

مطالعه موردی پهنه‌بندی دماهای کمینه و بیشینه (روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه) با در نظر گرفتن ناهمواری‌ها روی ایران

سبا قطبی^۱، غلامعلی و کیلی^{۲*}، مجید آزادی^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد پژوهشکده هواشناسی

۳- دانشیار پژوهشکده هواشناسی

(تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۱۱)

چکیده

با توجه به اهمیت روز افزون آگاهی از وضعیت هواشناسی کلیه مناطق کشور، لزوم انجام فرایند درون‌یابی برای نقاط بدون داده (فاقد ایستگاه) کاملاً آشکار است. در این مقاله ضمن مرور کلیات مفهوم درون‌یابی و بررسی اجمالی مبانی نظری دو روش درون‌یابی، نمونه‌ای از نتایج پهنه‌بندی دماهای کمینه و بیشینه (روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه) روی کشور ارائه می‌شود. همچنین برای مقایسه، آنچه تاکنون و بدون در نظر گرفتن اثر ارتفاع در اختیار کاربران قرار می‌گیرد، به صورت متناظر آورده می‌شود. شایان گفتن است این نتایج حاصل پروژه مطالعاتی کوچکی است که در پژوهشکده هواشناسی انجام شده است. گروه پژوهشگران امید دارند که با اجرای این پروژه گام مفیدی برای بهبود و ارتقای کمی و کیفی پهنه‌بندی‌های دمایی در سازمان هواشناسی کشور برداشته شده باشد.

کلید واژه‌ها: پهنه‌بندی، درون‌یابی، دمای بیشینه، دمای کمینه

مقدمه

آگاهی از وضعیت اقلیمی و هواشناسی مناطق مختلف کشور از گذشته مورد توجه بوده است. به همین منظور از چند دهه پیش، استادان و کارشناسان هواشناسی مبادرت به تهیه اطلس اقلیمی کرده و حتی آن را به روز نیز کرده‌اند. با توجه به گسترش همه جانبه فعالیت‌های زیستی و صنعتی، در حال حاضر تقاضا برای این آگاهی بسیار بیشتر شده و نه تنها داده‌های اقلیمی و بلندمدت که آگاهی از داده‌های روزانه نیز اهمیت چشمگیری پیدا کرده و حتی از نظر اقتصادی دارای ارزش شده است. در میان فراسنج‌های هواشناسی، دمای یکی از مهم‌ترین متغیرهای مدل‌های محیط زیستی در فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکی به حساب می‌آید (پاول، ۲۰۰۸؛ هاک، ۲۰۰۳؛ لی، ۲۰۱۳). اهمیت تعیین دمای هوا در این است که دما اصلی‌ترین متغیر به منظور درک فرآیندهای مختلفی در طبیعت مانند تبخیر و تعرق به شمار می‌رود (تریسورات، شرسا و ژلگرن، ۲۰۱۱).

تعیین توزیع و تغییرات مکانی دما به منظور مشخص کردن تغییرات آب و هوا و تأثیرات گازهای گلخانه‌ای و همچنین گسترش مدل‌های زیست محیطی در مناطق مختلف مورد

توجه بسیاری قرار گرفته است (هولداوی، ۱۹۹۶؛ دادسون و مارکس، ۱۹۹۷؛ بولستاد، ۱۹۹۸؛ شن، ۲۰۰۱؛ دالی، ۲۰۰۲؛ هاسناوئر، ۲۰۰۳ و گارن و مارکس، ۲۰۰۵). اگرچه دمای هوا عموماً از داده‌های دیدبانی شده در ایستگاه‌های هواشناسی به دست می‌آید، یک مشکل جدی که همواره وجود داشته، پراکندگی جغرافیایی ایستگاه‌ها بوده است که به عنوان یک عامل محدود کننده، اجازه آگاهی دقیق از شرایط هواشناسی و اقلیمی هر نقطه دلخواه را نمی‌دهد. از یک طرف با توجه به محدودیت انسانی و مالی، در هر جا نمی‌توان ایستگاه تأسیس کرد (رولاند، ۲۰۰۳) و از طرف دیگر بسیاری مناطق هستند که ضروری است از وضعیت اقلیمی و هواشناسی آنها با صحت بیشتری آگاه باشیم. به همین دلیل باید با توجه به داده‌هایی که از ایستگاه‌های موجود در اختیار داریم، برای سایر مناطق به نوعی برآوردسازی کنیم.

ویلموت و ماتسورا در سال ۱۹۹۵ یک روش درون‌یابی برای توزیع مکانی سالانه دما با آهنگ کاهش ۱ میانگین دما و دمای میانگین برای دوره زمانی ۵۷ ساله پیشنهاد کرده‌اند (ویلموت و ماتسورا، ۱۹۹۵). در مطالعه‌ای دیگر دمای روزانه

^۱. Lapse rate

فیزیکی منطقه نیز مؤثر هستند (چوی، چانگ و یان، ۲۰۰۳؛ چانگ و یان، ۲۰۰۴؛ لیستون و الدر، ۲۰۰۶). موضوعی که به عنوان یک چالش در مناطق کوهستانی پیش می‌آید (که به طور معمول دمایی بسیار کمتر یا بارشی بیشتر از مناطق مجاور و هموار دارند) این است که با محاسبات درون‌یابی نمی‌توان برآوردی واقعی از دمای نقاط مرتفع‌تر به دست آورد. به دلیل وجود رشته‌کوه‌های بلند مانند البرز و زاگرس، توجه به این مسئله در کشور ما اهمیت زیادی پیدا می‌کند. یادآوری این مطلب ضروری است که اگرچه مبانی علمی روش‌های درون‌یابی سابقه چند ده ساله دارد، اما با کاربری پژوهش‌های مرتبط، به صورت مداوم تلاش می‌شود که دقت این روش‌ها افزایش و با در نظر گرفتن تأثیرات جغرافیایی خطای آنها کاهش یابد.

ساده‌ترین رویکرد در فرایند درون‌یابی، انتخاب نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد نظر و تطبیق ارتفاعات با توجه به آهنگ کاهش دمای مورد نظر است. اگر در اطراف منطقه مورد نظر بیش از یک ایستگاه وجود داشته باشد، روش درون‌یابی از ایستگاه‌های اطراف مورد توجه قرار می‌گیرد. در برخی مطالعات مانند بولستاد (۱۹۹۸)، ژیا (۲۰۰۱)، جارویس و استوارت (۲۰۰۱) از وایازش (رگرسیون) چندگانه استفاده شده است؛ یعنی متغیرهای مکانی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. در برخی مطالعات از درون‌یابی به روش اسپلاین نیز استفاده شده است (ژیا، ۲۰۰۱). البته روش‌های دیگر نیز به کار گرفته شده است؛ مانند روش وزن‌دهی بر اساس معکوس فاصله (دادسون و مارکس، ۱۹۹۷؛ شن، ۲۰۰۱)، روش پالایه گوسی (تورنتون، رانینگ و وایت، ۱۹۹۷) و نیز روش‌های آماری مانند کریجینگ (بولستاد، ۱۹۹۸، گارن و مارکس، ۲۰۰۵ و کورالت و مونستیز، ۱۹۹۹).

