

تحلیل فضایی و بررسی پتانسیل اقلیمی پراکنش مکانی ارقام پسته در استان خراسان رضوی بر مبنای فاکتور نیاز سرمایی

سعیده کوزه‌گران^{۱*}، ابراهیم اسعدی اسکویی^۲، جواد رسولی^۳، یعقوب نیازی^۴، یاشار فلامرزی^۵

۱- دکترای هواشناسی کشاورزی، پژوهشگر، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران.

۲- دکترای هواشناسی کشاورزی، استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران.

۳- دکترای آگرواکولوژی، گروه تحقیقات هواشناسی کاربردی، مشهد.

۴- کارشناس پژوهشی، پژوهشکده هواشناسی آب و کشاورزی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، ایلام.

۵- دکترای مهندسی منابع آب، استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران.

چکیده

استان خراسان رضوی به عنوان دومین قطب تولید پسته در ایران، با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و تأمین نیاز سرمایی این محصول استراتژیک روبروست. نیاز سرمایی، به عنوان یکی از کلیدی‌ترین عوامل آگروکلیماتیک، موفقیت یا شکست باغات پسته را تعیین می‌کند. در این پژوهش، با هدف ارزیابی دقیق تناسب اقلیمی و شناسایی مناطق مستعد کشت پسته، از داده‌های دمای بازتحلیل ERA5-Land با قدرت تفکیک مکانی بالا برای دوره آماری ۳۱ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۱) استفاده شد. نیاز سرمایی استان بر اساس سه مدل رایج شامل مدل ساعات سرمایی (CH)، مدل یوتا و مدل دینامیک محاسبه و پهنه‌بندی گردید. نتایج حاصل از مدل CH نشان داد که به جز بخش‌های محدودی از شمال غرب استان، سایر مناطق قابلیت تأمین نیاز سرمایی ارقام مختلف پسته را دارند و اغلب نقاط توانایی تأمین بیش از ۸۰۰ ساعت سرمایی را در سال‌های مختلف داشته‌اند. تحلیل روند با استفاده از برآوردگر شیب سن، افزایش سالانه ۲ تا ۶ ساعت در مجموع ساعات نیاز سرمایی را در پهنه‌هایی از نواحی شرقی و غربی استان نشان داد که بیانگر بهبود شرایط برای ارقام با نیاز سرمایی بالاتر است. نقشه‌های احتمالاتی نیز مشخص کرد که پهنه‌های وسیعی از استان، به‌ویژه در مناطق غربی و جنوبی (مانند شهرستان‌های بردسکن و خلیل‌آباد)، با احتمال بالا (۷۵٪ و ۹۰٪) پتانسیل تأمین نیاز سرمایی ارقام تجاری و پر نیاز مانند اکبری را دارا می‌باشند. مقایسه مدل‌ها نشان داد که هر سه مدل در شناسایی مناطق مستعد همگرایی دارند، اما مدل یوتا به دلیل در نظر گرفتن اثرات منفی دماهای بالا، ارزیابی محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهد. این اطلاعات می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد و مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری‌های کلان در بخش کشاورزی، مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی در جهت توسعه پایدار و اقتصادی باغات پسته در استان مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: تناسب اقلیمی، نیاز سرمایی، تحلیل احتمالاتی، داده‌های بازتحلیل، پسته، خراسان رضوی.

مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) به عنوان یکی از مهمترین محصولات باغی و صادراتی غیرنفتی ایران، از جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. ایران با در اختیار داشتن بیشترین سطح زیر کشت و تولید پسته در جهان، نقشی کلیدی در بازار جهانی این محصول ایفا می‌کند (بستان و همکاران، ۲۰۱۸). در این میان، استان خراسان رضوی پس از استان کرمان، به عنوان دومین قطب تولید پسته کشور، جایگاه ویژه‌ای در اقتصاد کشاورزی منطقه و کشور به خود اختصاص داده است. با این حال، پایداری تولید این محصول استراتژیک با چالش‌های متعددی، به ویژه در زمینه تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، روبرو است.

