجرا شد. برای ساخت لایه‌های زیست اقلیمی از داده‌های هواشناسی 26 ایستگاه سینوپتیک مرکز کشور (اصفهان، یزد و کرمان) در طی سال‌های 1950 تا 2010 استفاده شد.

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان روش‌های درون‌یابی را به 3 دسته روش‌های تصادفی، قطعی و دیگر روش‌ها تقسیم بندی کرد (22). انتخاب روش مناسب جهت تهیه نقشه‌های پیوسته از متغیرهای زیست اقلیمی از مسائل اساسی در تهیه این نقشه‌ها به‌شمار می‌رود که بستگی به ماهیت داده‌ها، مقیاس مکانی و زمانی داده‌ها و تعداد نقاط معلوم دارد. ارزیابی روش‌های درون‌یابی از سه طریق تکه تکه کردن داده‌ها (Data splitting)، ارزیابی متقابل (Cross validation) و محاسبه واریانس کریجینگ (Kriging variance) امکان‌پذیر است. نادى و همکاران (3) در مطالعه‌ای در استان خوزستان به مقایسه روش‌های درون‌یابی



شکل ۱. پراکنندگی ایستگاه‌های سینوپتیک بر روی نقشه رقومی ارتفاع در محدوده مورد مطالعه

470 تا 2290 متغیر است که نشان می‌دهد در برخی از مناطق مورد مطالعه ایستگاه هواشناسی وجود ندارد. به منظور استخراج داده‌های زیست اقلیمی، ابتدا داده‌های ماهانه دما و بارش به صورت داده‌های نرمال اقلیمی تعریف شد. سپس 20 متغیر زیست اقلیمی از داده‌های ماهانه دما و بارش استخراج شد (17)، جدول 1). در شاخص‌های زیست اقلیمی فصلی، فصل به صورت بازه‌های زمانی سه ماهه تعریف شد. لذا این شاخص‌ها برای تمامی ترکیب‌های متوالی سه ماهه محاسبه و بعد از آن بسته به نوع شاخص مورد نظر حداقل یا حداکثر شاخص انتخاب شد. جهت تعیین شاخص‌های فصلی برای ماه‌های آخر سال (بهمن و اسفند)، تعریف دوره سه ماهه با استفاده از ماه‌های اول سال انجام گرفت. برای محاسبه متوسط سالانه دامنه روزانه دما (Bio2) از نوسانات دمایی ثبت شده در یک ماه استفاده شد. در این رویکرد استفاده از متوسط‌های ماهانه از نظر ریاضی برابر با محاسبه دامنه دما برای هر روز از ماه است (17). متغیر زیست اقلیمی رژیم دما (Bio10 و Bio11)، به دو صورت ضریب تغییرات و انحراف معیار تعریف شد. در محاسبه رژیم بارش بر اساس ضریب تغییرات، به منظور جلوگیری از اعداد منفی و یا صفر در مخرج معادله، داده‌های دمایی به صورت درجه کلونین وارد معادله شد.

داده‌های اقلیمی پرداختند و بهترین روش را روش رگرسیون کریجینگ معرفی کردند. فاطمی و یزدان‌پناه (2) به ارزیابی روش‌های مختلف میان‌یابی به منظور برآورد داده‌های بارش اصفهان پرداختند و روش رگرسیون بارش، ارتفاع، طول جغرافیایی را بهترین روش معرفی کردند. اسمیت و همکاران (23) روش IDW را برای مناطقی که تعداد داده‌های معلوم زیاد نباشد را روش مناسبی برای درون‌یابی معرفی کردند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، داده‌های اقلیمی و استخراج متغیرهای

زیست اقلیمی

منطقه مورد مطالعه شامل سه استان مرکزی کشور (یزد، کرمان، اصفهان) می‌باشد. محدوده ارتفاعی بین 100 تا 4473 متر متغیر است. به دلیل دقت و کیفیت آمار هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، در این پژوهش از داده‌های ماهانه دما و بارش 26 ایستگاه سینوپتیک در محدوده مورد مطالعه در طی سال‌های 1950 تا 2010 استفاده شد. در شکل 1 محدوده مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک بر روی نقشه توپوگرافی منطقه نشان داده شده است. تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌های مورد نظر بین

جدول ۱. نحوه محاسبه ۲۰ متغیر زیست اقلیمی از داده‌های ماهانه دما و بارش

نام	متغیر	نحوه محاسبه	نام	متغیر	نحوه محاسبه
Bio۱	دمای متوسط سالانه	$\frac{\sum_{i=1}^{12} Tavg_i}{12}$	Bio۷	بارش سالانه	$\sum_{i=1}^{12} PPT_i$
Bio۲	متوسط سالانه دامنه روزانه	$\frac{\sum_{i=1}^{12} (Tmax_i - Tmin_i)}{12}$	Bio۸	بارش مرطوب‌ترین	Max ({PPT ₁ , ..., PPT ₁₂ })
Bio۳	ایزوترمالی (همدمایی)	$\frac{Bio 2}{Bio 4} * 100$	Bio۹	بارش خشک‌ترین	Min ({PPT ₁ , ..., PPT ₁₂ })
Bio۴	دامنه سالانه دما	Bio ۵- Bio ۶	Bio۱۰	رژیم دما (انحراف)	SD {Tavg1, ..., Tavg12}
Bio۵	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	Max ({Tmax ₁ , ..., Tmax ₁₂ })	Bio۱۱	رژیم دما (ضریب)	$\frac{SD \{Tavg1, \dots, Tavg12\}}{Bio 1 + 273.15} * 100$
Bio۶	حداقل دمای سردترین ماه	Min ({Tmin ₁ , ..., Tmin ₁₂ })	Bio۱۲	رژیم بارش	$\frac{SD \{PPT1, \dots, PPT12\}}{1 + Bio (\frac{12}{12})} * 100$