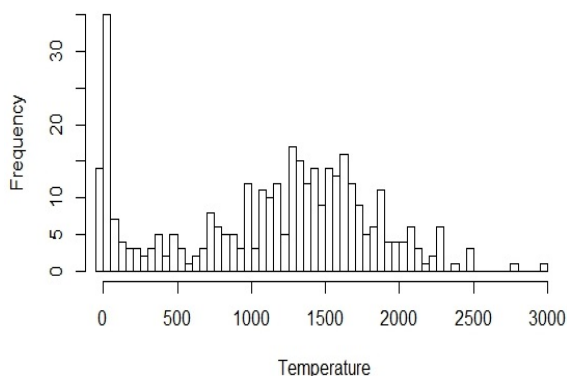
در همه مطالعات انجام شده، محدودیت‌های مختلفی به منظور انتخاب ایستگاه‌های مؤثر بر منطقه مورد نظر توجه قرار گرفته است؛ برای نمونه برخی مطالعات فاصله‌ای مشخص را به عنوان محدوده‌ای برای ایستگاه‌های مؤثر در نظر گرفته‌اند (شن، ۲۰۰۱) و در برخی ایستگاه‌های مؤثر بر اساس تعداد در نظر گرفته شده است (تورنتون، رانینگ و وایت، ۱۹۹۷).

و ارتفاع به عنوان دو متغیر اصلی وایازی (رگرسیون) به منظور درون‌یابی دمای روزانه در آمریکا برای سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۱ استفاده شده‌اند (دی لوزیو، ۲۰۰۸). همچنین در یک مطالعه دیگر از روش درون‌یابی PRISM برای تعیین پهنه‌بندی دمای بیشینه و کمینه ماهیانه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ در آمریکا استفاده شده است (دالی، ۲۰۰۸). شایان گفتن است که درون‌یابی مکانی دمای میانگین در کوتاه مدت (ماهیانه) نسبت به درون‌یابی دمای میانگین در بلند مدت (سالانه) دارای چالش بیشتری است. در این باره کیو در سال ۲۰۱۲ پهنه‌بندی دمای میانگین ماهیانه را در آمریکا برای سال ۲۰۰۷ با استفاده از ارتفاع درون‌یابی کرد (ژیائوپنگ و لیانگ، ۲۰۱۲).

تاکنون روش‌های مختلفی برای درون‌یابی داده‌های هواشناسی گسترش داده شده که از بین آنها در دهه‌های اخیر روش «کریجینگ» به عنوان روشی معمول مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. از برتری‌های این روش، دقت زیاد و خطای کم آن نسبت به روش‌های دیگر درون‌یابی است (لی، ژنگ و لو، ۲۰۰۵؛ مهدیان، ۲۰۰۹). وجه تمایز این روش نسبت به روش‌های آماری دیگر، ساختار آن است که با استفاده از وریوگرام، همبستگی مکانی را در نظر می‌گیرد (آلتو، ۲۰۱۳). اساس روش کریجینگ یک وزن‌دهی خطی است که با ساختار تغییرات مکانی تعیین می‌شود و انواع مختلف آن عبارتند از: روش کریجینگ عادی، روش کریجینگ ساده، روش کریجینگ عمومی (اسلوتر، ۲۰۰۸؛ هاتیس، آوگنوا هیمبلرگر و راتیک، ۲۰۱۲). در مجموع مطالعات مختلف عوامل متعدد مؤثر بر تغییرات دما مانند طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، سطح آب و موقعیت محلی منطقه را بررسی کرده‌اند که در بین آنها سه عامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع تأثیر ویژه‌ای داشته‌اند (چوآنیان، ژونگرن و گودانگ، ۲۰۰۵؛ سامانتا، ۲۰۱۲).

در مطالعات با توجه به مقیاس منطقه مورد بررسی، تغییرات مکانی فراسنج‌های هواشناسی با ویژگی‌های فیزیکی منطقه اصلاح شده است (دالی، ۲۰۰۶). در مقیاس‌های بزرگ، ارتفاع و در مقیاس‌های کوچک و میان مقیاس خصوصیات

وسعت کشور، ضرورت یافتن رابطه‌ای به منظور تخمین دما در مناطق بدون وجود ایستگاه اندازه‌گیری مشخص می‌شود.



شکل ۱. الف) موقعیت ایستگاه‌های همدید (سینوپتیک)؛ ب) فراوانی ایستگاه‌های همدید بر اساس ارتفاع

روند تغییر متغیرها

به منظور مشاهده نحوه تغییرات دما با سه متغیر ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی، وایزش خطی بین این متغیرها انجام شده است. جدول ۱، مقادیر ضریب همبستگی دمای بیشینه و کمینه با متغیرهای گفته شده را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر، مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی دمای کمینه با ارتفاع نسبت به دو متغیر دیگر بیشتر است. مقایسه بین دما و ارتفاع نشان می‌دهد که طبق انتظار با افزایش ارتفاع، دما کاهش می‌یابد و رابطه میان این دو کمیت معکوس است. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی میان ارتفاع با دمای کمینه بیشتر از دمای بیشینه است. همبستگی بیشتر ارتفاع با دمای کمینه در مطالعات دیگر نیز دیده شده است (هادسون و واکر ناچل، ۱۹۹۴، کورزمان و کادمون، ۱۹۹۹). همچنین مشاهده می‌شود که در برآورد دمای کمینه و بیشینه، عامل عرض جغرافیایی اثر بیشتری نسبت به طول جغرافیایی دارد، هرچند تأثیر طول جغرافیایی هم نسبتاً چشمگیر است.

الگوریتم‌های پیش‌بینی

آنچه در مباحث و روش‌های رایج آماری معمولاً با آن سر و کار داریم، تحلیل و نتیجه‌گیری بر مبنای داده‌هایی است که نسبت به جامعه خود «مستقل» محسوب می‌شوند؛ به بیان دیگر مشاهدات و داده‌ها بر حسب موقعیت قرار گرفتن شان در

علاوه بر این دو روش، در برخی مطالعات انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس هر دو محدودیت تعداد و فاصله هر ایستگاه نسبت به منطقه مورد نظر انجام می‌شود (برای مثال در نظر گرفتن شش ایستگاه موجود در محدوده یک کیلومتر مربع).

هدف از پژوهش حاضر آزمایش چند روش درون‌یابی مکانی برای برآورد دمای بیشینه و کمینه ماهانه، فصلی و سالانه روی منطقه ایران برای بازه زمانی ۹۴-۱۳۹۳ بوده است. شایان گفتن است با وجود توپوگرافی پیچیده منطقه و تغییرات نسبتاً گسترده متغیرهای هواشناسی در آن، برای نخستین بار در تاریخچه فعالیت‌های پژوهشی و علمی سازمان هواشناسی است که تأثیر توپوگرافی به صورت عینی در این پهنه‌بندی دمایی لحاظ شده است. در این مقاله نتایج مطالعه‌ای محدود و موردی برای پهنه‌بندی دمایی کشور و برآوردی از خطای آن ارائه می‌شود. در حقیقت در کلیه مطالعات پژوهشی و کاربردی که تاکنون انجام شده است یا اثر ناهموازی‌ها در نظر گرفته نشده یا برای موارد خاص، از نوعی تحلیل ذهنی استفاده شده است که آشکارا دارای خطای زیادی است و نتایج آن چه بسا گمراه‌کننده باشد. در مواردی نیز که از روش‌هایی مانند کریجینگ برای درون‌یابی استفاده شده، هرگز به مقدار خطای آن توجه نشده است.

