

مدلسازی توپو-اقلیم‌شناسی و پهنه‌بندی شاخص‌های آماری یخبندان‌های استان کردستان

ابراهیم مسگری^۱

تقی طاوسی^۲

پیمان محمودی^۳

چکیده

یخبندان یکی از پدیده‌های مهم مورد مطالعه در اقلیم‌شناسی است که وقوع ناگهانی آن در ابتدا و انتهای فصل سرما، می‌تواند بسیار خطرناک برای بخش کشاورزی باشد. لذا برای مدل‌سازی و پهنه‌بندی شاخص‌های آماری یخبندان‌ها در استان کردستان، داده‌های مربوط به دمای حداقل روزانه ۶ ایستگاه همدید برای یک دوره ۱۶ ساله (۲۰۱۶ - ۲۰۰۱) از سازمان هواشناسی ایران اخذ گردیدند. در ادامه با استفاده از مدل‌های رگرسیونی چند متغییره رابطه بین پنج شاخص آماری یخبندان‌ها یعنی متوسط تاریخ آغاز یخبندان، متوسط تاریخ خاتمه یخبندان، متوسط تعداد سالانه روزهای یخبندان، متوسط طول فصل یخبندان و متوسط طول فصل رشد با سه عامل ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی مدل‌سازی گردید. در ادامه بر اساس مدل‌های رگرسیونی به دست آمده برای هر شاخص، نقشه‌های پهنه‌بندی آنها برای استان کردستان تهیه شدند.

۱- دانشجوی دکتری دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۲- استاد دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان (نویسنده مسئول)

Email: t.tavousi@gep.usb.ac.ir-Tel: 09133085106

۳- استادیار دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

نتایج حاصل از مدلسازی رگرسیونی بین شاخص‌های مختلف یخبندان با سه عامل ارتفاع، عرض و طول جغرافیایی در استان کردستان نشان داد که این سه عامل به ترتیب می‌توانند ۹۵، ۹۰، ۸۸، ۸۰ و ۷۲ درصد تغییرات مربوط به طول دوره رشد، وقوع اولین روز یخبندان، طول دوره یخبندان، فراوانی وقوع روزهای یخبندان و وقوع آخرین روز یخبندان را تبیین کنند. آرایش فضایی شاخص‌های مختلف یخبندان در استان کردستان نیز نشان از یک آرایش غربی به شرقی در مقادیر شاخص‌های مختلف یخبندان دارد. یعنی هر چه از جانب غرب به سمت شرق حرکت می‌کنیم تعداد فراوانی روزهای یخبندان و همچنین طول دوره یخبندان کاهش پیدا می‌کند و متعاقب آن فصل رشد افزایش پیدا می‌کند. متناسب با این تغییرات وقوع اولین روز و آخرین روز یخبندان نیز با تاخیرهای زیادی در بین نیمه شرقی و غربی این استان قابل مشاهده است.

واژگان کلیدی: یخبندان، رگرسیون چندمتغیره، استان کردستان، پهنه بندی، مدل سازی

مقدمه

یخبندان یکی از پدیده‌های مهم مورد مطالعه در اقلیم‌شناسی است که از تغییر دما در طول زمان ناشی می‌شود. وقوع ناگهانی این پدیده در ابتدا و انتهای فصل سرما، می‌تواند بسیار خطرناک برای بخش کشاورزی باشد. بنابراین از دیرباز اطلاع از این تاریخ‌ها مورد توجه بسیاری از محققین بخش هواشناسی و اقلیم‌شناسی بوده است (تام و شاو، ۱۹۵۸: ۲۵۱؛ روزنبرگ و مایرز، ۱۹۶۲: ۴۷۱؛ اشمیدلین، ۱۹۸۶: ۱۴۲؛ ویلن، ۱۹۸۸: ۶۰۷؛ واتکینز، ۱۹۹۱: ۸۸۹). برای مدیریت کاهش اثرات این پدیده مخرب اقلیمی بر بخش کشاورزی و بهره‌مندی اندیشمندان از توان‌های محیطی یک منطقه وسیع، توجه جدی به مطالعه دقیق این پدیده و ویژگی‌های آن در همه سطح زمین لازم به نظر می‌رسد و این امر قاعدتاً مستلزم هزینه‌گزار و صرف وقت طولانی خواهد بود. لذا جهت پرهیز از این دو و در عین حال در راستای رسیدن به اهداف مدیریتی، پهنه بندی و شناخت دقیق تجانس و عدم تجانس بین نواحی مختلف در یک منطقه بزرگ ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعات اقلیم‌شناسی برای پهنه بندی شاخص‌های مختلف متغیرهای اقلیمی به ناچار اقلیم‌شناس با مکان‌هایی سروکار دارد که دیده بانی‌های مستقیم در آنجاها انجام نمی‌گیرد، بنابراین جهت رفع این

مشکل در مکان‌هایی که فاقد ایستگاه هستند از روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده می‌شود. درون‌یابی شاخص‌های آماری یخبندان‌ها، به دلیل وابستگی که این ویژگی‌ها به عوامل مختلفی همچون ارتفاع زمین (بوئر و همکاران، ۱۹۹۳: ۱۷۳۱)، وضعیت توپوگرافی (لیندکوئیست و همکاران، ۲۰۰۰: ۵۱)، طول و عرض جغرافیایی (مدلین و بلتراند، ۲۰۰۵، ۵۱)، دوری و نزدیکی به دریاها (زینونی و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۰۹۱)، وضعیت خاک (آویسار و ماهرر، ۱۹۸۸ الف: ۴۰۰ و ب: ۴۱۴؛ فیگورولا و ماتزو، ۱۹۹۷: ۲۲۹)، پوشش گیاهی (آویسار و ماهرر، الف: ۴۰۰ و ب: ۴۱۴)، ابرناکی و باد (لاگلین، ۱۹۸۲: ۱۴۱؛ لاگلین و کالما، ۱۹۸۷: ۱؛ لاگلین و کالما، ۱۹۹۰، ۴۱) دارد، در مقایسه با دیگر متغیرها، مقداری مشکل‌تر به نظر می‌رسد. لذا با کمی کردن روابط بین این ویژگی‌ها و برخی عوامل زمین-اقلیم می‌توان نقشه‌های دقیق‌تری از شاخص‌های آماری یخبندان تهیه نمود. نقشه‌های پهنه‌بندی یخبندان معمولاً با استفاده از بررسی‌های توپو-اقلیم‌شناسی صورت می‌گیرد (گایگر، ۱۹۶۶؛ هوگ ۱۹۶۶: ۲۹۰ و ۱۹۶۸؛ لوماس و گات، ۱۹۷۱؛ سوزوکی و همکاران، ۱۹۸۲: ۸۱۳؛ ریچاردز، ۲۰۰۰؛ جارویس و استوارت، ۲۰۰۰ الف: ۱۰۶۰، ب: ۲۰۰۰؛ زینونی و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۰۹۱؛ ریچاردز و بومگارتن، ۲۰۰۳؛ محمودی، ۲۰۱۴: ۱۷۵)، هرچند از اواخر دهه ۱۹۶۰، دمانگاری با استفاده از تصاویر مادون قرمز به دست آمده از سنجنده‌های ماهواره‌ای در مطالعات توپو-اقلیم‌شناسی نیز معمول شده است (نیکسون و هالز، ۱۹۷۵: ۴۹۸؛ ساترلند و بارتولیچ، ۱۹۷۴: ۶۵؛ ساترلند و همکاران، ۱۹۸۱: ۸۱۳). کاربرد این روش را برای اولین بار در بررسی دماهای شبانه در باغات تشریح نموده‌اند. از آن زمان به بعد با قابلیت دسترسی بیشتر به این نوع تصاویر، مطالعه دماهای شبانه سطح زمین بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است (چن و همکاران، ۱۹۸۲: ۹۹۲؛ دالزیوس و لآوری دیادو، ۱۹۹۵: ۱۲۳؛ کردیلس و همکاران، ۱۹۹۶: ۱۵۷؛ یورگنس، ۱۹۹۷: ۳۵۸۳؛ فرانسویس و همکاران، ۱۹۹۹: ۱۱۳).