متغیر	محاسبه	متغیر	محاسبه	متغیر	محاسبه
(Bio 13) بارش سردترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \text{mean} \sum_{i=1}^3 Tavg_i \\ \text{mean} \sum_{i=2}^4 Tavg_i \\ \dots \\ \text{mean} \sum_{i=10}^{12} Tavg_i \end{array} \right)_{\text{Min}}$	(Bio 14) بارش خشک‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 PPT_i \\ \sum_{i=2}^4 PPT_i \\ \dots \\ \sum_{i=10}^{12} PPT_i \end{array} \right)_{\text{Min}}$	(Bio 15) میانگین دمای گرم‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \text{mean} \sum_{i=1}^3 Tavg_i \\ \text{mean} \sum_{i=2}^4 Tavg_i \\ \dots \\ \text{mean} \sum_{i=10}^{12} Tavg_i \end{array} \right)_{\text{Max}}$
(Bio 17) بارش گرم‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \text{mean} \sum_{i=1}^3 Tavg_i \\ \text{mean} \sum_{i=2}^4 Tavg_i \\ \dots \\ \text{mean} \sum_{i=10}^{12} Tavg_i \end{array} \right)_{\text{Max}}$	(Bio 18) بارش مرطوب‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 PPT_i \\ \sum_{i=2}^4 PPT_i \\ \dots \\ \sum_{i=10}^{12} PPT_i \end{array} \right)_{\text{Max}}$	(Bio 19) میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \text{mean} \sum_{i=1}^3 PPT_i \\ \text{mean} \sum_{i=2}^4 PPT_i \\ \dots \\ \text{mean} \sum_{i=10}^{12} PPT_i \end{array} \right)_{\text{Max}}$
(Bio 16) میانگین دمای سردترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \text{mean} \sum_{i=1}^3 Tavg_i \\ \text{mean} \sum_{i=2}^4 Tavg_i \\ \dots \\ \text{mean} \sum_{i=10}^{12} Tavg_i \end{array} \right)_{\text{Min}}$	(Bio 20) خشک‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \sum_{i=1}^3 PPT_i \\ \sum_{i=2}^4 PPT_i \\ \dots \\ \sum_{i=10}^{12} PPT_i \end{array} \right)_{\text{Min}}$	(Bio 20) میانگین دمای خشک‌ترین فصل	$\left(\begin{array}{c} \text{mean} \sum_{i=1}^3 PPT_i \\ \text{mean} \sum_{i=2}^4 PPT_i \\ \dots \\ \text{mean} \sum_{i=10}^{12} PPT_i \end{array} \right)_{\text{Min}}$

i= ماه؛ Tmax = میانگین ماهانه حداکثر دمای روزانه؛ Tmin = میانگین ماهانه حداقل دمای روزانه؛ PPT = بارش کل ماهانه؛ Tavg - میانگین دمای ماهانه

تجزیه و تحلیل داده‌ها

بررسی توزیع، هم‌بستگی و رگرسیون متغیرها

قبل از انتخاب روش مناسب برای درون‌یابی داده‌های دما و بارش سالانه، به بررسی و تجزیه و تحلیل توصیفی داده‌ها پرداخته شد، بدین منظور ابتدا شاخصه‌های آمار توصیفی برای هر دو متغیر دمای سالانه و بارش محاسبه شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف یک نمونه‌ای و ترسیم

نمودار q-q بررسی شد. به منظور محاسبه معادله رگرسیون بارندگی با ارتفاع و هم‌چنین دمای سالانه با ارتفاع ابتدا ضریب هم‌بستگی محاسبه شد و سپس معادله رگرسیونی ترسیم شد.

بررسی نیم تغییرنما، روند و هم‌بستگی مکانی متغیرها

ارتباط بین گشتاور اینرسی، نمودار پراکندگی داده‌ها و فاصله بین جفت نقاط (h) موسوم به نیم‌تغییرنما (Semivariogram)

خارجی و پنج روش توابع شعاع محور برای مدل‌سازی مکانی داده‌های اقلیمی و زیست اقلیمی استفاده شد

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [3]$$

ارزیابی روش‌های درونیابی به منظور انتخاب بهترین روش برای داده‌های اقلیمی و زیست اقلیمی

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 موردنظر انجام می‌گیرد. معیارهای مختلفی برای مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده وجود دارد که در این مطالعه از دو روش میانگین انحراف خطا (MBE) و ریشه دوم مربع میانگین خطا (RMSE) استفاده شد.

بررسی امکان‌سنجی اجرای روش‌های درونیابی و بهینه‌سازی پارامترها در هر روش

به منظور امکان‌سنجی استفاده از هر یک از 9 مدل به بررسی روند، هم‌بستگی مکانی و ناهمسان‌گردی 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 بهینه‌شده و پارامتری که کمترین میزان خطا را داشت به‌عنوان پارامتر بهینه آن مدل انتخاب شد.

روش معکوس فاصله وزنی

در روش IDW که از جمله روش‌های زمین‌آمار قطعی است، مقدار نقاط مجهول (S_0) از طریق ترکیب خطی نقاط معلوم (S_i) در اطراف نقطه مجهول با استفاده از رابطه 3 محاسبه شد.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^m \lambda_i Z(S_i) \quad [3]$$

وزن هر نقطه معلوم (I_i) بر اساس فاصله آن تا نزدیک‌ترین

است که یکی از مهم‌ترین روش‌های تحلیل و بررسی هم‌بستگی مکانی داده‌های اقلیمی به‌شمار می‌رود. معادله 1 رابطه نیم تغییرنا را نشان می‌دهد. در این معادله $\gamma(h)$ مقدار نیم تغییرنا برای جفت نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند. $n(h)$ تعداد زوج نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند. $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر x در موقعیت i و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهده‌ای متغیر در h از x_i است

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

به منظور محاسبه میزان وزن اختصاص داده شده به هر ایستگاه در روش کریجینگ و هم‌چنین هم‌بستگی مکانی و روند متغیرها، نیم تغییرنا بر اساس سه مدل کروی، گوسی و نمایی ترسیم شد. از آنجا که شبکه ایستگاه‌ها به صورت نامنظم در سطح منطقه مورد مطالعه پراکنده شده بود، لذا انتخاب گام (Lap) در نرم افزار GIS بر اساس متوسط فاصله بین نقاط و نیم تغییرنمای بدون جهت صورت گرفت.

وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها با استفاده از ترسیم نیم تغییرنا بررسی شد. به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل برازش داده شده به نیم تغییرنمای تجربی از اعتبارسنجی متقاطع استفاده شد. بدین منظور، مدل‌های مختلف با پارامترهای متفاوت انتخاب و هر یک از مدل‌ها که پس از اجرای روش کریجینگ دارای خطای برآورد کمتری بود به‌عنوان مدل بهینه نیم تغییرنا انتخاب شد.

انتخاب روش درونیابی برای داده‌های اقلیمی و زیست اقلیمی

انتخاب بهترین روش درونیابی در واقع نوعی آزمون هزینه منفعت بین کارایی و پیچیدگی مدل است. اکثر روش‌های درونیابی از رابطه 2 برای محاسبه نقاط مجهول استفاده می‌کنند. تفاوت‌های روش‌های مختلف درونیابی، در وزن اختصاص داده شده (λ_i) به هر ایستگاه است. در این مطالعه از روش‌های IDW، کریجینگ، کوکریجینگ، کریجینگ با روند

در جدول 2 نشان داده شده است. نتایج بررسی نرمال بودن داده‌ها نشان داد که هر دو متغیر بارندگی سالانه ($KS P = 0/792$) و دمای متوسط سالانه ($KS P = 0/692$) از توزیع نرمال پیروی می‌کنند (شکل 2). نتایج بررسی هم‌بستگی نشان داد که بین متوسط دمای سالانه و ارتفاع ($R = 0/926$, $P = 0/00$) در منطقه مورد مطالعه هم‌بستگی معنی‌داری وجود دارد. اما میزان هم‌بستگی بین بارندگی و ارتفاع ($R = 0/483$, $P = 0/01$) چندان زیاد نبود هم‌چنین معادله گرادیان بارندگی و ارتفاع ($Y = 36/33 + 28/20 X + 0/007 X$) و گرادیان دما و ارتفاع ($Y =$ بدست آمد.

بررسی نیم تغییرنما، روند و همبستگی مکانی متغیرها

نتایج محاسبه نیم تغییرنمای بدون جهت برای سه مدل گوسی، نمایی و کروی در جدول 3 آورده شده است. بر اساس روش ارزیابی متقابل، مدل نمایی کمترین میزان خطا را برای هر دو متغیر دما و بارش نشان داد. لذا از این مدل برای انجام روش کریجینگ استفاده شد. بعد از بهینه کردن بهترین مدل نیم تغییرنما، ترسیم نیم تغییرنما برای دو متغیر دما و بارندگی بر اساس مدل نمایی انجام شد (شکل 3). همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، ترسیم نیم تغییرنمای تجربی نشان از وجود هم‌بستگی مکانی در دو متغیر دما و بارندگی دارد. علاوه بر این، شیب کم نیم تغییرنما در نزدیک مبدأ، وجود هم‌بستگی مکانی را تأیید می‌کند. از طرف دیگر، با توجه به این که میزان نیم تغییرنما با افزایش فاصله، افزایش و سپس به سقف معینی می‌رسد، عدم وجود روند و یا ارتباط خطی مستقیم بین متغیر اصلی و کمکی در دو متغیر دما و بارندگی مشهود است. به منظور بررسی امکان استفاده از مدل کوکریجینگ، نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع و هم‌چنین دما و ارتفاع ترسیم شد (شکل 3). دما و ارتفاع در نیم تغییرنما هم‌بستگی مکانی نشان دادند، لذا امکان استفاده از روش کوکریجینگ وجود داشت، به دلیل عدم وجود هم‌بستگی مکانی بین بارندگی و ارتفاع امکان استفاده از روش کوکریجینگ در محدوده مورد مطالعه وجود نداشت.

نقطه معلوم بعدی با استفاده از یک تابع فاصله‌ای غیرخطی زیر محاسبه شد (رابطه 4) (23).

$$[4] \quad \lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^m d_{i0}^{-p}}, \quad \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$$

در رابطه 4، d_{i0} فاصله بین نقطه معلوم تا نقطه مجهول را نشان می‌دهد. از روش IDW تا کنون در رابطه با مطالعات اقلیمی زیادی استفاده شده است (7 و 18). روش IDW برای مناطقی که تعداد داده‌های معلوم زیاد نباشد، روش مناسبی است (22). به دلیل گستردگی منطقه مورد مطالعه و پراکندگی کم ایستگاه‌های هواشناسی در مرکز کشور، از این روش برای درون‌یابی متغیرهای زیست‌اقلیمی استفاده شد. قبل از اجرای مدل، سه پارامتر توان فاصله، شعاع همسایگی و نقاط همسایگی با استفاده از روش ارزیابی متقاطع بهینه شد.

روش کریجینگ، کریجینگ با روند خارجی و کوکریجینگ

روش کریجینگ با روند خارجی در مواردی استفاده می‌شود که متغیر اصلی با یک متغیر کمکی، ارتباط مکانی خطی داشته باشد. در این روش نخست روند موجود در داده‌ها با استفاده از نیم تغییرنما محاسبه شد. برای اجرای روش کوکریجینگ نیم تغییرنمای متغیر کمکی (ارتفاع) و نیم تغییرنمای متقابل متغیر اصلی و متغیر کمکی نیز ترسیم گردید.