مواد و روش‌ها

داده‌های مربوط به دمای بیشینه و کمینه (T_{min} و T_{max}) روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه ایران، از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است. تعداد ایستگاه‌های همدید (سینوپتیک) موجود در منطقه مورد نظر ۳۶۰ ایستگاه است که به صورت پراکنده توزیع شده‌اند. هیستوگرام تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌های موجود در منطقه در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود ایستگاه‌های همدید کشور عموماً در سطح زمین تا ۱۷۰۰ متر بالاتر قرار گرفته‌اند. با توجه به کوهستانی بودن مناطق شمالی و غربی و شرقی کشور و عدم وجود ایستگاه‌های سنجش در ارتفاعات ۲۰۰۰ متر و بیشتر و همچنین همبستگی نسبتاً زیاد دما به تغییرات ارتفاع و از طرفی تعداد محدود ایستگاه‌های موجود نسبت به

جدول ۱. همبستگی دمای بیشینه و کمینه با ارتفاع، طول و عرض

جغرافیایی

سالانه (%)	فصلی (%)	ماهانه (%)	نام عامل	
۱۲	۱۷	۶	طول جغرافیایی	دمای کمینه
۳۶	۳۷	۳۳	عرض جغرافیایی	
۶۵	۵۸	۶۶	ارتفاع	
۱۳	۱۴	۱۰	طول جغرافیایی	دمای بیشینه
۵۵	۴۸	۶۴	عرض جغرافیایی	
۴۴	۴۲	۴۵	ارتفاع	

جامعه پایه با هم وابستگی ندارند. این وضعیت در علوم مانند هواشناسی کاملاً متفاوت است و داده‌هایی که از نظر جغرافیایی به هم نزدیک‌تر هستند، با یکدیگر همبستگی بیشتری نیز دارند. در بررسی آماری چنین جوامعی باید به جای روش‌های ساده آماری سراغ روش‌هایی برویم که از آنها به عنوان «آمار فضایی» یاد می‌شود. امروزه شاخه‌های آمار فضایی و علم زمین‌آمار در تحلیل داده‌ها و دیدبانی‌های کلیه علوم محاسباتی مرتبط با شاره‌های ژئوفیزیکی (جو و اقیانوس) به طور گسترده و روز افزون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به پراکندگی جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی که موگد داده‌های هواشناسی محسوب می‌شوند، ضروری است با انجام محاسبات درون‌یابی مقادیر کمیت‌های هواشناسی را برای نقاط شبکه یا مناطقی که در آنها ایستگاهی نداریم، به بیان دیگر انجام فرایند درون‌یابی برای آگاهی از مقدار یک کمیت در یک نقطه خاص فاقد ایستگاه یا برای پهنه‌بندی منطقه بر اساس آن کمیت، اجتناب ناپذیر است. موضوع این پژوهش نیز پهنه‌بندی دمایی کشور است که ضرورتاً نیازمند درون‌یابی‌های فضایی داده‌های دمایی است که از ایستگاه‌های هواشناسی گزارش می‌شوند. به همین منظور در اینجا به اختصار کامل، ابتدا فرایند درون‌یابی را

تعریف می‌کنیم و سپس روش‌های درون‌یابی فضایی داده‌های دما را به طور نظری مرور خواهیم کرد.

به فرایندی که در آن برای نقاط فاقد داده با استفاده از نقاط مجاور و معلوم، داده یا مقدار کمی محاسبه می‌شود «درون‌یابی» گفته می‌شود. در عمل آنچه انجام این فرایند را ضرورت می‌بخشد، از یک سو محدودیت تعداد داده‌های نقطه‌ای (ایستگاهی) و از سوی دیگر ضرورت تهیه نقشه پهنه‌بندی شده به منظور تهیه نقشه‌های هم‌مقدار (مانند هم‌بارش، هم‌دما، هم‌فشار و...) است. برای نمونه می‌توان دمای مناطق فاقد ایستگاه اندازه‌گیری را به کمک دمای نقاط مجاور که مقدار دما در آنها اندازه‌گیری شده است، برآورد یا به بیانی درون‌یابی کرد. بنابراین می‌توان درون‌یابی را فرایندی تعریف کرد که به کمک آن داده‌های نقطه‌ای را به داده‌های پهنه‌ای تبدیل می‌کنیم (چنگ، ۲۰۰۴). روشن است که در انجام این فرایند، همه نقاط مجاور و معلوم به یک اندازه و همسان در تعیین مقدار برای نقطه نامعلوم سهم و مؤثر نیستند. به همین دلیل هر یک از نقاط مجاور به تناسب تأثیر و فاصله‌شان برای مقادری که به نقطه نامعلوم دارای وزنی خواهند بود. برای مثال اگر مجموع نقاط ایستگاهی در یک گستره کامل به شکل $\{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ باشند، برای تعیین مقدار دما در نقطه‌ای مانند q ، مقدار دما بر اساس ارزش یا سهم (وزن) نقاط اطراف و به شکل رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$T(q) = \sum_{i=1}^n w_i T(s_i) \quad (1)$$

که در آن w_i وزن‌های متناظر با هر یک از ایستگاه‌های s_i است. این روش به «درون‌یابی با استفاده از میانگین‌های وزنی» موسوم است (چنگ، ۲۰۰۴).

در این روش دو نکته را باید مورد توجه قرار داد. یکی چگونگی آرایش نقاطی گسسته یا پیوسته بودن داده‌ها نیز می‌توان فرایند درون‌یابی را بررسی کرد. کمیت‌های پیوسته مانند دما، فشار یا بارش، به دلیل پیوستگی قابل اندازه‌گیری در همه نقاط یک سطح نیستند. برای این گونه کمیت‌ها، برآورد مقدار متغیر پیوسته را در مناطق نمونه‌گیری نشده در داخل ناحیه‌ای که مشاهدات

روزانه، ماهانه و سالانه روی ایران به طور موردی به کار گرفته شده و نتایج روش‌ها با هم مقایسه شده است.

روش‌های درون‌یابی

در این بخش کلیات مربوط به روش‌های درون‌یابی ذکر شده را معرفی می‌کنیم. روشن است برای آگاهی بیشتر به کتاب‌ها و مقالات مرتبط می‌توان مطالعه نمود (بلیانی، ۱۳۹۳).

روش IDW

اساس این روش بر این است که تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. یعنی مقدار کمیت پیوسته در نقاط فاقد داده، به مقدار کمیت در نقاط دارای داده و نزدیک‌تر، بیشتر شبیه است. پس برای درون‌یابی به منظور تخمین مقدار کمیت در نقطه فاقد داده، برای نقاط معلوم نزدیک‌تر باید سهم بیشتری قائل شد. این کار را با دخالت دادن فاصله به عنوان وزن کمیت در نقاط معلوم انجام می‌دهیم. بنابراین هر چه فاصله مکانی داده معلوم از نقطه مجهول بیشتر باشد، وزن کمتری برای تأثیر آن نقطه معلوم در درون‌یابی در نظر می‌گیریم و به بیانی از معکوس فاصله به عنوان وزن نقاط دارای داده در تعیین مقدار برای نقاط فاقد داده استفاده می‌کنیم. دلیل نام‌گذاری این روش نیز همین است.

از سوی دیگر تأثیر مقدار (شدت) وابستگی مکانی داده‌ها به یکدیگر را می‌توان با در نظر گرفتن توان در معکوس فاصله اعمال کرد. برای نمونه در بسیاری از پژوهش‌ها از توان دوم معکوس فاصله استفاده شده است. در پژوهش حاضر نیز همین روش به کار رفته است.