درختان میوه مناطق معتدله، از جمله پسته، برای خروج از دوره رکود زمستانی و آغاز رشد طبیعی در بهار، نیازمند گذراندن یک دوره سرمایی مشخص هستند. این نیاز فیزیولوژیکی که تحت عنوان «نیاز سرمایی» شناخته می‌شود، حداقل زمان لازم برای قرارگیری جوانه‌ها در معرض دماهای پایین و مؤثر طی فصل رکود است که منجر به شکستن خواب و شروع رشد طبیعی در فصل رویش می‌شود. عدم تأمین کافی این نیاز فیزیولوژیکی، مجموعه‌ای از ناهنجاری‌های رشدی و زایشی را به دنبال دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تأخیر و ناهمگونی در گلدهی، کاهش درصد جوانه‌های گل باز شده، تولید برگ‌های کوچک و غیرطبیعی، کاهش تولید و قابلیت حیات گرده، و در نهایت ریزش شدید جوانه‌ها و کاهش چشمگیر عملکرد محصول اشاره کرد (احمدی، ۱۳۹۸). نیاز سرمایی ارقام مختلف پسته اهلی، بسته به ژنوتیپ، بین ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ ساعت (تعداد ساعات با دمای کمتر از ۷.۲ درجه سلسیوس) گزارش شده است (حکم‌آبادی و جوانشاه، ۱۳۸۵). این تنوع ژنتیکی، لزوم تطبیق رقم با شرایط اقلیمی منطقه را به یک اصل اساسی در احداث باغات جدید تبدیل می‌کند.

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و روند افزایشی دما، تأمین نیاز سرمایی درختان میوه را در بسیاری از نقاط جهان با چالش مواجه کرده است. این پدیده به ویژه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک که در آستانه تأمین نیاز سرمایی قرار دارند، محسوس‌تر است (ال یو دیلین و همکاران، ۲۰۰۹). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که گرمایش زمستانه می‌تواند منجر به کاهش ساعات سرمایی مؤثر و به خطر افتادن تناسب کشت

برخی ارقام در مناطق سستی تولید شود. برای مثال، بالدوچی و وانگ (۲۰۰۸) نشان دادند که تناسب کشت برخی ارقام درختان میوه در کالیفرنیا به دلیل کاهش انباشت سرمای زمستانه به طور جدی تهدید می‌شود. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی به این موضوع پرداخته‌اند. سبزی پرور و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی اثر گرمایش جهانی بر تأمین نیاز سرمایی ارقام پسته در کرمان، دریافتند که تأمین نیاز سرمایی دیرگل و پرنیاز در آن اقلیم با مشکل مواجه شده و ریسک تولید افزایش یافته است. فلاح‌قاله‌ری و احمدی (۱۳۹۷) با بررسی مدل‌های مختلف، روند کاهش معناداری را در انباشت سرمایی برخی مناطق سردسیر ایران شناسایی کردند که زنگ خطری برای آینده باغداری در این مناطق است. همچنین پویان فر و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی داده‌های بلندمدت ایستگاه یزد، نشان دادند که هر سال به طور متوسط حدود ۵.۷ ساعت از مجموع ساعات تأمین نیاز سرمایی پسته در این ایستگاه کاسته شده است که این روند کاهش، پایداری باغات موجود را تهدید می‌کند.

با توجه به اهمیت روزافزون کشت پسته در استان خراسان رضوی به عنوان جایگزینی برای محصولات با نیاز آبی بالا و لزوم شناسایی علمی مناطق مستعد و کم‌ریسک، این پژوهش با هدف تهیه و ارزیابی نقشه جامع تناسب اقلیمی کاشت پسته در این استان انجام شد. فقدان یک نقشه دقیق و مبتنی بر داده‌های با قدرت تفکیک بالا، برنامه‌ریزی برای توسعه باغات را با عدم قطعیت مواجه کرده است. بنابراین، این مطالعه در پی پاسخ به سوالات اساسی زیر است: (۱) الگوی توزیع مکانی و زمانی انباشت سرمایی در استان خراسان رضوی طی سه دهه اخیر چگونه بوده است؟ (۲) کدام مناطق استان دارای پتانسیل بالاتری برای تأمین نیاز سرمایی ارقام مختلف پسته (از کم‌نیاز تا پرنیاز) هستند؟ (۳) آیا روند معناداری در تغییرات نیاز سرمایی استان طی دوره آماری مشاهده می‌شود؟ برای پاسخ به این سوالات، از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و مدل‌های مختلف نیاز سرمایی استفاده شد تا یک ارزیابی جامع و چندوجهی از پتانسیل اقلیمی استان ارائه گردد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی با وسعتی حدود ۱۱۸,۸۵۱ کیلومتر مربع، در شمال شرق ایران واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی در