در ایران نیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برخی شاخص‌های آماری یخبندان‌ها همچون اولین یخبندان زودرس پاییزه، آخرین یخبندان دیررس بهاره، طول فصل رشد، فراوانی یخبندان و ... در مقیاس‌های خرد و کلان پهنه‌بندی شده است. به طوریکه اطلس احتمال وقوع دماهای حداقل استان فارس توسط ضیایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ تهیه گردیده است. مجرد قره باغ (۱۳۷۶) بر اساس تئوری تقاطع ویژگی‌های آماری یخبندان-

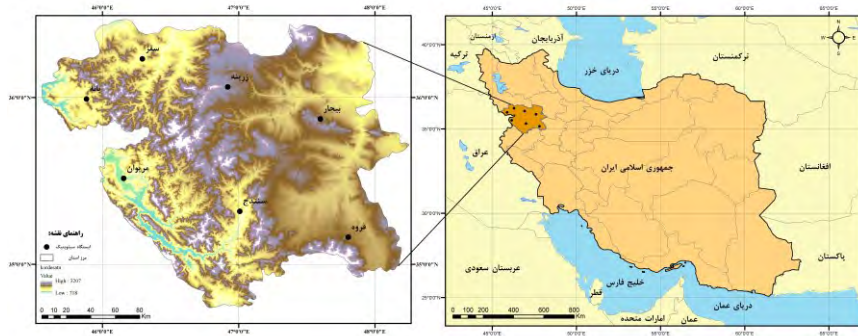
های آذربایجان را به صورت نظام وار مورد مطالعه قرار داد. خسروی و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی اقدام به پهنه بندی خطر سرمازدگی بر روی محصولات باغی در شهرستان مه ولات در استان خراسان رضوی نمودند. آنها با همپوشانی نقشه‌های وقوع مکانی - زمانی آخرین سرمازدگی‌های دیررس بهاره و نقشه‌های گونه-های غالب باغی، سه منطقه پرخطر، خطر و کم خطر را در این شهرستان شناسایی نمودند. تداوم‌های دو، سه و چهار روزه یخبندان‌های ایران نیز توسط علیجانی و همکاران (۱۳۸۹) برای ۵۸ ایستگاه سینوپتیک در سطح ایران استخراج و وابستگی روزهای یخبندان به یکدیگر توسط مدل زنجیره مارکوف مدل بندی گردید و در نهایت نقشه‌های پهنه بندی روزهای تداوم یخبندان برای کل ایران تهیه شد. محمودی و همکاران (۱۳۹۴) نیز ۵ شاخص آماری یخبندان ها یعنی: متوسط تاریخ آغاز یخبندان، متوسط تاریخ خاتمه یخبندان، متوسط طول فصل یخبندان، متوسط فراوانی تعداد روزهای یخبندان و متوسط طول فصل رشد را برای ۶۲ ایستگاه سینوپتیک در سطح ایران استخراج و سپس با استفاده از تحلیل خوشه ای، ایران را به ۶ پهنه متمایز دسته بندی و نقشه‌های آن را تهیه نمودند علیجانی و همکاران (۱۳۹۵) با هدف استخراج فراوانی روزهای ذوب-انجماد، توزیع زمانی و مکانی این ویژگی از یخبندان را در مقیاس‌های سالانه و ماهانه در ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در مقیاس سالانه حداکثر فراوانی روزهای ذوب-انجماد با بیش از ۷۰ روز در غرب و شمال غرب ایران مشاهده شده و در مقیاس ماهانه نیز ماه ژانویه دارای بیشترین فراوانی روزهای ذوب-انجماد بوده است. علیجانی و همکاران (۱۳۹۲) با توجه به افزایش رو به رشدی که در دقت و صحت پیش بینی‌های کوتاه مدت مشاهده می شود رهیافتی جدید جهت تعیین طول دوره رشد بالقوه در ایران ارائه کرده و در پژوهش خود به استخراج سه شاخص: طول دوره رشد، طول دوره رشد بالقوه و طول دوره مدیریت ریسک اقدام نمودند. دارائی و همکاران (۱۳۹۷) در راستای استخراج تاریخ وقوع اولین و آخرین یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره در سطوح احتمالاتی مختلف برای ۴۴ ایستگاه همدید از توزیع‌های احتمالاتی مختلفی بهره بردند. آنها پس از برازش توزیع‌های احتمالاتی مختلف بر روی سری‌های زمانی تاریخ وقوع اولین و آخرین یخبندان‌های ۴۴ ایستگاه مورد مطالعه و با استفاده از آزمون نکوئی برازش آندرسن-دارلینگ، بهترین توزیع احتمالاتی را

برای این ایستگاه‌ها توزیع احتمالاتی وییکی دانستند. سپس آنها بر اساس این توزیع احتمالاتی نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی شاخص‌های آماری یخبندان‌های ایران را تهیه کردند. علاوه بر این، لشکری و کیخسروی (۱۳۹۶) روند تغییرات دمایی و پهنه‌بندی آغاز و پایان یخبندان‌های شهر تهران و بشیریان و همکاران (۱۳۹۶) نیز تجزیه و تحلیل آماری یخبندان‌های کشاورزی شهر کاشان را مورد توجه قرار داده‌اند.

استان کردستان به دلیل واقع شدن در منطقه کوهستانی ایران و برخورداری از اقلیم سرد، در غالب سال‌ها شاهد وقوع یخبندان‌های شدید و وارد آمدن خسارت‌های سنگین بر محصولات زراعی است که نتیجه آن رنج و سختی بیشتر بر روی معیشت و زندگی مردم استان است. لذا با توجه به اتکای اقتصاد استان به کشاورزی و ضرورت خودکفائی کشور در این بخش، لزوم مطالعات دقیق روی این پدیده و پیش‌بینی آن به منظور یاری‌دادن مدیران و محققان بخش‌های مختلف مطالعاتی و اجرائی در جهت تحقق اهداف برنامه‌ریزی، بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین اولین قدم در جهت مدیریت صحیح این پدیده و کاهش اثرات آن در استان، شناسائی و پهنه‌بندی یخبندان به عنوان یک مخاطره اقلیمی با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌باشد و همچنین اولین قدم در جهت مدیریت آن که اولین مرحله از مراحل چهارگانه مدیریت بحران یعنی مرحله شناسائی مخاطرات نیز می‌باشد برداشته می‌شود. لذا با توجه به ادبیات تحقیقاتی این موضوع که در بالا به بسیاری از آنها نیز اشاره شد مشاهده گردید که بیشتر پهنه‌بندی‌های انجام شده به خصوص پهنه‌بندی‌هایی که در ایران انجام شده است متکی بر درون‌یابی شاخص‌های مختلف یخبندان‌ها در یک مقیاس ایستگاهی بوده است و کمتر به مدلسازی‌های توپو-اقلیم‌شناسی و پهنه‌بندی خروجی‌های حاصل از آنها توجه شده است. بنابراین با توجه به این خلاء مطالعاتی، در این مطالعه قصد بر این است که در یک مطالعه جامع ابتدا شاخص‌های آماری یخبندان‌های ایستگاه‌های موجود در استان کردستان استخراج و سپس با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره با سه عامل ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی مدلسازی شوند و در نهایت خروجی حاصل از این مدل‌سازی در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی در اختیار محققین قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

برای مدل بندی و پهنه بندی شاخص‌های آماری یخبندان ها در استان کردستان، داده‌های مربوط به دمای حداقل روزانه یک دوره ۱۶ ساله (۲۰۱۶ - ۲۰۰۱) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. مشخصات جغرافیایی و طول دوره آماری هر کدام از ایستگاه‌ها در جدول شماره ۱ و پراکنش ایستگاه‌ها در سطح استان نیز در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱) نقشه موقعیت و پراکنندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	عرض	طول	ارتفاع	تاریخ
بیجار	۳۵° ۵۳'	۴۷° ۳۷'	۱۸۸۳/۴	۱۹۸۷-۲۰۱۶
مریوان	۳۵° ۳۱'	۴۶° ۱۲'	۱۲۶۸/۸	۱۹۸۷-۲۰۱۶
سقز	۳۶° ۱۵'	۴۶° ۱۶'	۱۵۲۲/۸	۱۹۸۷-۲۰۱۶
زرینه	۳۶° ۰۴'	۴۶° ۵۵'	۲۱۴۲/۶	۱۹۸۷-۲۰۱۶
سنندج	۳۵° ۲۳'	۴۷° ۰۰'	۱۳۲۳	۱۹۸۷-۲۰۱۶
قروه	۳۵° ۱۷'	۴۷° ۴۸'	۱۹۰۶	۱۹۸۷-۲۰۱۶
پانه	۳۶° ۰۰'	۴۵° ۵۴'	۱۶۰۰	۱۹۸۷-۲۰۱۶