برای انجام این روش ابتدا محدوده مکانی مورد نظر را تبدیل به شبکه‌ای منظم از ماتریس‌های هم‌بعد می‌کنیم. در برخی از یاخته‌های این شبکه مقدار کمیت معلوم است یعنی دارای داده است و در برخی دیگر باید آن را بیابیم. به این منظور دایره‌ای با شعاع مشخص به مرکز یاخته مجهول در نظر می‌گیریم و با استفاده از داده‌های معلومی که در این دایره قرار می‌گیرند، مقدار مجهول را مطابق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

نقطه‌ای پراکنده شده‌اند، درون‌یابی می‌گوییم و در واقع درون‌یابی، تغییرات فضایی متغیر پیوسته را نمایش می‌دهد.

درستی نتایج درون‌یابی به دقت مکانی، تعداد و توزیع نقاط معلوم و روش مورد استفاده بستگی دارد. بهترین نتایج هنگامی به دست می‌آیند که رفتار تابع ریاضی با رفتار پدیده مورد نظر مشابه باشد. برای نمونه تغییرات دما در یک منطقه هموار، ممکن است یکسان باشد. در نتیجه با یک میانگین‌گیری ساده، می‌توان درون‌یابی کرد و مقدار دما را در نقطه نامعلوم به دست آورد. اما اگر منطقه دارای تغییرات شدید ارتفاعی باشد، به رابطه یا روشی از درون‌یابی نیاز داریم که تغییرات ارتفاع را نیز در نظر بگیرد. این مسئله آشکارا در درون‌یابی مقدار کمیت‌های هواشناسی روی ایران دیده می‌شود، زیرا با توجه به کوهستانی بودن بخشی از آن در کنار دشت و کویری بودن بخش دیگر، عامل اختلاف ارتفاع در درون‌یابی بسیار اهمیت پیدا می‌کند؛ به ویژه که در بسیاری مناطق نیز پراکنندگی ایستگاه‌ها مناسب و کافی نیست یا اصلاً ایستگاهی نداریم.

مسئله دیگر که در حال حاضر موضوع این پژوهش نیست ولی دارای اهمیت است اینکه بسیاری از داده‌های پیوسته «جهت‌دار» هستند و تمرکز یا چگالی آنها یکسان نیست. برای نمونه توزیع عناصر آلاینده در شهرهای بزرگ نه تنها به فاصله از مراکز تولید آلودگی بستگی دارد بلکه به جهت وزش بادی نیز بستگی دارد زیرا آلودگی نیز در همان جهت پخش می‌شود. همان‌گونه که گفته شد این بحث فعلاً جدا از این پژوهش است زیرا دما کمیتی است نرده‌ای و مقدار آن به جهت اندازه‌گیری بستگی ندارد.

در این مطالعه چهار روش درون‌یابی معکوس فاصله^۱ (IDW)، کریجینگ معمولی^۲ (OD-Kriging)، کریجینگ جهانی^۳ (Uni-Kriging) و روش جی آی دی اس^۴ (GIDS) برای درون‌یابی کمیت‌های دمای بیشینه و کمینه

1. Inverse Distance Weighted (IDW)

2. Ordinary Kriging

3. Universal Kriging

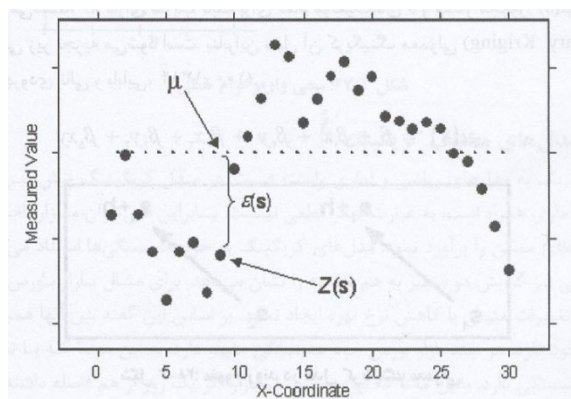
4. Gradient-plus-Inverse-Distancesquared (GIDS)

روش کریجینگ که به طور گسترده‌ای در شاخه‌های علوم زمین آمار استفاده می‌شود، به افتخار دی جی کریژ^۱ به این نام گذاشته شده است. این روش برای مواردی مناسب‌تر است که داده‌ها از روند موضعی تعریف شده‌ای پیروی کنند. در روش کریجینگ معمولی از معادله (۳) استفاده می‌شود:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (3)$$

که در آن $Z(s)$ متغیر مورد نظر و $\mu(s)$ ضریبی ثابت و مجهول و بیانگر روند کلی تغییرات است. $\varepsilon(s)$ نیز روند تصادفی یا خطای خودهمبستگی است. به منظور برآورد با استفاده از روش کریجینگ روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مطالعه دو روش کریجینگ معمولی و روش کریجینگ جهانی استفاده شده است که در ادامه توضیح مختصری از این دو روش آورده شده است.

در روش کریجینگ معمولی که در شکل ۳ نشان داده شده است، نیمرخ داده‌ها در برشی عرضی از یک دره و کوهستان مجاور آن آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات داده‌ها با ارتفاع در سمت چپ شکل بیشتر است و در سمت راست هموارتر به نظر می‌رسد و روند مشخص‌تری دارد. بنابراین مقدار میانگین ثابت μ با داده‌های سمت راست همخوانی بهتری دارد. به بیان دیگر انتظار داریم روش کریجینگ برای داده‌هایی که تغییرات آنها از یک روند محلی مشخص پیروی می‌کند، نتایج بهتری به همراه داشته باشد.

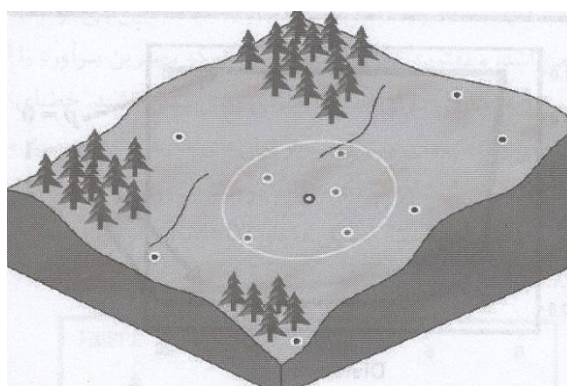


شکل ۳. تغییرات ارتفاع در سطح مقطع (برش عرضی) یک ناهمواری فرضی در روش کریجینگ معمولی (بلیانی، ۱۳۹۳).

$$Z(s_0) = \left(\sum_{i=1}^n Z_i / d_i^m \right) / \left(\sum_{i=1}^n 1 / d_i^m \right) \quad (2)$$

که در آن Z_i مقادیر معلوم و متناظر با نقطه i است و s_0 نقطه‌ای است که قصد داریم برای آن مقداری پیدا کنیم. d_i فاصله هر مکان تا نمونه است، N تعداد نقاط معلوم (دارای داده) است و m عامل توان است. هر چه عامل توان بزرگتر وزن برای نقاط دورتر سریع‌تر کاهش می‌یابد. هر چه فاصله کمتر باشد، تأثیر آن نقطه معلوم در محاسبه بیشتر می‌شود؛ چون نسبت معکوس دارند. در مطالعات عموماً مقدار m برابر با ۲ است. در این پژوهش نیز مقدار m برابر ۲ در نظر گرفته شده است. اگر توان صفر باشد، تأثیر فاصله از بین می‌رود و مقدار مجهول، میانگین نقاط مجاور خواهد شد. اگر توان افزایش یابد، تأثیر فاصله افزایش می‌یابد و به فواصل نزدیک‌تر وزن بیشتری تعلق می‌گیرد.