روش توابع شعاع محور (RBF)

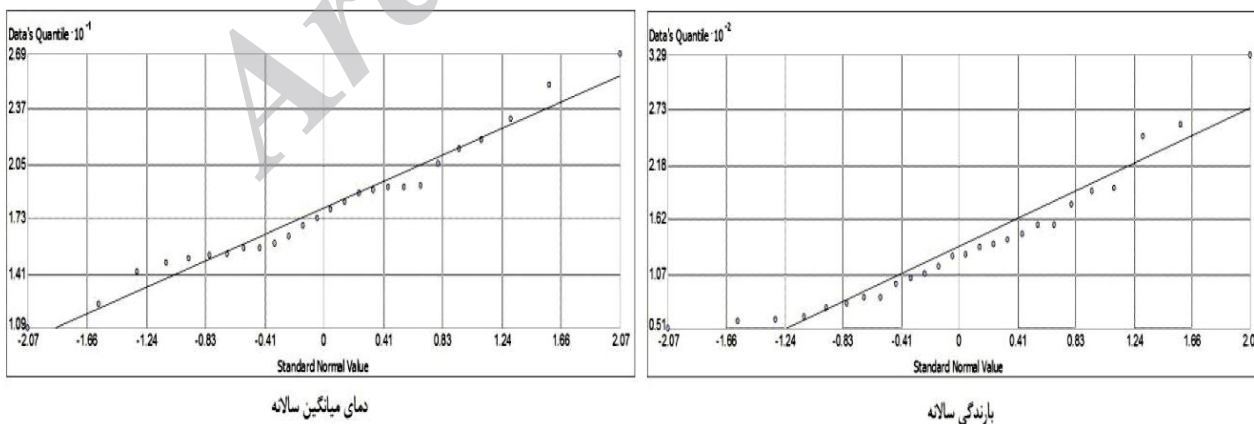
قبل از اجرای روش RBF پارامترهای این روش بهینه شدند. در این مطالعه پنج مدل مختلف از RBF مورد ارزیابی قرار گرفت و بر اساس میزان ریشه دوم میانگین مربع خطا و هم‌چنین میانگین انحراف خطا بهترین مدل RBF برای درون‌یابی دو متغیر دما و بارندگی انتخاب شد. تمامی آنالیزهای آماری با استفاده از نرم افزار SPSS و درون‌یابی داده‌ها در محیط Arc GIS انجام شد.

نتایج

تجزیه و تحلیل داده‌های بارش سالانه و دمای میانگین سالانه آماره‌های توصیفی 20 متغیر زیست اقلیمی در منطقه مورد مطالعه

جدول 2. میانگین، میانه، مینیمم و ماکزیمم 20 متغیر زیست‌اقلیمی در محدوده مورد مطالعه (C°)

متغیر	توصیف	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	میانه
Bio ¹	دمای متوسط سالانه	10/93	26/89	17/90	17/59
Bio ²	متوسط سالانه دامنه روزانه دما	9/45	17/79	14/59	14/54
Bio ³	ایزوترمالی (هم‌دمایی)	26/44	45/76	37/58	37/72
Bio ⁴	دامنه سالانه دما	34/67	42/75	38/76	39/03
Bio ⁵	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	31/01	44/08	37/72	37/67
Bio ⁶	حداقل دمای سردترین ماه	-8/11	8/55	-1/04	-1/15
Bio ⁷	بارش سالانه	51/45	328/98	134/37	126/16
Bio ⁸	بارش مرطوب‌ترین ماه	12/16	62/75	28/47	24/34
Bio ⁹	بارش خشک‌ترین ماه	0/00	1/32	0/35	0/14
Bio ¹⁰	رژیم دما (انحراف معیار)	7/99	10/13	8/93	8/95
Bio ¹¹	رژیم دما (ضریب تغییرات)	2/76	3/47	3/07	3/09
Bio ¹²	رژیم بارش	75/41	111/58	87/82	85/39
Bio ¹³	بارش سردترین فصل	26/08	145/72	67/71	59/58
Bio ¹⁴	بارش خشک‌ترین فصل	0/11	11/12	2/22	1/45
Bio ¹⁵	میانگین دمای گرم‌ترین فصل	22/16	36/52	28/73	28/01
Bio ¹⁶	میانگین دمای سردترین فصل	-0/82	15/94	6/68	6/40
Bio ¹⁷	بارش گرم‌ترین فصل	0/26	16/58	3/47	2/42
Bio ¹⁸	بارش مرطوب‌ترین فصل	29/47	165/81	73/83	61/39
Bio ¹⁹	میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل	4/08	15/94	8/92	8/45
Bio ²⁰	میانگین دمای خشک‌ترین فصل	15/90	35/59	27/35	26/96



شکل 2. ترسیم نمودار q-q دو متغیر دما و بارش به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها

جدول 3. بررسی مدل‌های مختلف نیم تغییر نما برای دو متغیر دما و بارندگی

Mean of Error	RMSE	CO	آستانه	شعاع هم‌بستگی	متغیر	نوع مدل	مدل
57/49	52/22	2125/4	3656/3	6/92	بارندگی	کروی	مدل 1
2/37	2/36	2/36	15/76	7/97	دما		
59/7	56/31	2981/1	3337	7/85	بارندگی	گوسی	مدل 2
2/52	2/58	4/99	15/07	7/97	دما		
54/04	47/27	0	5158/4	3/58	بارندگی	نمایی	مدل 3
2/34	2/34	0/47	16/49	7/97	دما		

از بهینه سازی پارامترهای این مدل، میزان خطای محاسبه شده برای متغیر دما به ترتیب برای $RSME$ و MBE 1/30 و 0/093- به دست آمد. نتایج میزان میانگین مربعات خطای درون‌یابی با روش کریجینگ معمولی نیز برای متغیر دما و بارندگی سالانه به ترتیب 2/34 و 27/47 محاسبه شد.

ارزیابی مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل برای درون‌یابی دما و بارش

محاسبه میزان میانگین مربعات خطا و میانگین خطای استاندارد با استفاده از روش ارزیابی مقاطع نشان داد که در رابطه با متغیر متوسط دمای سالانه، کمترین میزان خطا مربوط به روش کوکریجینگ و برای متغیر بارندگی روش کریجینگ است. به نظر می‌رسد روش کوکریجینگ و IDW به ترتیب بهترین روش‌ها برای درون‌یابی متغیر دمای متوسط سالانه و بارش سالانه باشند (جدول 5).