بعد از اخذ داده‌ها و تشکیل بانک اطلاعاتی آن، مشاهده گردید که در برخی از ایستگاه‌های استان در ماه اکتبر (ماه مهر) اولین یخبندان‌ها شروع می‌شوند، به همین علت تاریخ اول اکتبر (۹ مهر) به عنوان تاریخ مبنا انتخاب و مابقی روزها به ترتیب، نسبت به این مبدأ

شمارش شدند، برای مثال اگر در یک ایستگاه اولین دمای صفر درجه سانتی‌گراد در روز ۶۳ رخ داده باشد با توجه به مبنای ما که روز اول اکتبر (۹ مهر) است معادل با ۲ دسامبر (۱۱ آذر) خواهد بود و به همین ترتیب اگر آخرین دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد در روز ۲۰۲ رخ داده باشد برابر ۲۰ آوریل (۳۱ فروردین) است. بعد از تنظیم داده‌ها بر اساس روز ژولینوسی، پنج شاخص یخبندان‌ها شامل: متوسط روز آغاز یخبندان، متوسط روز خاتمه یخبندان، متوسط تعداد سالانه روزهای یخبندان، متوسط طول فصل یخبندان و متوسط طول فصل رشد برای هر ایستگاه به صورت جداگانه مستخرج گردیدند. تعریف دقیق هر کدام از پنج شاخص مورد مطالعه به تفکیک آمده است: **رخداد اولین تاریخ یخبندان:** عبارت است از تاریخ رخداد اولین یخبندان در پاییز در آستانه حرارتی صفر درجه سانتی‌گراد. **رخداد آخرین تاریخ یخبندان:** عبارت از تاریخ رخداد آخرین یخبندان در بهار در آستانه حرارتی صفر درجه سانتی‌گراد. **طول فصل رشد:** عبارت است از فاصله زمانی بین پایان یخبندان در بهار و آغاز یخبندان در پاییز در آستانه صفر درجه سانتی‌گراد. **فراوانی روزهای یخبندان:** عبارت از مجموع روزهایی که در آنها دمای حداقل روزانه معادل صفر یا پایین‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد است. **طول دوره یخبندان:** عبارت است از فاصله زمانی بین آخرین روز غیر یخبندان در پاییز یا اوایل زمستان و اولین روز غیر یخبندان در اواخر زمستان یا اوایل بهار.

در گام دوم، پنج شاخص آماری یخبندان‌های ایستگاه‌ها که در مرحله اول مستخرج شده بودند به طور جداگانه با سه عامل زمین-اقلیم یعنی ارتفاع، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها با استفاده از مدل‌های رگرسیونی چند متغیره مدلسازی گردیدند. مدل‌های رگرسیونی مدل‌هایی هستند که جهت مطالعه روابط بین متغیرها به ویژه نحوه وابستگی یک متغیر با متغیرهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل‌های آماری فرض بر این است که رابطه بین متغیرهای مستقل (ارتفاع، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی) و متغیرهای وابسته (پنج شاخص آماری یخبندان) به صورت معادله (۱) است:

$$y = b_0 + b_1(x_1) + b_2(x_2) + \dots + b_p(x_p) \quad (1)$$

که در این معادله پارامترهای b_1, b_2, \dots, b_p ، ضرایب رگرسیون جزئی و b_0 مقدار عرض از مبدا است که مقدار ثابت رگرسیون نیز نامیده می‌شود. روشی هم که برای ورود متغیرها به مدل انتخاب شده است روش همزمان^۱ ورود متغیرهاست. در این روش کلیه متغیرهای جمع‌آوری شده، بدون هیچگونه تقدم و تأخیری به طور همزمان وارد مدل شده و مدل محاسبه می‌گردد. برای اندازه‌گیری دقت مدل‌های بدست آمده نیز چهار فرض بنیادی مورد بررسی قرار گرفت. این چهار فرض عبارتند از (محمودی و علیجانی، ۱۳۹۲: ۹۹-۹۸):

۱- فرض وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، ۲- فرض نرمال بودن خطاها، ۳- فرض ثابت بودن واریانس خطاها، ۴- فرض ناهمبسته بودن خطاها

در مرحله سوم برای تهیه نقشه‌های پهنه بندی شاخص‌های آماری یخبندان‌های استان کردستان نیاز به یک مدل رقومی ارتفاع با مقیاس مناسب بود. برای تهیه این مدل رقومی ارتفاع از داده‌های مربوط به ماموریت توپوگرافی رادار شاتل^۲ که به صورت مخفف (SRTM) خوانده می‌شود استفاده شد. این مدل رقومی ارتفاعی جهانی که تقریباً دارای یک پوشش جهانی از ۵۶ درجه جنوبی تا ۶۰ درجه شمالی است و با استفاده از تکنیک تداخل سنجی رادار دهانه ترکیبی^۳ (InSAR) تهیه شده است، نتیجه یک کار مشترک بین سازمان ملی علوم فضایی و هوانوردی ایالات متحده آمریکا^۴ (NASA)، آژانس ملی نقشه برداری و تهیه نقشه ایالات متحده آمریکا^۵ (NIMA)، آژانس فضایی آلمان^۶ (DLR) و آژانس فضایی ایتالیا^۷ (ASI) است. این مدل رقومی ارتفاعی بصورت قطعات یک در یک درجه ذخیره و از پایگاه <http://dds.cr.usgs.gov/srtm> می‌تواند به صورت رایگان برگرفته شود. نام هر فایل

¹. Enter method

². The Shuttle Radar Topography Mission

³. synthetic aperture radar interferometry

⁴. National Aeronautics and Space Administration

⁵. National Imagery and Mapping Agency

⁶. German Space Agency

⁷. Italian Space Agency

در این پایگاه بر اساس گوشه جنوب غربی هر فایل تعیین شده است یعنی n45e006 فایلی است که پوششی از ۴۵ درجه شمالی و ۶ درجه شرقی تا ۴۶ درجه شمالی و ۷ درجه شرقی را در بر می‌گیرد. دقت هر سلول یک آرک ثانیه (حدود ۳۰ متر) است ولی این دقت فقط برای ایالات متحده در دسترس قرار می‌گیرد و برای بقیه جهان به صورت دو آرک ثانیه (حدود ۹۰ متر) ارائه شده است (باملر، ۱۹۹۹). با توجه به توضیحات بالا، نقشه‌های مورد نیاز برای چهارچوب جغرافیایی استان کردستان از بانک اطلاعاتی این نقشه‌ها به آدرس اینترنتی که در بالا بدان اشاره شده است اخذ شد. این نقشه‌ها به صورت زیپ شده بوده و شمار آنها برای کل استان کردستان به ۱۲ عدد رسید که در محیط نرم افزاری Global Mapper تمامی آنها باز و پوشش کاملی از استان فراهم شد (جدول ۲). در این محیط نرم افزاری فواصل خطوط منحنی میزان ۱۰۰ متری برای استان تعریف و به صورت Shape file ذخیره و سپس برای ادامه کار به محیط نرم افزاری Arc/GIS انتقال داده شدند (شکل ۲).

در مرحله بعد تمامی خطوط منحنی میزانی که در محدوده سیاسی استان بودند به نقطه تبدیل شدند. دلیل تبدیل خطوط منحنی میزان به نقطه در این نکته نهفته بود که نمی‌توان معادلات رگرسیونی به دست آمده را بر روی خطوط منحنی میزان اعمال نمود. لذا بایستی خطوط منحنی میزان به نقطه تبدیل شوند تا هر نقطه دارای سه ویژگی ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی گردند که بتوان نتیجه معادلات را به این نقاط اختصاص داد. بنابراین با استفاده از مدل‌های رگرسیونی بدست آمده می‌توان برای تمام نقاط استان شاخص‌های آماری یخبندان‌ها را محاسبه و به نقاط فاقد ایستگاه تعمیم داد. در نهایت با استفاده از روش کریجینگ هر کدام از پنج شاخص یخبندان‌های استان کردستان پهنه بندی گردید.