اندازه شعاع جست و جو به فاصله نقاط از یکدیگر و چگونگی تغییرات کمیت مورد نظر بستگی دارد. اگر آهنگ تغییرات مکانی کمیت نظم دقیقی نداشته باشد، به جای شعاع دایره مؤثر می‌توان از روش تعداد نقطه مجاور معلوم استفاده کرد. این روش نیز مشابه همان روش قبل است با این تفاوت که حداقل تعدادی از همسایه‌ها باید در درون‌یابی مشارکت داشته باشند. شکل زیر نمایی از مفهوم دایره مؤثر را نشان می‌دهد:



شکل ۲. نمایی از مفهوم شعاع جست و جو در درون‌یابی مقدار کمیت برای نقطه مجهول که در مرکز دایره است با استفاده از داده‌های نقاط معلوم که در اطراف آن و درون دایره قرار دارند (بلیانی، ۱۳۹۳).

روش کریجینگ

¹ D. J. Krige

این روش از ترکیب دو روش وایازش چند متغیره و روش معکوس فاصله به دست می‌آید (نالدر و وین، ۱۹۹۸). در این روش ابتدا وایازش چند متغیره روی ارتفاع و طول و عرض جغرافیایی انجام می‌شود (معادله ۴) و پس از مشخص شدن ضرایب (b_1 و b_3) با استفاده از معادله ۵، دمای نقاط موجود با ایستگاه‌های موجود در منطقه تطبیق داده می‌شود. در نهایت دماهای تطبیق داده شده با استفاده از روش معکوس فاصله درون‌یابی می‌شود.

$$\hat{T} = b_0 + b_1 Long + b_2 Lat + b_3 h \quad (4)$$

$$T_p = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)^2 \right]^{-1} \times \sum_{i=1}^n \left\{ [T_i + b_1(Long_p - Long_i) + b_2(Lat_p - Lat_i) + b_3(h_p - h_i)] \left(\frac{1}{d_i} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

با توجه به دمای بیشینه مشاهده می‌شود که بازه تغییرات خطای دو روش GIDS و IDW تقریباً مشابه و دو روش OD-Kriging و Uni-Kriging نیز مشابه هم هستند. همچنین مشاهده می‌شود که روش‌ها در تخمین ایستگاه‌های مرتفع‌تر، کارایی بهتری نسبت به ایستگاه‌های نزدیک سطح دریا دارند. برای نمونه بازه تغییرات خطای دو روش GIDS و IDW برای ایستگاه‌های تا ارتفاع ۱۰۰۰ متری، در محدوده ۴٫۸ تا ۰٫۵ و برای دو روش OD-Kriging و Uni-Kriging در همین ارتفاع در محدوده ۱۰٫۲ تا ۱٫۷ است. مقدار خطا در ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متر برای دو روش GIDS و IDW به حدود ۳٫۷ تا ۰٫۶ و برای دو روش OD-Kriging و Uni-Kriging به ۶٫۷ تا ۱٫۸ کاهش می‌یابد.

با مقایسه دمای بیشینه و کمینه مشاهده می‌شود که سه روش GIDS، OD-Kriging و Uni-Kriging در تخمین دمای کمینه عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به دمای بیشینه دارند. همچنین روند تغییرات مقدار خطا با ارتفاع در سه روش GIDS، OD-Kriging و Uni-Kriging مشابه دمای بیشینه است و مدل‌ها در تخمین دمای ایستگاه‌های مرتفع‌تر، خطای کمتری دارند.

تغییرات خطای روش GIDS برای ایستگاه‌های تا ارتفاع ۱۰۰۰ متری، بین ۱٫۴ تا ۳٫۴ و برای دو روش OD-Kriging و Uni-Kriging در همین ارتفاع بین ۱٫۶ تا ۶٫۶ است. مقدار خطا در ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متر برای روش GIDS به

در روش کریجینگ عمومی که ترکیبی از روش کریجینگ با روند محلی است، بر خلاف روش کریجینگ معمولی تغییرات میانگین در ناحیه متغیر است و میانگین تابعی از طول و عرض جغرافیایی نقاط می‌باشد.

درون‌یابی با استفاده از دو روش کریجینگ معمولی و عمومی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار R انجام شده است.

روش GIDS

در رابطه بالا شاخص‌های p و i به ترتیب نمایشگر مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها هستند. همچنین d_i فاصله هر نقطه با ایستگاه دارای اندازه‌گیری است. در پژوهش انجام شده که برای درون‌یابی یا پهنه‌بندی دماهای کمینه و بیشینه (روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه) با در نظر گرفتن ناهم‌واری‌ها روی ایران انجام شده است، از همین چهار روشی که معرفی شد استفاده شده است که چند نمونه از نتایج آن در بخش بعد آورده می‌شود. همچنین به منظور بررسی دقت هر یک از روش‌ها، خطای هر روش نیز محاسبه شده است.

یافته‌های پژوهش

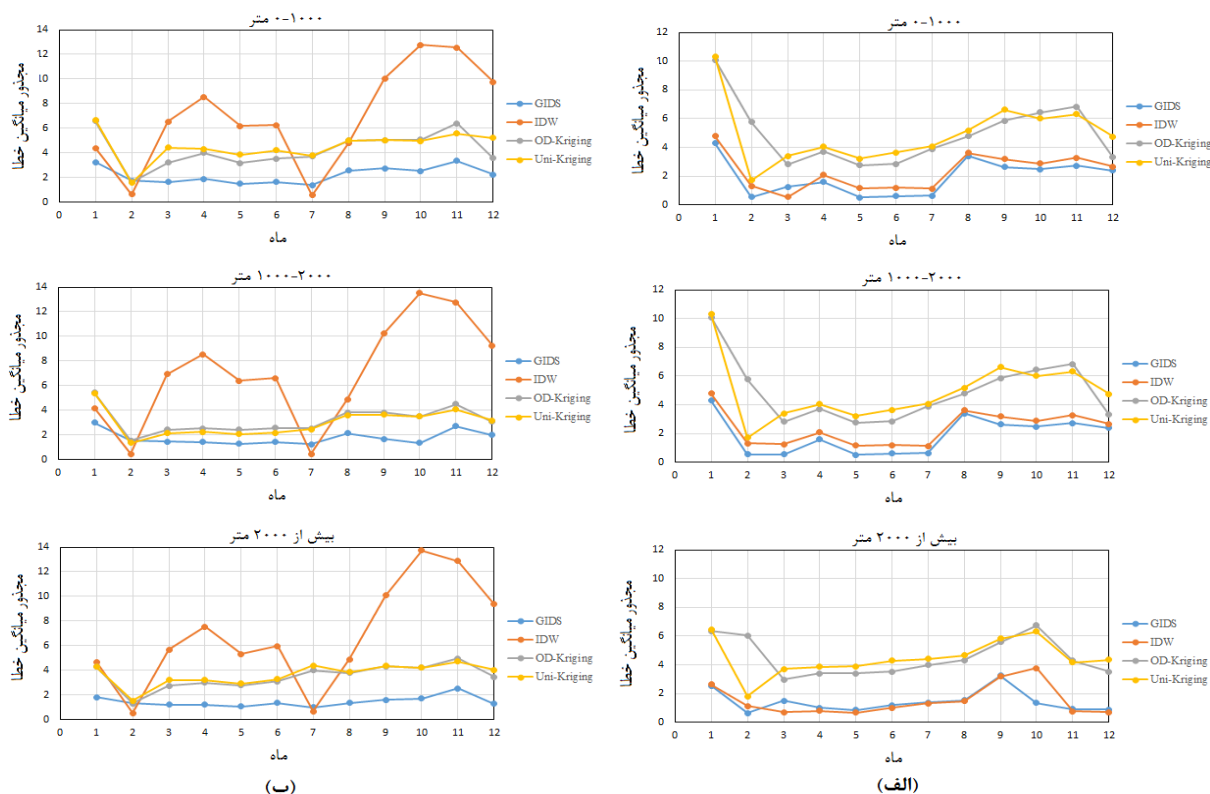
به منظور صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده، پس از تخمین دمای بیشینه و کمینه روی شبکه‌ای با گام شبکه یک کیلومتر روی ایران، با استفاده از روش‌های معرفی شده، هر یک از ایستگاه‌های هم‌دید که در آن اندازه‌گیری دما معلوم است، در هر مرحله از شبکه خارج و با استفاده از روش درون‌یابی دوخطی^۱، دمای ایستگاه خارج شده تخمین زده می‌شود. شکل ۴ میزان خطای صحت‌سنجی روش‌ها را در ماه‌های مختلف در سه بازه ارتفاعی برای دمای بیشینه و کمینه در قالب ریشه میانگین مربعات خطا^۲ نشان می‌دهد.