نقشه توزیع مکانی بارندگی سالانه و متوسط دمای سالانه به ترتیب با روش‌های IDW و کوکریجینگ ترسیم شد (شکل 4). همان‌طور که انتظار می‌رود، به دلیل پیوسته بودن تغییرات دما، نقشه درون‌یابی شده میانگین دمای سالانه طبقه‌بندی منظمی را نشان می‌دهد. به نحوی که از شرق به غرب و شمال به جنوب افزایش دما با نظم مشخصی دیده می‌شود. به دلیل گسسته بودن تغییرات بارندگی در مرکز کشور، طبقه‌بندی پیچیده‌تری در رابطه با نقشه درون‌یابی شده تغییرات بارندگی سالانه مشاهده شد (شکل 4).

تعیین بهترین روش درون‌یابی برای داده‌های زیست‌اقلیمی نیز براساس نتایج به دست آمده برای دو متغیر اقلیمی دمای متوسط

بررسی روش IDW در درون‌یابی داده‌های دما و بارندگی

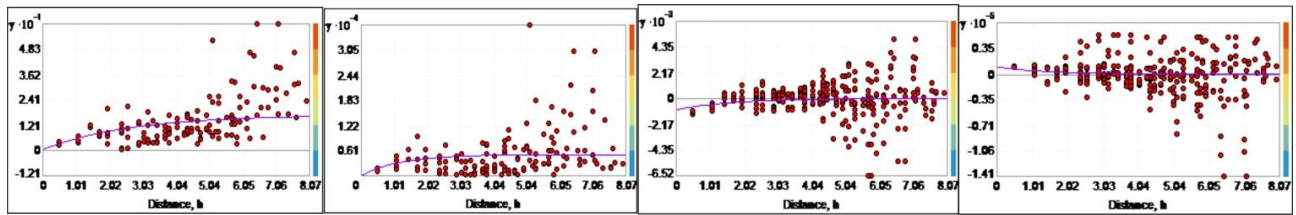
قبل از اجرای مدل IDW بهینه سازی پارامترها انجام شد. برای دمای سالانه در منطقه توان 3/08 و برای بارش سالانه توان 3/8 توان بهینه، تعیین شد. تعداد نقاط همسایگی و شعاع همسایگی با استفاده از روش اعتبار، سنجی تقاطعی استخراج شد و در نهایت تعداد نقاط همسایگی هم برای دمای سالانه و هم بارش 6 برآورد شد. میزان خطای میانگین مربعات در این روش برای متغیر دما 2/23 و برای متغیر بارندگی 46/94 به دست آمد.

روش RBF

نتایج ارزیابی 5 مدل RBF در (جدول 4) نشان داده شده است. براساس میزان MBE و $RMSE$ برای متغیر دما، مدل $Thin\ plate\ spline$ و برای متغیر بارش $Spline\ with\ tension$ دارای خطای کمتری بود. میزان شاخص $RMSE$ برای متغیر دما براساس مدل بهینه 2/19 و برای متغیر بارندگی 47/19 به دست آمد.

روش کریجینگ، کریجینگ با روند خارجی و کوکریجینگ

از آنجا که نیم تغییرنمای رسم شده برای دو متغیر دما و بارش، عدم وجود روند و یا به عبارت دیگر عدم وجود رابطه خطی مستقیم بین متغیر اصلی و متغیر کمکی در داده‌ها را نشان داد، لذا امکان استفاده از مدل کریجینگ با روند خارجی برای این دو متغیر در محدوده مورد مطالعه امکان‌پذیر نبود. در رابطه با مدل کوکریجینگ نیز نتایج بررسی هم‌بستگی مکانی متقابل بین دو متغیر اصلی دما و بارش با متغیر کمکی ارتفاع بر اساس نیم تغییرنمای نمایی، تنها در رابطه با متغیر دما هم‌بستگی متقابل نشان داد، لذا در این مطالعه مدل کوکریجینگ فقط برای متغیر دما استفاده شد. پس



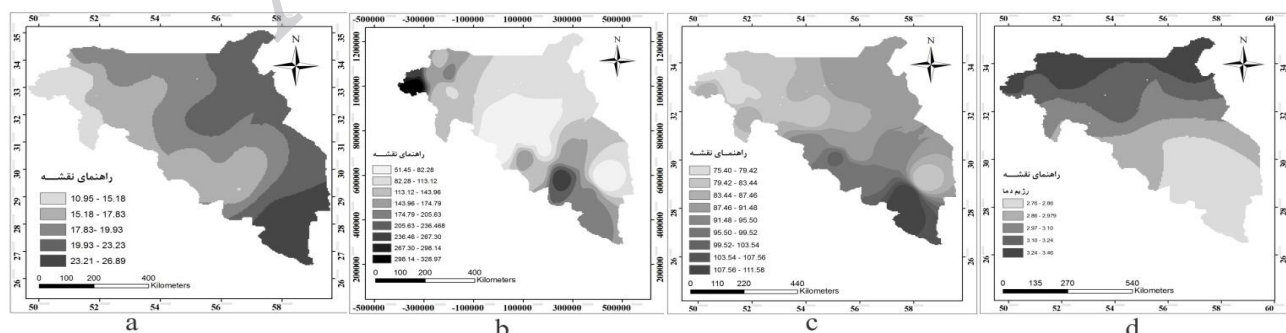
شکل 3. نیم تغییرنا ترسیم شده برای متغیرهای بارندگی (a)، دما (b)، دما و ارتفاع (c) و بارندگی و ارتفاع (d) بر اساس مدل گوسی