جدول (۲) - مشخصات نقشه‌های SRTM برای محدوده استان کردستان

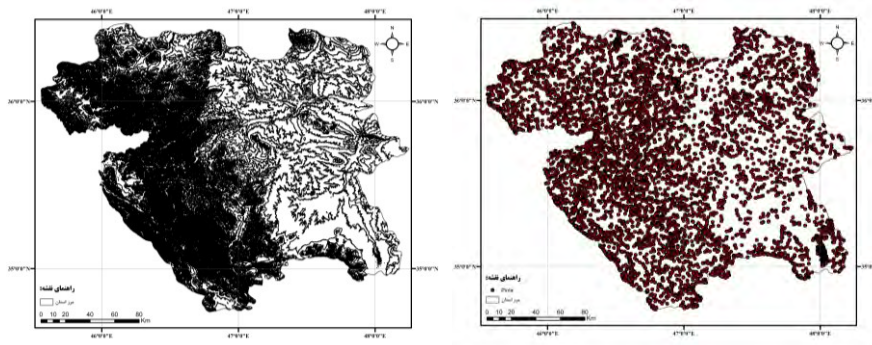
SRTM_u03_n034e045.tif	SRTM_u03_n034e046.tif
SRTM_u03_n034e047.tif	SRTM_u03_n034e048.tif
SRTM_u03_n035e045.tif	SRTM_u03_n035e046.tif
SRTM_u03_n035e047.tif	SRTM_u03_n035e048.tif

SRTM_u03_n036e045.tif

SRTM_u03_n036e046.tif

SRTM_u03_n036e047.tif

SRTM_u03_n036e048.tif



شکل (۲): نقشه توپوگرافی استان کردستان با خطوط منحنی میزان ۱۰۰ متر (سمت چپ) و نقشه تبدیل خطوط منحنی میزان به نقشه نقطه ای (سمت راست)

نتایج و بحث

متوسط تاریخ وقوع اولین روز یخبندان

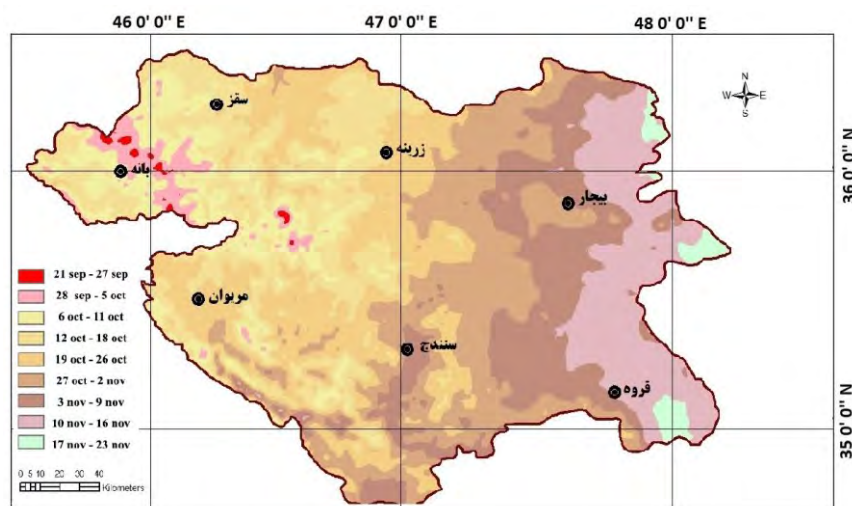
با وارد نمودن همزمان سه متغیر ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی به مدل رگرسیونی مشاهده گردید که میزان ضریب همبستگی این سه متغیر با تاریخ وقوع اولین روز یخبندان در استان کردستان ۰/۹۵ و ضریب تبیین آن ۰/۹۰ است یعنی حدود ۹۰ درصد تغییرات مکانی این ویژگی یخبندان در استان کردستان توسط این سه متغیر می‌تواند تبیین شود (جدول ۳).

خطی بودن رابطه بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته نیز با استفاده از آماره F آزمون شد و مشخص گردید که F محاسباتی (۶/۱۰۶) بزرگتر از F جدول (۵/۴۶۲) بوده و در نتیجه فرض خطی بودن رابطه بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته در این مدل تأیید می‌شود. ناهمبسته بودن خطاها نیز توسط شاخص دوربین- واتسون مورد آزمون قرار گرفت. مقدار

این شاخص برای مدل وقوع اولین روز یخبندان ۱/۴۲۹ است و چون تقریباً نزدیک به حد فاصل ۱/۵ تا ۲/۵ قرار می‌گیرد، پس ناهمبسته بودن خطاها نیز تأیید می‌گردد (جدول ۳). نرمال بودن خطاها هم با استفاده از نمودار P-P Plot (شکل ۸) آزمون شد. در این نمودار چون مختصات نقاط مشاهده شده در حول و حوش خط نرمال قرار گرفته اند پس می‌توان گفت که مانده ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. اما ثابت بودن واریانس خطاها توسط نموداری که محور افقی آن مقادیر استاندارد شده پیش بینی و محور عمودی آن مقادیر استاندارد شده باقیمانده هاست آزمون می‌شود. بر اساس شکل ۸ مشاهده می‌شود که روند خاصی در این نمودار مشاهده نمی‌شود پس ثابت بودن واریانس خطاها نیز تأیید می‌شود. پس با توجه به نتایج آزمون فرضیات می‌توان مدل رگرسیونی سه متغیره میانگین تاریخ اولین روز یخبندان با سه عامل ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی را به صورت معادله (۲) ارایه داد:

$$\text{FirstFrost} = 560.266 + (16.416 \times \text{longitude}) + (-4.076 \times \text{latitude}) + (-0.021 \times \text{elevation}) \quad (2)$$

در ادامه با استفاده از مدل به دست آمده در بالا، نقشه پهنه بندی میانگین اولین روز یخبندان برای استان کردستان بدست آمد (شکل ۳). بر اساس این نقشه مشاهده می‌شود که زودترین وقوع اولین روز یخبندان در استان کردستان در حد فاصل ۲۱ سپتامبر (۳۰ شهریور) تا ۲۷ اکتبر (۵ مهر) و در ارتفاعات شمال غرب استان به خصوص ارتفاعات چهل چشمه روی می‌دهد. دیرترین وقوع اولین روز یخبندان نیز در نواحی پست شرق استان و در حد فاصل ۱۷ اکتبر (۲۶ آبان) تا ۲۳ نوامبر (۲ آذر) اتفاق می‌افتد (شکل ۳).



شکل (۳) نقشه پهنه بندی میانگین وقوع اولین روز یخبندان در استان کردستان

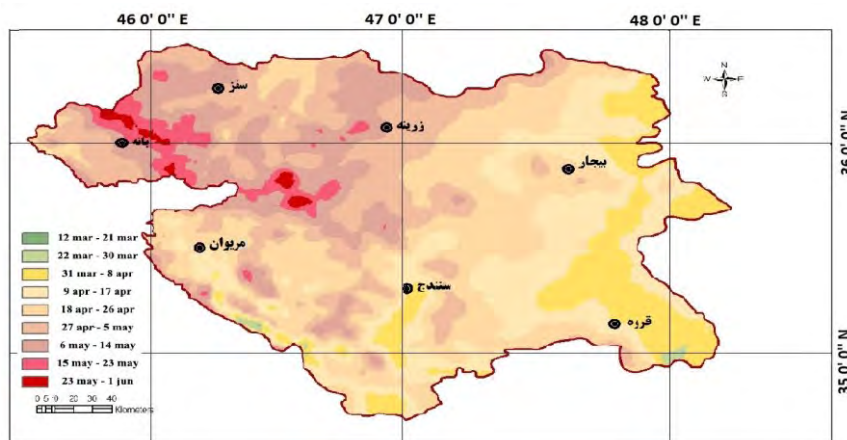
متوسط تاریخ وقوع آخرین روز یخبندان

میزان ضریب همبستگی این ویژگی از یخبندان با سه عامل مورد مطالعه $0/854$ با ضریب تبیین $0/730$ است بنابراین می‌توان حدود ۷۳ درصد تغییرات مکانی این ویژگی یخبندان را با این مدل سه متغیره تبیین کرد (جدول ۳). از میان چهار فرض مورد نظر جهت صحت دقت مدل سه فرض ناهمبسته بودن خطاهای مدل، نرمال بودن باقیمانده‌ها و ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها به طور نسبی دقت مدل را تایید می‌کنند. مقدار F محاسباتی ($7/800$) نیز که حاکی از وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته است بیشتر از F جدول ($5/462$) است بنابراین وجود رابطه خطی بین متغیرها تایید می‌گردد. مقدار شاخص دوربین- واتسون نیز $1/240$ است (جدول ۳). نمودار P-P Plot هم نرمال بودن باقیمانده‌ها را اطراف خط نرمال نشان می‌دهد (شکل ۸) در نهایت نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده نیز هیچ روند خاصی را نشان نمی‌دهد (شکل ۸).