¹ Bilinear Interpolation

² Root Mean Square Error (RMSE)

دیگر روش‌ها و به ویژه برای دمای کمینه دارد. همچنین مشاهده می‌شود که عملکرد روش **IDW** با افزایش ارتفاع در تخمین دما کاهش می‌یابد.

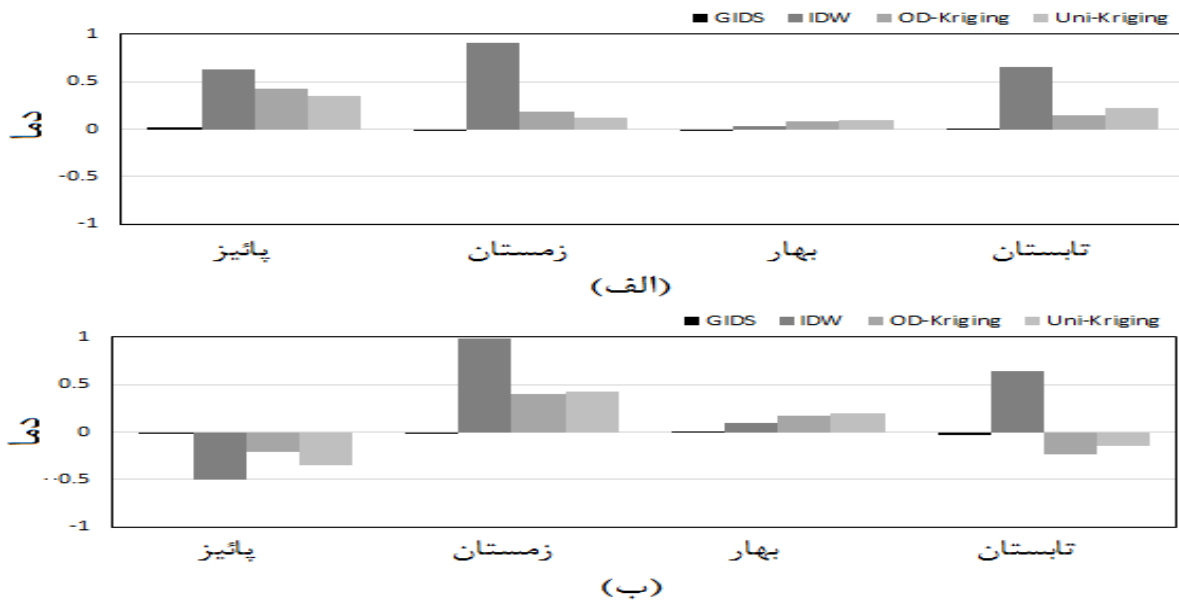
۱,۰ تا ۲,۵ و برای دو روش **OD-Kriging** و **Uni-Kriging** به **۱,۳ تا ۴,۹** کاهش می‌یابد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که روش **IDW** خطای قابل ملاحظه‌ای نسبت به



شکل ۴. مجذور میانگین خطای چهار روش برای (الف) دمای بیشینه (ب) دمای کمینه در بازه ارتفاعی ۰ تا ۱۰۰۰ متر، ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر و بیش از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا

صحت‌سنجی روش‌های **GIDS**، **IDW**، **OD-Kriging** و **Uni-Kriging** را برای دو دمای بیشینه و کمینه در چهار فصل پائیز، زمستان، بهار و تابستان را نشان می‌دهد:

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت سه روش **GIDS**، **OD-Kriging** و **Kriging** در تخمین دمای کمینه عملکرد بهتری دارد و با افزایش ارتفاع که همراه با کاهش دما است، تخمین صحیح‌تری از دما داشته‌ند. شکل ۵ مقدار خطای