جدول 4. نتایج ارزیابی پنج مدل مختلف RBF و تعیین بهترین پارامتر هموارساز

روش	متغیر	مقدار بهینه پارامتر هموار ساز	MBE	RMSE
Regularized spline	دما	3/01	-0/15	2/44
	بارش	4/83	1/48	47/41
Spline with tension	دما	0/0002	-/002	2/24
	بارش	0/0002	4/96	47/19
Multiquadric	دما	0/001	-0/076	2/26
	بارش	0/206	3/06	47/34
Inverse multiquadric	دما	1/07	-0/15	2/46
	بارش	0/73	1/60	47/46
Thin plate spline	دما	6/60	0/013	2/19
	بارش	4/83	1/48	47/41

جدول 5. ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های دما و بارش در مرکز کشور

روش	متغیر	MBE	RMSE
کریجینگ	متوسط دمای سالیانه	-0/110	2/34
	بارندگی سالیانه	-1/268	47/27
کوکریجینگ	متوسط دمای سالیانه	-0/093	1/30
	بارندگی سالیانه	غیرقابل انجام	غیرقابل انجام
IDW	متوسط دمای سالیانه	-0/017	2/23
	بارندگی سالیانه	1/23	46/94
RBF	متوسط دمای سالیانه	-0/119	2/19
	بارندگی سالیانه	1/23	47/19



شکل 4. نقشه پیوسته توزیع مکانی دمای متوسط سالانه (a)، و بارش سالانه (b)، رژیم بارش (c) و رژیم دما (d) بر اساس روش‌های بهینه

برای هر متغیر

به‌دست آمده از دو متغیر نامفهوم است. لذا در این مطالعه سعی شد تا در درجه اول نحوه محاسبه متغیرهای زیست‌اقليمی بیان شود. بدین منظور استخراج 20 متغیر زیست‌اقليمی از داده‌های نرمال دما و بارش سالانه 26 ایستگاه سینوپتیک در طی سال‌های 1950 تا 2010 در منطقه مرکزی کشور بیان شد.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که روش‌های درون‌یابی بسته به نوع متغیر و هم‌چنین ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، تراکم نقاط اندازه‌گیری و نحوه آرایش آنها دقت متفاوتی را ارائه می‌کنند و نمی‌توان نتایج یک منطقه را به راحتی به مناطق دیگر تعمیم داد. نتایج بررسی نیم‌تغییر نما نشان داد که بهترین مدل ریاضی نیم‌تغییر نما، مدل نمایی است. مدل نمایی، عدم روند در داده‌های دما و بارش را نشان داد که این امر استفاده از روش کریجینگ با روند خارجی را محدود کرد. هم‌چنین مدل نیم‌تغییر نما نشان داد که متغیر دما، بارش و هم‌چنین اثر متقابل بین دما و ارتفاع هم‌بستگی مکانی وجود دارد. نتایج بررسی هم‌بستگی مکانی متقابل بین بارش و ارتفاع بر اساس مدل نیم‌تغییر نما، هم‌بستگی مکانی ضعیفی بین بارندگی و ارتفاع نشان داد که این موضوع را می‌توان به وسعت زیاد منطقه مورد مطالعه و در نتیجه تفاوت در منشأ بارندگی مناطق مختلف محدود شده مورد مطالعه نسبت داد. نتایج تحلیل رگرسیونی و میانگین مربعات خطا نشان داد که در مورد بارش سالانه، روش IDW بهترین روش درون‌یابی است. اما در مورد داده‌های متوسط دمای سالانه، نتایج تحلیل رگرسیونی و میانگین مربعات خطا، روش کوکریجینگ را به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی معرفی کرد. در رابطه با متغیرهای زیست‌اقليمی نیز بسته به نوع متغیر، روش بهینه برای درون‌یابی داده‌ها در مرکز کشور تعیین شد. برای بسیاری از متغیرهای زیست‌اقليمی استخراج شده از متغیر دما همانند رژیم دما، حداکثر دمای گرم‌ترین ماه، حداقل دمای سردترین ماه، میانگین دمای گرم‌ترین فصل و دمای میانگین سردترین فصل روش بهینه روش کوکریجینگ تعیین شد که این موضوع نشان از مناسب بودن متغیر ارتفاع به‌عنوان یک متغیر کمکی در درون‌یابی داده‌های زیست‌اقليمی دما، در مرکز کشور است.

متوسط دما و بارش به‌ترتیب روش‌های کوکریجینگ و IDW بهینه‌ترین روش‌ها تعیین شدند.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی تغییرات اقلیمی در طول زمان تاثیر به‌سزایی در کمی‌سازی اثرات اقلیم بر توزیع پراکنش گونه‌ها در بازه‌های زمانی و در نتیجه در مدیریت و حفاظت از تنوع زیستی دارد (17). بر اساس فرضیه اتکولوژی مایر، پویایی هر جمعیت در زیستگاه‌های بیابانی اساساً توسط واکنش‌های مستقل آن به محیط و به‌ویژه آب تعیین می‌شود. بر این اساس مایر بیان می‌کند که در اکوسیستم‌های نواحی خشک، آب عامل کنترل‌کننده فعالیت‌های زیستی گونه‌ها است. بر اساس مدل مفهومی ارائه شده در خصوص پراکنش بیوم‌ها و اجتماعات گیاهی و جانوری، تغییرات فصلی بارندگی عامل تشدیدکننده ویژگی‌های حیاتی جانداران تشکیل‌دهنده بیوم‌های بیابانی است. بر اساس نظریه کنترل ناحیه‌ای الگوهای پراکنش گاما، میزان تنش‌های اقلیمی نواحی بیابانی با تنوع زیستگاه‌های بیابانی ارتباط معنی‌داری دارد.