بنابراین با توجه به نتایج آزمون فرضیات، مدل رگرسیونی تاریخ وقوع آخرین روز یخبندان با سه متغیر طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع به صورت معادله (۳) خواهد بود.

$$\text{Frost Late} = 320.49 + (-12.298 \times \text{longitude}) + (11.242 \times \text{latitude}) + (0.032 \times \text{elevation}) \quad (3)$$

براساس مدل بدست آمده برای این ویژگی یخبندان، نقشه پهنه بندی وقوع آخرین روز یخبندان برای استان کردستان تهیه شد (شکل ۴). براساس این نقشه مشاهده می‌شود که زودترین وقوع آخرین یخبندان در استان کردستان در حد فاصل ۲۲ مارس (۲ فروردین) تا ۳۰ مارس (۱۰ فروردین) در نواحی پست جنوب شرق و جنوب غربی استان و دیرترین آن در حد فاصل ۲۴ مه (۳ خرداد) تا ۱ ژوئن (۱۱ خرداد) در نوک قله مرتفع غرب و شمال غرب استان همچون ارتفاعات چهل چشمه با ارتفاعی در حدود ۳۱۷۳ متر، کوه کترش با ارتفاع ۲۵۹۲ متر و کوه وازنه با ارتفاع ۲۶۹۷ متر رخ می‌دهد.



شکل (۴) نقشه پهنه بندی میانگین وقوع آخرین روز یخبندان در استان کردستان

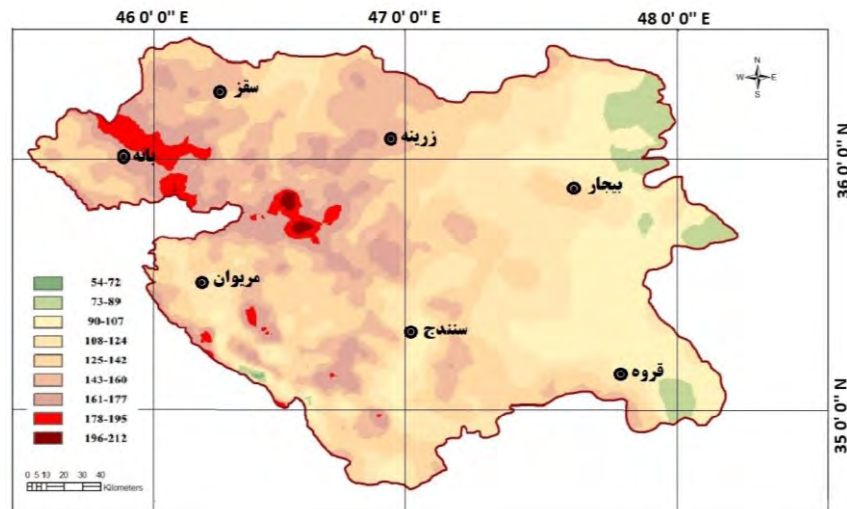
میانگین فراوانی تعداد روزهای یخبندان

فراوانی تعداد روزهای یخبندان سومین شاخصی بود که برای کل استان کردستان استخراج گردید. سه عامل طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع با ضریب تبیین ۰/۹۵۲ (ضریب همبستگی ۰/۹۷۶) نزدیک به ۹۵ درصد تغییرات مکانی این ویژگی از یخبندان را توجیه می‌کند. نتایج آزمون فرضیات نشان می‌دهد که F محاسباتی (۱۳/۳۰۱) جهت آزمون خطی بودن رابطه متغیرها بسیار بیشتر از F جدول است. لذا فرضیه خطی بودن این مدل تصدیق می‌شود. شاخص دوربین-واتسون نیز (۰/۹۸۸) چون در حد فاصل ۱/۵ تا ۲/۵ قرار نگرفته است پس ناهمبسته بودن خطای مدل هم تایید نمی‌شود (جدول ۳). نرمال بودن خطاها نیز در شکل ۸ تایید می‌گردد. در این نمودار مشاهده می‌شود که تمامی نقاط حول خط نرمال تجمع یافته‌اند. فرضیه ثابت بودن واریانس خطاها نیز که از طریق نمودار پراکنش مقادیر استاندارد شده پیش بینی علیه مقادیر باقیمانده‌های استاندارد شده آزمون می‌شود نشان از خطی بودن مدل و فرض ثابت بودن واریانس خطاها می‌باشد. بنابراین نشانه‌هایی از غیر عادی بودن وجود ندارد (شکل ۸). لذا این فرض هم مورد پذیرش قرار می‌گیرد.

با توجه به نتایج جمیع فرضیات تایید شده، مدل رگرسیونی فراوانی تعداد روزهای یخبندان با عوامل زمین-اقلیم به صورت معادله (۴) ارائه می‌شود:

$$\text{freqfrost} = 1639.25 + (0.294 \times \text{longitude}) + (-35.77 \times \text{latitude}) + (0.077 \times \text{elevation}) \quad (4)$$

اکنون با استفاده از مدل رگرسیونی بدست آمده، می‌توان این ویژگی از یخبندان را برای استان کردستان پهنه بندی نمود. با توجه به نقشه پهنه بندی فراوانی وقوع یخبندان مشاهده می‌شود که بیشترین فراوانی متعلق به ارتفاعات منطقه با بیش از ۱۹۶ روز و کمترین فراوانی را کرانه‌های شرقی استان با کمتر از ۷۲ روز تجربه کرده‌اند (شکل ۵).



شکل (۵) نقشه پهنه بندی فراوانی وقوع یخبندان در استان کردستان

میانگین طول دوره یخبندان

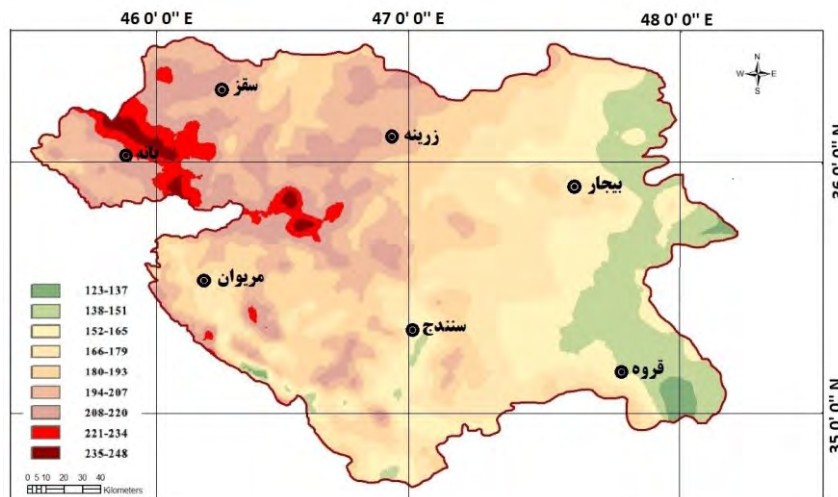
با وارد کردن همزمان متغیرهای مورد مطالعه به مدل رگرسیونی مشاهده گردید که میزان ضریب همبستگی این مدل $0/941$ با ضریب تبیین $0/886$ است بنابراین می توان حدود ۸۸ درصد تغییرات مکانی این ویژگی از یخبندان را با این مدل سه متغیره تبیین کرد (جدول ۳).

انجام چهار آزمون مورد نظر جهت صحت دقت مدل در برآورد مکانی طول دوره یخبندان به ترتیب نشان از غیر خطی بودن رابطه، ناهمبسته بودن خطاهای مدل، نرمال بودن باقیمانده ها و ثابت بودن واریانس باقیمانده ها دارد. به طوریکه مقدار F محاسباتی ($5/201$) کمتر از F جدول ($5/462$) است و مقدار شاخص دوربین-واتسون نیز $1/558$ است (جدول ۳). نمودار P-P Plot هم نرمال بودن باقیمانده ها را اطراف خط نرمال نشان می دهد (شکل ۸). و در نهایت نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی

شده نیز هیچ روند خاصی را نشان نمی دهد (شکل ۸). بنابراین با توجه به نتایج آزمون فرضیات و براساس جدول ضرایب مدل (جدول ۳)، مدل رگرسیونی میانگین طول دوره یخبندان با سه متغیر طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع به شکل معادله (۵) خواهد بود.

$$\text{longfrost} = 924.34 + (12.292 \times \text{longitude}) + (-26.847 \times \text{latitude}) + (0.039 \times \text{elevation}) \quad (5)$$

با توجه به نقشه (شکل ۶) مشاهده می شود در ارتفاعات شمال غرب استان با ۲۳۵ تا ۲۴۸ روز بیشترین و شرق و جنوب شرق استان نیز دارای کمترین طول فصل یخبندان را با ۱۲۳ تا ۱۳۷ روز دارا می باشند.