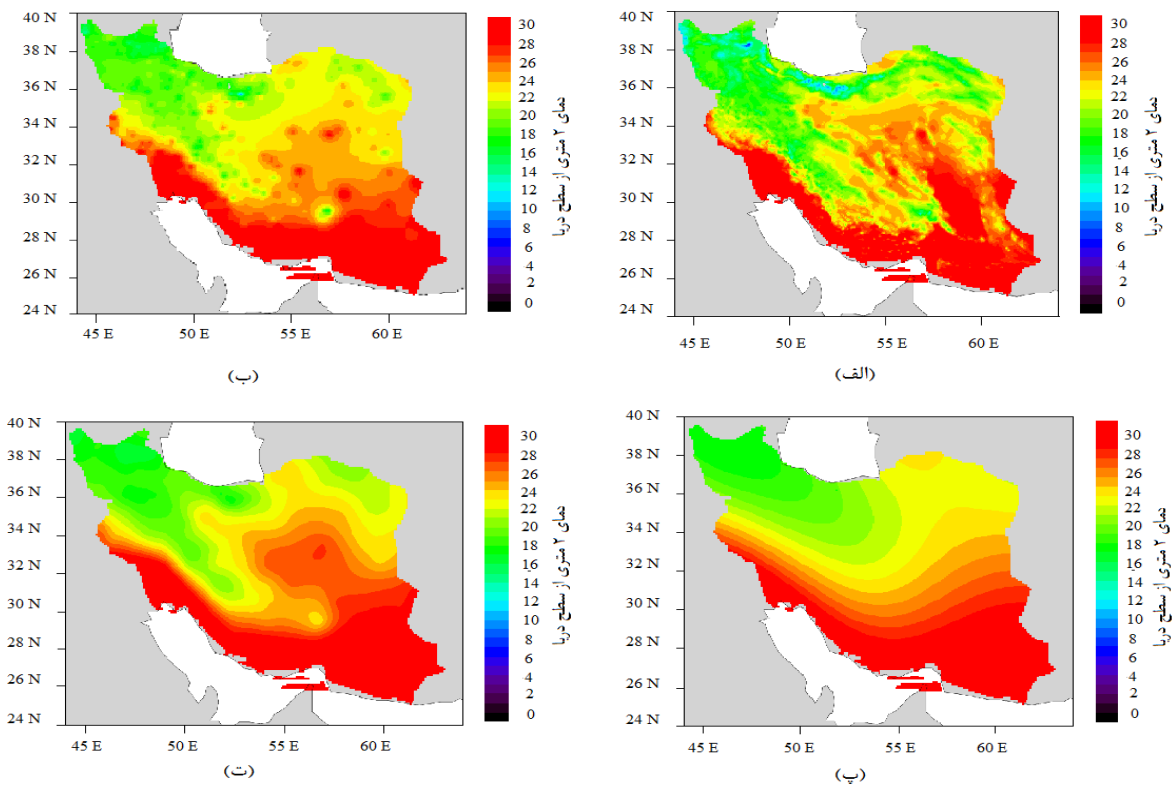


شکل ۵. میزان خطای چهار روش در چهار فصل (الف) دمای بیشینه (ب) دمای کمینه

پهنه‌بندی میانگین سالانه دمای بیشینه و کمینه توسط چهار روش نیز در شکل ۶ آورده شده است:

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که روش GIDS کمترین مقدار خطا و روش IDW بیشترین مقدار خطا را در تخمین دمای بیشینه و کمینه داشته‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که هر چهار روش در فصل بهار کمترین خطا را داشته‌اند.

(۱) دمای بیشینه

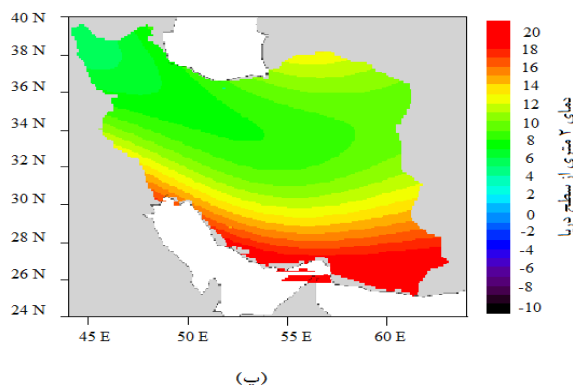
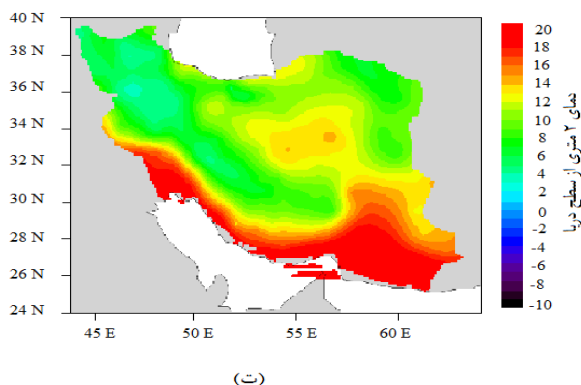
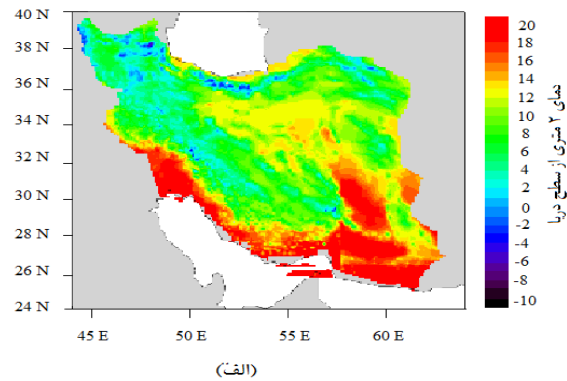
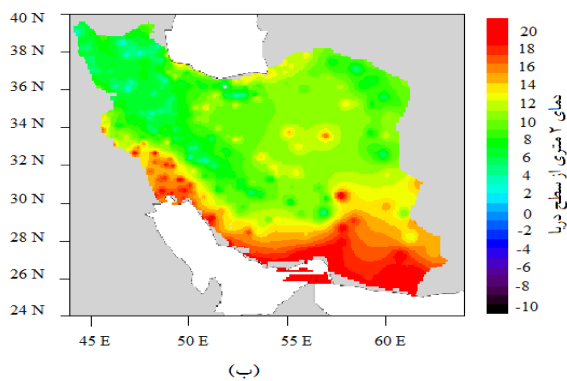


شکل ۶- الف. پهنه‌بندی میانگین دمای بیشینه سالانه مربوط به چهار روش (الف) GIDS، (ب) IDW، (پ) OD-Kriging و (ت) Uni-Kriging

ترتیب در بازه (۱۴-۲۴) و (۴-۱۲) درجه سلسیوس تغییر می‌کند. با توجه به تصاویر مشاهده می‌شود که روش GIDS نسبت به مدل‌های دیگر روند تغییرات دما را بهتر نمایش می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات دما در سطح کشور در هر چهار روش تقریباً مشابه هستند. دمای بیشینه و کمینه در مناطق جنوبی کشور به ترتیب در بازه (۲۶-۳۰) و (۲۰-۱۶) درجه سلسیوس و در مناطق شمالی و شمال‌غربی به

دمای کمینه



شکل ۶- ب. پهنه‌بندی میانگین دمای کمینه سالانه مربوط به چهار روش (الف) GIDS، (ب) IDW، (پ) OD-Kriging و (ت) Uni-Kriging

منابع

- ۱- بلیانی، ی.؛ حکیم‌دوست، س.؛ (۱۳۹۳). اصول و مبانی پردازش داده‌های مکانی (فضایی) با استفاده از روش‌های تحلیل فضایی، چاپ اول. انتشارات آزاده‌پیمان، تهران.
- 2- Aalto, J.; Pirinen, P.; Heikkinen, J.; Venelainen, A. (2013). Spatial Interpolation of Monthly Climate Data for Finland: Comparing the Performance of Kriging and Generalized Additive Models, *Theoretical and Applied Climatology*, 112(1-2): 99-111.
- 3- Belyani, Y.; Hakimdoost, S. (2014). An Introduction to Data Processing Using Spatial Analysis Techniques, 1st ed., Azadehpeyma Co., Tehran, (In Persian).
- 4- Bolstad, P.V.; Swift, L.; Collins, F.; Regniere, J. (1998). Measured and Predicted Air Temperatures at Basin to Regional Scales in the Southern Appalachian Mountains, *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3-4): 161-176.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه چهار روش GIDS، IDW، OD-Kriging و Uni-Kriging برای درون‌یابی دمای ایستگاه‌های هم‌دید به شبکه منظمی روی کشور ایران استفاده شده است. این روش‌ها در محاسبه میانگین وزنی با هم متفاوت هستند. دو روش Kriging با استفاده از کمینه‌سازی مقدار واریانس خطا و دو روش GIDS و IDW با استفاده از مجذور کردن عکس فاصله، دما را درون‌یابی می‌کنند. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که هر چهار روش توانایی نسبتاً خوبی در درون‌یابی دما روی منطقه داشته‌اند، با این حال روش GIDS نسبت به سه روش دیگر کمترین خطا را داشته است.