یکی از مهم‌ترین روش‌های بررسی تاثیر اقلیم بر مدلسازی زیستگاه گونه‌ها استفاده از شاخص‌های زیست‌اقليمی استخراج شده از داده‌های اقلیمی می‌باشد. با توجه به تاثیر عوامل زیست‌اقليمی بر بقا و عملکرد زیستی گونه‌ها، بررسی تغییرات زیست‌اقليمی می‌تواند به فهم ارتباط بین فاکتورهای زیستی و محیطی و هم‌چنین ارزیابی تنوع‌زیستی کمک کند (5). داده‌های زیست‌اقليم غالب مطالعات مدلسازی پراکنش گونه‌ها که در ایران انجام شده است، از منبع جهانی Worldclim استخراج شده است؛ در حالی که نحوه محاسبات داده‌های زیست‌اقليمی برای بسیاری از محققین کشور سالانه و بارندگی سالانه صورت گرفت. بدین منظور برای تمامی 20 متغیر زیست‌اقليمی روش‌های توابع شعاع محور، معکوس فاصله وزنی و کریجینگ انجام شد و بهترین روش برای هر متغیر بر اساس میانگین مربعات خطا تعیین شد (جدول 6). همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، برای دو متغیر زیست‌اقليمی رژیم دما و رژیم بارش همانند نتایج

جدول ۹. ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های زیست‌اقليمی در مرکز کشور با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا

IDW	کوکرچینگ	کرچینگ	Thin plate spline	Inverse multiquadric	Multiquadric	Spline with tension	Regularized spline	توصیف	متغیر
۱/۸۲	۲/۰۸	۱/۸۲	۲/۶۷	۱/۸۴	۲/۰۷	۱/۸۷	۱/۸۶	دامنه میانگین دمای روزانه	Bio ^۲
۳/۲۴	۳/۸۵	۳/۸۳	۴/۸۳	۳/۳۸	۳/۷۶	۳/۴۲	۳/۴۱	اینترپولاسیون (همدمایی)	Bio ^۳
۱/۷۹	۱/۸۰	۱/۸۱	۲/۴۴	۱/۸۶	۱/۹۵	۱/۷۸	۱/۷۷	دامنه سالانه دما	Bio ^۴
۲/۷۵	۱/۴۷	۳/۱۳	۳/۱۲	۲/۸۸	۲/۸۲	۲/۸۴	۲/۸۴	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	Bio ^۵
۲/۱۷	۱/۵۵	۲/۴۲	۲/۱۷	۲/۴۶	۲/۳۰	۲/۲۳	۲/۳۹	حداقل دمای سردترین ماه	Bio ^۶
۱۱/۱	-	۱۲/۳۵	۱۱/۲۱	۱۱	۱۱/۰۷	۱۱	۱۱/۰۴	بارش مرطوب‌ترین ماه	Bio ^۸
۰/۳۰	-	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۲۹	بارش خشک‌ترین ماه	Bio ^۹
۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۴	رژیم دما (انحراف معیار)	Bio ^{۱۰}
۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	رژیم دما (ضریب تغییرات)	Bio ^{۱۱}
۶/۵۵	-	۷/۱۶	۸/۶۲	۶/۵۶	۷/۰۸	۶/۷۵	۶/۷۱	رژیم بارش	Bio ^{۱۲}
۲۸/۷۴	-	۳۱/۰۵	۲۷/۳۸	۲۶/۶۶	۲۷/۰۱	۲۷/۸۴	۲۶/۸۲	بارش سردترین فصل	Bio ^{۱۳}
۲/۱۵	-	۲/۱۲	۲/۰۳	۲/۰۵	۱/۹۸	۱/۹۹	۲/۰۳	بارش خشک‌ترین فصل	Bio ^{۱۴}
۲/۵	۱/۴۹	۲/۸۸	۲/۳۷	۲/۸۱	۲/۴۷	۲/۴۴	۲/۶۶	میانگین دمای گرم‌ترین فصل	Bio ^{۱۵}
۱/۹۶	۱/۳۱	۲/۱۹	۲/۰۲	۲/۱۶	۲/۰۱	۲/۰۶	۲/۱۵	میانگین دمای سردترین فصل	Bio ^{۱۶}
۳/۷۸	-	۳/۶۴	۴/۱۳	۳/۷۸	۳/۶۷	۳/۷۴	۳/۷۴	بارش گرم‌ترین فصل	Bio ^{۱۷}
۳۰/۳۵	-	۳۳/۴	۳۱/۰۷	۲۹/۹۳	۳۰/۲۹	۳۰/۳۳	۳۰	بارش مرطوب‌ترین فصل	Bio ^{۱۸}
۲/۱۱	۲/۴۱	۲/۴۵	۲/۵۷	۲/۴۰	۲/۲۴	۲/۳۱	۲/۳۴	میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل	Bio ^{۱۹}
۲/۲۷	۲/۸۸	۲/۹۴	۳/۶۶	۳/۵۵	۳/۴۴	۳/۵۰	۳/۵۳	میانگین دمای خشک‌ترین فصل	Bio ^{۲۰}

متغیر کمکی ارتفاع و روش کوکریجینگ می‌تواند سبب افزایش دقت در درون‌یابی داده‌های زیست‌اقليمی دما شود. تعیین مدل نمایی برای نیم تغییرنا در این مطالعه با نتایج پونیاوردنا و کولاسیری (20) (1998) که به بررسی برآورد بارندگی در نواحی خشک سریلانکا پرداختند، تطابق داشت. نتایج مطالعه گورتز (11) نشان داد که استفاده از روش کوکریجینگ برای مناطقی که ضریب هم‌بستگی بین دما و ارتفاع زیاد باشد، مناسب است. که این موضوع با نتایج این مطالعه تطابق داشت. هو و ژیانگ (15) در مطالعه‌ای به مدلسازی زیستگاه آهو در کشور چین پرداختند که در این مطالعه علاوه بر متغیرهای محیطی، 19 متغیر زیست‌اقليمی نیز وارد مدل شد. نتایج این مطالعه نشان داد که از پنج متغیر مهم تاثیرگذار بر پراکنش گونه، چهار متغیر زیست‌اقليمی حداکثر دمای گرم‌ترین ماه، میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل، میانگین دمای گرم‌ترین فصل و ایزوترمالتی دخالت داشته‌است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، می‌توان با استخراج و درون‌یابی داده‌های زیست‌اقليمی نقشه‌های مکانی پیوسته این متغیرها را برای نقاط مرکزی کشور تولید و در مدل‌های مختلف توزیع پراکنش گونه‌های زیست‌بوم‌های مرکزی کشور به‌کار گرفت.