شکل (۶) نقشه پهنه بندی میانگین طول دوره یخبندان در استان کردستان

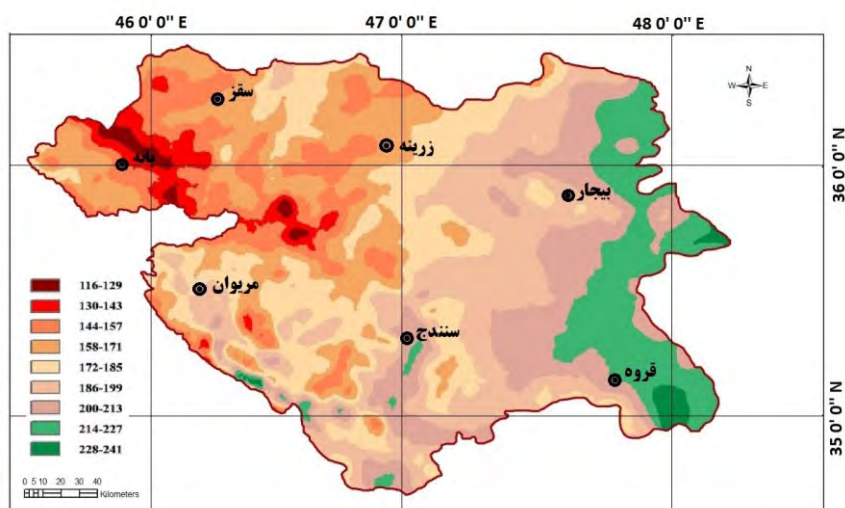
متوسط طول فصل رشد

طول فصل رشد به عنوان یکی از ویژگی‌های آماری یخبندان اهمیت زیادی دارد؛ چرا که عمده انرژی مورد نیاز برای رشد گیاه که از عوامل تعیین نوع کشت است در این دوره تامین می‌شود. ضریب همبستگی و ضریب تبیین این مدل به ترتیب ۰/۸۹۵ و ۰/۸۰۱ هستند. بنابراین ۸۰ درصد تغییرات این شاخص یخبندان با این مدل تبیین می‌شود. آزمون فرضیات چهارگانه مدل نشان می‌دهد که آماره F محاسباتی (۱۲/۶۸۴) بیشتر از آماره F جدول (۵/۴۶۲) است لذا خطی بودن این رابطه مورد تایید قرار می‌گیرد. شاخص دوربین-واتسون هم با مقدار ۱/۲۹۲ ناهمبسته بودن خطاهای این مدل را تایید می‌کند (جدول ۳). شکل ۸ نیز نرمال بودن خطاها را با توجه به قرارگیری نقاط حول خط نرمال تایید می‌کند. نمودار پراکنش باقیمانده‌های مدل فصل تابستان (شکل ۸) روند خاصی را نشان نمی‌دهد لذا آخرین فرضیه یعنی ثابت بودن واریانس خطاها هم تایید می‌گردد. پس از تایید تمامی فرضیات مطرح شده می‌توان مدل رگرسیونی چند متغیره بین متوسط طول فصل رشد و سه عامل انتخاب شده را به صورت معادله (۶) ارایه داد:

(۶)

$$Grow = -517.26 + (28.723 \times longitude) + (-15.32 \times latitude) + (-0.053 \times elevation)$$

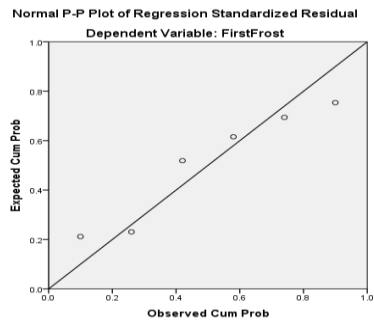
نقشه بدست آمده برای طول فصل رشد در استان کردستان نشان می‌دهد که طولانی‌ترین فصل رشد متعلق به نوار شرقی استان می‌باشد (شکل ۷). طول مدت فصل رشد در این قسمت از استان به طور میانگین بین ۲۱۴ تا ۲۲۷ روز است. هر چند در درون این قسمت، بخش‌های کوچکی که از لحاظ ارتفاعی پست تر از دیگر نقاط هستند، طول دوره رشد طولانی تری هم دارند. اما کوتاه‌ترین طول دوره رشد در این استان نیز متعلق به ارتفاعات غرب و شمال غرب استان است که به طور میانگین ۱۱۶ تا ۱۲۹ روز است.



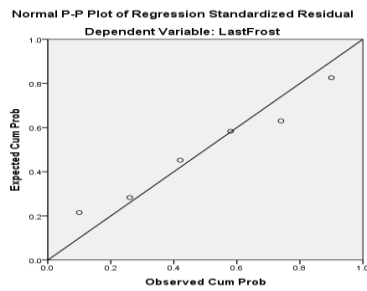
شکل (۷) نقشه پهنه بندی میانگین طول دوره رشد در استان کردستان

جدول (۳) خلاصه آماره‌های مدل رگرسیونی ویژگی‌های آماری یخبندان در استان کردستان

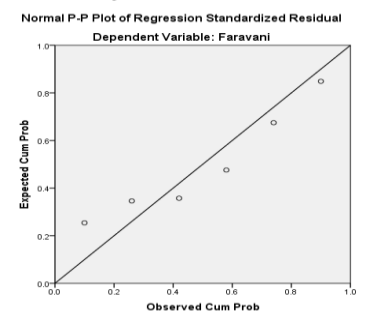
D/W	Sig	Df2	Df1	F (Table)	F	Std	R2	R	مدل
۱/۴۳	۰/۰۱	۲	۳	۵/۴۶	۶/۱۱	۵/۱۹	۰/۹۰	۰/۹۵	اولین یخبندان
۱/۲۴	۰/۰۴	۲	۳	۵/۴۶	۷/۸۰	۱۲/۱۰	۰/۷۳	۰/۸۵	آخرین یخبندان
۱/۲۹	۰/۰۳	۲	۳	۵/۴۶	۱۲/۶۸	۱۷/۱۲	۰/۸۰	۰/۹۰	دوره رشد
۲/۲۷	۰/۱۷	۲	۳	۵/۴۶	۵/۲۰	۱۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۹۴	دوره یخبندان
۰/۹۹	۰/۰۸	۲	۳	۵/۴۶	۱۳/۳۲	۷/۸۲	۰/۹۵	۰/۹۸	فراوانی



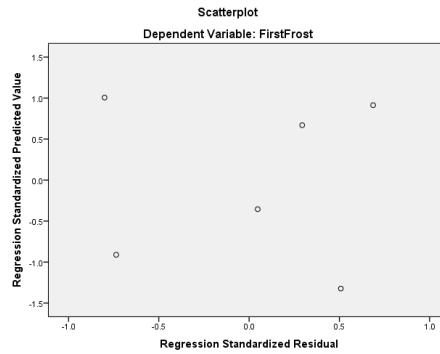
نمودار P-P Plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها برای وقوع اولین روز وقوع یخبندان



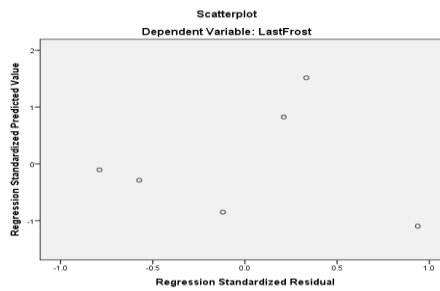
نمودار P-P Plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها برای آخرین روز وقوع یخبندان



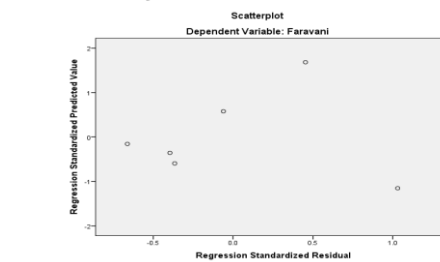
نمودار P-P Plot جهت آزمون نرمال بودن خطاها برای فراوانی روزهای وقوع یخبندان