- 17- Hattis, D.; Ogneva-Himmelberger, Y.; Ratick, S. (2012). The Spatial Variability of Heat-Related Mortality in Massachusetts, *Applied Geography*, 33: 45-52.
- 18- Hock, R. (2003). Temperature Index Melt Modelling in Mountain Areas, *Journal of Hydrology*, 282: 104-115.
- 19- Hudson, G.; Wackernagel, H. (1994). Mapping Temperature Using Kriging with External Drift: Theory and an Example from Scotland, *International Journal of Climatology*, 14(1): 77-91.
- 20- Holdaway, M.R. (1996). Spatial Modeling and Interpolation of Monthly Temperature Using Kriging, *Climate Research*, 6(3): 215-225.
- 21- Jarvis, C.H.; Stuart, N. (2001). A Comparison among Strategies for Interpolating Maximum and Minimum Daily Air Temperatures; Part II: The Interaction Between Number of Guiding Variables and the Type of Interpolation Method, *Journal of Applied Meteorology*, 40(6): 1075-1084.
- 22- Kurzman, D.; Kadmon, R. (1999). Mapping of Temperature Variables in Israel: a Comparison of Different Interpolation Method, *Climate Research*, 13: 33-43.
- 23- Li, S.; Xie, Y.; Brown, D.G.; Bai, Y.; Hua, J.; Judd, K. (2013). Spatial Variability of the Adaptation of Grassland Vegetation to Climatic Change in Inner Mongolia of China, *Applied Geography*, 43: 1-12.
- 24- Li, X.; Cheng, G.; Lu, L. (2005). Spatial Analysis of Air Temperature in the Qinghai-Tibet Plateau, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 37(2): 246-252.
- 25- Liston, G.E.; Elder, K. (2006). A Meteorological Distribution System for High-Resolution Terrestrial Modeling (MicroMet), *Journal of Hydrometeorology*, 7(2): 217-234.
- 26- Mahdian, M.H.; Rahimi Bandarabady, S.; Sokouti, R.; Norouzi Banis, Y. (2009). Appraisal of the Geostatistical Methods to Estimate Monthly and Annual Temperature, *Journal of Applied Sciences*, 9(1): 128-134.
- 27- Nalder, I.A.; Wein, R.W. (1998). Spatial Interpolation of Climatic Normals: Test of a New Method in the Canadian Boreal Forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(4): 211-225.
- 28- Powell, J.A. (2008). Ghost Forests, Global Warming and the Mountain Pine Beetle, *American Entomologist*.
- 29- Rolland, C. (2003). Spatial and Seasonal Variations of Air Temperature Lapse Rates in Alpine Regions, *Journal of Climate*, 16(7): 1032-1046.
- 5- Cheng, K.T. (2004). *Introduction to Geographic Information System*, McGraw Hill, NY.
- 6- Choi, J.; Chung, U.; Yun, J.I. (2003). Urban-Effect Correction to Improve Accuracy of Spatially Interpolated Temperature Estimates in Korea, *Journal of Applied Meteorology*, 42(12): 1711-1719.
- 7- Chuanyan, Z.; Zhongren, N.; Guodong, C. (2005). Methods for Modelling of Temporal and Spatial Distribution of Air Temperature at Landscape Scale in the Southern Qilian Mountains (China), *Ecological Modelling*, 189 (1): 209-220.
- 8- Chung, U.; Yun, J.I. (2004). Solar Irradiance-Corrected Spatial Interpolation of Hourly Temperature in Complex Terrain, *Agricultural and Forest Meteorology*, 126(1): 129-139.
- 9- Courault, D.; Monestiez, P. (1999). Spatial Interpolation of Air Temperature According to Atmospheric Circulation Patterns in Southeast France, *International Journal of Climatology*, 19(4): 365-378.
- 10- Daly, C.; Gibson, W.P.; Taylor, G.H.; Johnson, G.L.; Pasteris, P. (2002). A Knowledge-based Approach to the Statistical Mapping of Climate, *Climate Research*, 22(2): 99-113.
- 11- Daly, C. (2006). Guidelines for Assessing the Suitability of Spatial Climate Data Sets, *International Journal of Climatology*, 26(6): 707-721.
- 12- Daly, C.; Halbleib, M.; Smith, J.I.; Gibson, W.P.; Doggett, M.K.; Taylor, G.H.; Curtis, J.; Pasteris, P. (2008). Physiographically Sensitive Mapping of Climatological Temperature and Precipitation across the Conterminous United States, *International Journal of Climatology*, 28(15): 2031-2064.
- 13- Di Luzio, M.; Johnson, G.L.; Daly, C.; Eischeid, J.K. (2008). Constructing Retrospective Gridded Daily Precipitation and Temperature Datasets for the Conterminous United States, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(2): 475-497.
- 14- Dodson, R.; Marks, D. (1997). Daily Air Temperature Interpolated at High Spatial Resolution over a Large Mountainous Region, *Climate Research*, 8(1): 1-20.
- 15- Garen, D.C.; Marks, D. (2005). Spatially Distributed Energy Balance Snowmelt Modelling in a Mountainous River Basin, Estimation of Meteorological Inputs and Verification of Model Results, *Journal of Hydrology*, 315(1): 126-153.
- 16- Hasenauer, H.; Merganicova, K.; Petritsch, R. (2003). Validating Daily Climate Interpolations over Complex Terrain in Austria, *Agricultural and Forest Meteorology*, 119(1): 87-107.

- Complex Terrain, *Journal of Hydrology*, 190(3): 214-251.
- 35- Trisurat, Y.; Shrestha, R.P.; Kjelgren, R. (2011). Plant Species Vulnerability to Climate Change in Peninsular Thailand, *Applied Geography*, 31(3): 1106-1114.
- 36- Willmott, C.J.; Matsuura, K. (1995). Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States, *Journal of Applied Meteorology*, 34(12): 2577-2586.
- 37- Xia, Y.; Fabian, P.; Winterhalter, M.; Zhao, M. (2001). Forest Climatology: Estimation and Use of Daily Climatological Data for Bavaria, Germany, *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2): 87-103.
- 38- Xiaopeng, Q.; Liang, W.; Barker, L.; Lekiachvili, A.; Xingyou, Z. (2012). Comparison of ArcGIS and SAS Geostatistical Analyst to Estimate Population-Weighted Monthly Temperature for US Counties, *Journal of Resources and Ecology*, 3(3): 220-229.
- 30- Samanta, S.; Pal, D.K.; Lohar, D.; Pal, B. (2012). Interpolation of Climate Variables and Temperature Modeling, *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1-2): 35-45.
- 31- Shen, S.S.P.; Dzikowski, P.; Li, G.; Griffith, D. (2001). Interpolation of 1961-97 Daily Temperature and Precipitation Data onto Alberta Polygons of Ecodistrict and Soil landscapes of Canada, *Journal of Applied Meteorology*, 40(12): 2162-2177.
- 32- Sluiter, R. (2008). Interpolation Methods for Climate Data: Literature Review, De Bilt, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI).
- 33- Stahl, K.; Moore, R.D.; Floyer, J.A.; Asplin, M.G.; McKendry, I.G. (2006). Comparison of Approaches for Spatial Interpolation of Daily Air Temperature in a Large Region with Complex Topography and Highly Variable Station Density, *Agricultural and Forest Meteorology*, 139: 224-236.
- 34- Thornton, P.E.; Running, S.W.; White, M.A. (1997). Generating Surfaces of Daily Meteorological Variables over Large Regions of