روش IDW تا کنون در بسیاری از مطالعات به‌عنوان روش مناسب جهت درون‌یابی داده‌های بارش معرفی شده‌است (7 و 18). از آنجا که روش IDW نیاز به ترسیم نیم‌تغییرنا ندارد، لذا استفاده از این روش به‌دلیل کاربرد آسان، رایج‌تر می‌باشد. زمانی که تعداد نقاط مشاهده (ایستگاه‌ها) کمتر از 30 باشد، استفاده از روش IDW بیشتر توصیه می‌شود (22). در مناطق مرکزی کشور به دلیل اندک بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی، استفاده از این روش در درون‌یابی داده‌های اقلیمی توصیه می‌شود. با بهینه‌سازی سه پارامتر توان فاصله، شعاع همسایگی و فاصله همسایگی می‌توان دقت این روش را در درون‌یابی داده‌های اقلیمی و زیست‌اقليمی افزایش داد. در این مطالعه توان بهینه برای درون‌یابی داده‌های بارش سالانه 3/8 به‌دست آمد که این امر نشان از دامنه تغییرات بالای بارندگی در محدوده مورد مطالعه است. لینچ (16) روش‌های تبدیل بارندگی روزانه نقطه‌ای در آفریقای جنوبی را بررسی کرد و روش معکوس وزنی فاصله را توصیه نمود. انصافی مقدم و رفیعی (1388) روش IDW را برای پهنه‌بندی خشکسالی‌های اقلیمی به‌عنوان بهترین روش معرفی کردند. روش درون‌یابی کوکریجینگ نیز تا کنون در بسیاری از مطالعات به‌عنوان روش بهینه برای درون‌یابی داده‌های اقلیمی معرفی شده‌است (11 و 21). از آنجا که در محدوده مورد مطالعه هم‌بستگی بالایی بین دما و ارتفاع مشاهده شد، لذا استفاده از

منابع مورد استفاده

1. انصافی مقدم، ط. و ی. ی. رفیعی. 1380. مقایسه روش‌های درون‌یابی برای تعیین کمترین خطای تخمین زده شده. مطالعه موردی دما و تبخیر. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی 8 (12): 63-78
2. فاطمی قیری، س. و ح. یزدان پناه. 1391. ارزیابی روش‌های مختلف میان‌یابی به‌منظور برآورد داده‌های بارش استان اصفهان. فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی. 12 (40): 46-63
3. نادى، م.، م. جامعی، ج. بذرافشان. و س. جنت رستمی. 1391. ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه (مطالعه‌ی موردی: استان خوزستان). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی 44 (4): 117-130.
4. Austin, M. P. 2002. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modeling. *Ecological Modelling* 157: 101-118.
5. Bailey, R. G. 1985. Ecological regionalization in Canada and the United States. *Geoforum* 16: 265-275.

6. Beaumont, L. J., L. Hughes. and M. Poulsen. 2005. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species, current and future distributions. *Ecological Modelling* 186: 250–69.
7. Buishand, T. A., J. J. Beersma, R. Sluiter. and T. Kroon. 2008. Definitie studie raster data meteorologie. De Bilt, KNMI / RWS Waterdienst
8. Busby, J. R. 1991. BIOCLIM: a bioclimatic analysis and prediction system. PP. 64-68. In: Margules, C. R. and M. P. Austin (Eds), Nature Conservation. CSIRO., Australia.
9. Carpenter, T. P., M. L. Franke, V. Jacobs. and E. Fennema. 1998. A longitudinal study of invention and understanding in children's multidigit addition and subtraction. *Journal for Research in Mathematics Education* 29: 3–20.
10. Friedman, J. H. 2002. Stochastic gradient boosting. *Computer Statistic Data Analysis* 38: 367–378.
11. Goovaerts, P. 2000. Eostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York.
12. Goovaerts, P. 2000. Geostatistical approach for incorporating elevation into spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228:113–129.
13. Friedt, M. 2007. Modelling habitat suitability to predict the potential distribution of erhard's wall lizard *podarcis erhardii* on Crete. PhD. Thesis, University of Southampton (UK).
14. Hirzel, A. H., J. Hausser, D. Chessel. and N. Perrin. 2002. Ecologicalniche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* 83: 2027–2036.
15. Hu, J. and Z. Jiang. 2010. Predicting the potential distribution of the endangered Przewalski's gazelle. *Journal of Zoology* 282: 54–63.
16. Lynch, S. D. 2001. Converting point estimates of daily rainfall onto a rectangular grid. PHD. Thesis, Department of Agricultural Engineering, The University of Natal. South Africa.
17. O'Donnell, M. S. and D. A. Ignizio. 2012. Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous united states. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
18. Perry, M. and D. Hollis. 2005. The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the UK. *International Journal of Climatology* 25: 1041–1054.
19. Phillips, S. J. and M. Dudik. 2004. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161–175.
20. Punyawordena, B. V. R. and D. Kulasiri. 1998. Spatial interpolation of rainfall in the dry zone of Srilanka. *Journal of the National Science Council of Sri Lanka* 26: 247–262.
21. Schuurmans, J. M., M. F. B. Bierkens. and E. J. Pebesma. 2007. Automatic prediction of high-resolution daily rainfall fields for multiple extents: the potential of operational radar. *Journal of Hydrometeorology* 8: 1204 - 1224.
22. Sluiter, R. 2009. Interpolation methods for climate data. literature review. KNMI Intern rapport; IR 2009-04. Netherlands.
23. Smith, M. J., M. F. Goodchild. and P. A. Longley. 2007. Geospatial analysis – a comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Leicester, Matador. Troubador Publishing Ltd, 516p.
24. Stabach, J. A., N. Laporte. and W. Olupot. 2009. Modeling habitat suitability for grey crowned-cranes (*Balearica regulorum gibbericeps*) throughout Uganda. *International Journal of Biodiversity and Conservation* 1: 177–186