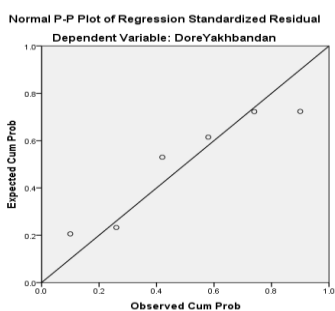
نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای وقوع اولین روز وقوع یخبندان



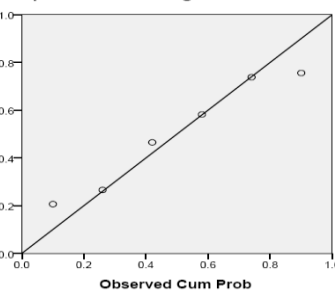
نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای آخرین روز وقوع یخبندان



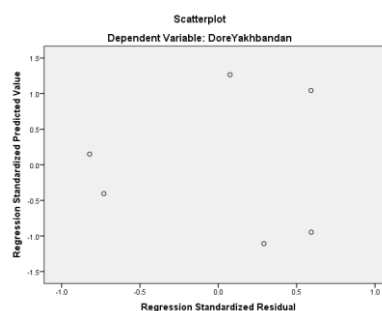
نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای فراوانی تعداد روزهای یخبندان



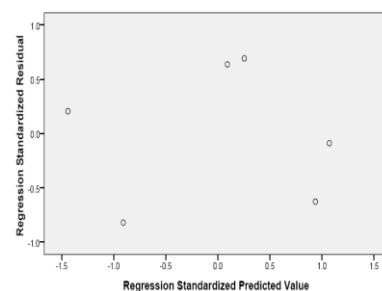
نمودار P-P جهت آزمون نرمال بودن خطاها برای میانگین طول دوره یخبندان



نمودار P-P جهت آزمون نرمال بودن خطاها برای متوسط طول دوره رشد



نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده برای میانگین طول دوره یخبندان



نمودار پراکنش مقادیر باقیمانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده برای متوسط طول دوره رشد

شکل (۸) نمودارهای پراکنش مقادیر باقیمانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده برای پنج ویژگی آماری یخبندان‌های استان کردستان (پانل سمت راست) و نمودارهای P-P جهت آزمون نرمال بودن خطاها برای پنج ویژگی آماری یخبندان‌های استان کردستان (پانل سمت چپ)

نتیجه گیری

مطالعه خصوصیات فضایی شاخص‌های مختلف یخبندان علاوه بر اینکه از لحاظ کاربردی در بسیاری از برنامه‌ریزی‌های کشاورزی، حمل و نقل و انرژی قابل استفاده است، می‌تواند تصویر مناسبی از قابلیت یخبندان در یک منطقه را نیز نشان دهد. نتایج حاصل از مدلسازی رگرسیونی بین شاخص‌های مختلف یخبندان با سه عامل ارتفاع، عرض و طول جغرافیایی در استان کردستان نشان داد که این سه عامل می‌توانند بین ۷۲ تا ۹۵ درصد

تغییرات شاخص‌های مختلف یخبندان را تبیین کنند. این سه عامل به ترتیب ۹۵، ۹۰، ۸۸، ۸۰ و ۷۲ درصد تغییرات مربوط به طول دوره رشد، وقوع اولین روز یخبندان، طول دوره یخبندان، فروانی وقوع روزهای یخبندان و وقوع آخرین روز یخبندان را تبیین کنند. اما لازم به یادآوری است که در مقیاس میکروکلیمای عوامل بسیار دیگری همچون نوع پوشش گیاهی، نوع جنس خاک، جهت شیب و غیره نیز دخالت دارند که در این مقیاس امکان دخالت دادن آنها در این مدلسازی وجود نداشته است. نکته دیگری که در این مدلسازی بسیار به چشم می‌آید فاصله زیاد ضریب تبیین دو شاخص تاریخ وقوع اولین روز یخبندان و تاریخ وقوع آخرین روز یخبندان است. برای اولین روز یخبندان ضریب تبیین ۹۵ و برای آخرین روز یخبندان ۷۲ درصد است. به نظر می‌رسد که عوامل دیگری به غیر از سه عامل ذکر شده در تغییرپذیری تاریخ وقوع آخرین روز یخبندان نقش دارند. لذا می‌توان بر اساس مطالعات نوحی و همکاران در سال ۲۰۰۷ و نوحی و همکاران در سال ۲۰۰۹ و علیجانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ استنباط نمود که یخبندان‌های انتهایی فصل سرما می‌تواند بیشتر از نوع یخبندان‌های فرارفتی باشند. به عبارت دیگر نقش علل همیدی در وقوع آخرین روزهای یخبندان و تغییرپذیری‌های آن می‌تواند یک نقش پررنگ تری داشته باشند. اما آرایش فضایی شاخص‌های مختلف یخبندان در استان کردستان نشان از یک آرایش غربی به شرقی در مقادیر شاخص‌های مختلف یخبندان دارد. یعنی هر چه از جانب غرب به سمت شرق حرکت می‌کنیم تعداد فراوانی روزهای یخبندان و همچنین طول دوره یخبندان کاهش پیدا می‌کند و متعاقب آن فصل رشد افزایش پیدا می‌کند. متناسب با این تغییرات وقوع اولین روز و آخرین روز یخبندان نیز با تاخیرهای زیادی در بین نیمه شرقی و غربی این استان قابل مشاهده است. هر چند در این بین استثناهایی نیز وجود دارد که این آرایش را می‌تواند بر هم بزند مانند مناطق دره‌های جنوب غرب استان به مرکزیت روستای سلین که به دلیل شرایط خاص توپوگرافی منطقه یکی از گرمترین نقاط استان به شمار می‌رود. در نهایت مقایسه نقشه‌های حاصل از این الگوریتم نشان داد که این روش می‌تواند جزییات بیشتر و دقیق تری از شاخص‌های یخبندان در مقام مقایسه با پهنه بندی‌هایی که تنها از داده‌های ایستگاهی استفاده کرده‌اند (میان‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۸، مجرد قره باغ، ۱۳۷۷، ضیائی و همکاران، ۱۳۸۵) ارائه نماید. بنابراین برای تحقیقات آینده پیشنهاد می

گردد که این پهنه بندی در سطوح احتمالاتی مختلف و برای دوره بازگشت‌های مختلف نیز تهیه گردد.

منابع

- بشیریان، ف.، یزدان پناه، ح.، مجد برزکی، م.، (۱۳۹۶)، تجزیه و تحلیل آماری یخبندان‌های کشاورزی شهر کاشان. *نشریه نیوار*، شماره ۹۹، صص ۳۷-۴۸.
- خسروی، م.، جیبی نوخندان، م.، اسماعیلی، ر.، (۱۳۸۷)، پهنه‌بندی اثر خطر سرمازدگی دیررس بر روی باغات مطالعه‌ی موردی: شهرستان مهاباد. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، دوره ۶ شماره ۱۲، ۱۴۵-۱۶۲.
- دارائی، م.، محمودی، پ.، ساری صراف، ب.، خورشید دوست، ع. م.، (۱۳۹۷)، تعیین تابع توزیع احتمالاتی یخبندان‌های ایران طی ۲۰۱۰-۱۹۸۱. *نشریه تحقیقات کاربردی در علوم جغرافیایی*، سال هجدهم، شماره ۵۰، صص ۱-۱۵.
- علیجانی، ب.، محمودی، پ.، ریگی چاهی، ا.، خسروی، پ.، (۱۳۸۹)، بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، شماره ۷۳، ۲۰-۱۰.
- علیجانی، ب.، محمودی، پ.، کلیم، د. م.، (۱۳۹۵)، اقلیم‌شناسی روزهای ذوب-یخبندان ایران. *فضای جغرافیایی*، سال ۱۶، شماره پیاپی ۵۶، صص ۱۹-۳۲.
- علیجانی، ب.، محمودی، پ.، کلیم دوست، م.، (۱۳۹۲)، رهیافتی جدید جهت تعیین طول دوره رشد بالقوه در ایران. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۷، شماره ۵، ۸۶۱-۸۷۱.
- علیرضا، ض.، کامگار حقیقی، ع.، سپاسخواه، ع.، رنجبر، س.، (۱۳۸۵)، تعیین اطلس احتمال وقوع حداقل دمای استان فارس با استفاده از آمار هواشناسی *مجله علوم آب و خاک*، دوره ۱۰، شماره ۳، ۱۳-۲۷.
- علیزاده، ا.، (۱۳۹۵)، *اصول هیدرولوژی کاربردی*، ویراست هفتم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۶۳۴.
- لشکری، ح.، کیخسروی، ق.، (۱۳۹۶)، روند تغییرات دمایی و پهنه‌بندی آغاز و پایان یخبندان شهر تهران. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، شماره ۱۴، صص ۸۶-۶۳.

- مجرد قره باغ، ف.، (۱۳۷۶)، تحلیل و پیش بینی یخبندان در آذربایجان. رساله دکتری اقلیم شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۶.
- محمودی پ.، علیجانی، ب.، (۱۳۹۲)، مدل بندی رابطه بارش‌های سالانه و فصلی با عوامل زمین اقلیم در کردستان. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی دوره ۱۳*، شماره ۳۱، ۹۳-۱۱۲.
- محمودی، پ.، خسروی، م.، مسعودیان، س.ا.، علیجانی، ب.، (۱۳۹۲)، اطلس اقلیم شناسی ویژگی‌های آماری یخبندان‌های ایران، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، دوره ۲۸، شماره ۴، ۵۵-۶۶.
- میان آبادی، آ.، موسوی بایگی، م.، ثنایی نژاد، ح.، نظامی، ا.، (۱۳۸۸)، بررسی و پهنه بندی یخبندان‌های زود هنگام پاییزه، دیر هنگام بهاره و زمستانه با استفاده از GIS در استان خراسان رضوی. *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، دوره ۲۳، شماره ۱، ۷۹-۹۰.
- نوحی، ک.، صحرائیان، ف.، پدرام، م.، صداقت کردار، ع.، (۱۳۸۷)، تعیین طول دوره بدون یخبندان با استفاده از تاریخ‌های آغاز و خاتمه یخبندان فرارفتی و تابشی در نواحی زنجان، قزوین و تهران. *مجله علوم آب و خاک*، دوره ۱۲، شماره ۴۶، ۴۶۰-۴۴۹.
- Avisar, R., Mahrer, Y. 1988 a. Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local-scale numerical model: Part I: physical and numerical aspects. *Journal of Applied Meteorology*, 27: 400-413.
- Avisar, R., Mahrer, Y. 1988 b. Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local-scale numerical model: Part II: comparison with observation. *Journal of Applied Meteorology*, 27: 414-42.
- Bamler, R. 1999. The SRTM Mission: A world-wide 30 m resolution DEM from SAR interferometry in 11 days. Photogrammetric week 99. D. Frisch and R. Spiller, Eds. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Boer, R., Campbell, L. C., Fletcher, D. J. 1993. Characteristics of frost in a major wheat – growing region of Australia. *Australian journal of agricultural research*, 44(8): 1731-1743.
- Chen, E., Allen, L. H., Bartholich, J. F., Bill, R. G., Sutherland, R. A. 1976. Satellite- sensed winter nocturnal temperature patterns of the Everglades agricultural area. *J. Appl. Meteor.*, 18: 992-1002.

- Dalezios, N. R., Lavradiadou, E. E. 1995. Features of frost – affected areas from digital METEOSAT IR images. *Advances Space Research*, 15(11): 123-126.
- Figuerola, P. I., Mazzeo, N. A. 1997. An analytical model for the prediction of nocturnal and dawn surface temperature under calm, clear sky conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 85: 229-237.
- Francois, C., Bosseno, R., Vacher, J. J., Seguin, B. 1999. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 113-1137.
- Geiger, R. 1966. *The climate near the ground*. Harvard University press, Cambridge, MA, 611 pp.
- Habibi Nokhandan, M. 2005. *Climate and safety of high mountains of Iran (case study of the roads of Haraz and Firouzkooh)*, Ph.D., Physical geography - Climatology, Faculty of Geography, University of Tehran. [In Farsi]
- Hogg, W. H. 1966. Air frost in spring at long Ashton. *Rep. Long Ashton Res. Stn.*, 1965: 290-298.
- Hogg, W. H. 1968: The duration of spring frosts on successive nights. *Agric. Mem. No.* 208.
- Jarvis, C. H., Stuart, N. 2000a. A comparison among strategies for interpolating maximum and minimum daily air temperatures, part I: The selection of “guiding” topographic and land cover variables. *Journal of Applied Meteorology* 40(6): 1060-1074.
- Jarvis, C. H., Stuart, N. 2000b. A comparison among strategies for interpolating maximum and minimum daily air temperatures, part II: The Interaction between the number of guiding variables and the type of interpolation method. *Journal of Applied Meteorology* 40(6): 1075-1084.
- Jurgens, C. 1997. The modified normalized difference vegetation index (mNDVI) a new index to determine frost damage in agriculture based on Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 18(17): 3583-3594.
- Kerdiles, H., Grodona, M., Rodriguez, R., Seguin, B. 1996. Frost mapping using NOAA AVHRR data in the Pampean region, Argentina. *Agricultural and forest meteorology*, 79: 157-182.

- Laughlin, G. P. 1982. Minimum temperature and lapse rate in complex terrain: influencing factors and prediction. Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Ser. B, 30: 141-152.
- Laughlin, G. P., Kalma, J. D. 1987. Frost hazard assessment from local weather and terrain data. Agricultural and forest meteorology, 40: 1-16.
- Laughlin, G. P., Kalma, J. D. 1990. Frost risk mapping for landscape planning: a methodology. Theoretical and Applied climatology, 42: 41-51.
- Lindkvist, L., Gustavsson, T., Bogren, J. 2000. A frost assessment method for mountainous areas. Agricultural and forest meteorology, 102: 51-67.
- Lomas, J., Gat, Z. 1971. Methods in agrotopoclimatic surveys low temperatures. Agron. Rep. No 1, Israel Meteorological Service, Bet-Dagan.
- Madelin, M., Beltrando, G. 2005. Spatial interpolation – based mapping of the spring frost hazard in the Champagne vineyards. Meteorological applications, 12(1): 51-56.
- Mahmoudi, P. 2014. Mapping Statistical Characteristics of Frosts in Iran. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(2): 175-180.
- Nixon, P. R., Hales, T. A. 1975. Observing cold-night temperatures of agriculture landscapes with an airplane-mounted radiation thermometer. Journal of Applied Climatology, 14 (4): 498-505.
- Noohi, K., Pedram, M., Sahraian, F., Kamali, G. A. 2007. Analysis of First Fall and Last Spring Advection and Radiation-Advection Frosts in Azerbaijan Provinces. Pajouhesh and Sazandegi, 20 (2): 78-85. [In Farsi]
- Richards, K. 2000. The topoclimate south project to map long-term growing degree-days in Southland, New Zealand. Presented at: SIRC 2000 – The 12th annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre. University of Otago, New Zealand.
- Richards, K., Baumgarter, M. 2003. Towards topoclimate maps of frost and frost risk for southland, New Zealand. Presented at: SIRC 2003 – The 15th annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre. University of Otago, New Zealand.
- Rosenberg, N. J., Myers, R. E. 1962. The nature of growing season frosts in and along the Platte Valley of Nebraska. Monthly weather review, 90 (11): 471-476.

- Schmidlin, T. W. 1986. Freeze-thaw days in the northeastern United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26 (1): 142-155.
- Sutherland, R.A., Bartholic, J. F. 1974. Aircraft-mounted thermal scanner to determine grove temperatures during freeze conditions. *Proc. Florida State Hort. Soc.*, 87: 65-69.
- Sutherland, R.A., Hannah, H. E., Cook, A. F., Martsolf, J. D. 1981. Remote sensing of thermal radiation from an aircraft- An analysis and evaluation of crop-freeze protection methods. *J. Appl. Meteor.*, 20: 813-820.
- Suzuki, Y., Sato, S., Kawajiri, K. 1982. Frost damage and cold damage related to topographic climates in the warm region of Japan. Pt. 1, Distribution of Maximum air temperatures on the slopes of Ube-Ono tea garden, Yamaguchi. *J. Agric. Meteor.* 20: 813-820.
- Thom, H. C. S., Shaw, R. H. 1958. Climatological analysis of freeze data for Iowa. *Monthly weather review*, 86(7): 251-257.
- Watkins, C. 1991. The annual period of freezing temperatures in central England: 1850-1989. *International journal of climatology*, 11(8): 889-896.
- Waylen, P. R. 1988. Statistical analysis of freezing temperatures in central and southern Florida. *International Journal of climatology*, 8 (6): 607-628.
- Zinoni, F., Antolini, G., Campisi, T., Marletto, V., Rossi, F. 2002. Characterizations of Emilia-Romagna region in relation with late frost risk. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 1091-1101.