سپس با استفاده از اسکریپت‌های نوشته شده در محیط نرم‌افزار R، برای منطقه مورد مطالعه برش داده شده و برای تحلیل‌های بعدی آماده‌سازی شدند. به منظور ارزیابی کلی شرایط اقلیمی، اطلاعات بلندمدت تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی منتخب استان نیز مطابق جدول ۱ استخراج و تحلیل گردید.

زمانی ساعتی هستند که این ویژگی‌ها آن را برای محاسبه دقیق مدل‌های نیاز سرمایی ایده‌آل می‌سازد (سام خانیانی و محمدی، ۱۴۰۱). در این تحقیق، داده‌های دمای ۲ متری برای دوره آماری ۳۱ ساله از ۱ ژانویه ۱۹۹۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۱ برای محدوده جغرافیایی استان خراسان رضوی دریافت گردید. داده‌ها در قالب فایل‌های NetCDF از طریق پلتفرم Copernicus Climate Data Store (CDS) استخراج و

جدول ۱- شاخص‌های اقلیمی بلندمدت ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

(منبع: گروه تحقیقات هواشناسی کاربردی خراسان رضوی)

ردیف	ایستگاه	T (°C)	P (mm)	m (°C)	اقلیم (روش دومارتن)
۱	تربت جام	۱۵.۷	۱۹۹.۳	-۱.۲	خشک بیابانی سرد
۲	تربت حیدریه	۱۴.۲	۲۴۹.۸	-۳.۹	نیمه خشک سرد
۳	سبزوار	۱۸.۲	۱۷۹.۸	-۲.۱	خشک بیابانی معتدل
۴	سرخس	۱۸.۲	۱۸۷.۳	-۲.۱	خشک بیابانی معتدل
۵	قوچان	۱۲.۷	۳۰۸.۲	-۴.۶	نیمه خشک سرد
۶	کاشمر	۱۷.۹	۱۸۵.۸	۰.۳	خشک بیابانی معتدل
۷	گناباد	۱۷.۴	۱۸۸.۹	-۰.۸	خشک بیابانی سرد
۸	مشهد	۱۵.۵	۲۳۳.۸	-۱.۷	نیمه خشک سرد
۹	نیشابور	۱۴.۴	۲۳۲.۶	-۳.۵	نیمه خشک سرد

$$CH = \sum_{i=1}^t T_{7.2}, \text{ with } T_{7.2}$$

$$= \begin{cases} 0^\circ\text{C} < T < 7.2^\circ\text{C} : 1 \\ \text{else} : 0 \end{cases}$$

۲- مدل یوتا (Utah Model): این مدل که توسط ریچاردسون و همکاران (۱۹۷۴) برای هلو توسعه یافت، یک مدل وزنی است که تأثیرات متفاوت دماهای مختلف را در نظر می‌گیرد. در این مدل، دماهای بین ۲.۵ تا ۹.۱ درجه سلسیوس دارای اثر سرمایی مثبت (یک واحد یوتا)، دماهای بین ۹.۲ تا ۱۲.۴ درجه دارای اثر کمتر (نیم واحد یوتا)، و دماهای بالاتر از ۱۶ درجه سلسیوس دارای اثر منفی (خنثی‌کننده سرما) هستند. این مدل به دلیل در نظر گرفتن اثرات منفی دماهای گرم در طول دوره رکود، برای مناطقی با نوسانات دمایی زمستانه مناسب‌تر تلقی می‌شود.

۳- مدل دینامیک (Dynamic Model): این مدل که توسط ارز و همکاران (۱۹۸۹) معرفی شد، یک فرآیند دو مرحله‌ای را برای انباشت سرما فرض می‌کند. ابتدا در اثر دماهای

روش کار

فرآیند تحقیق شامل چند مرحله اصلی بود: ۱) محاسبه انباشت سرمایی با استفاده از سه مدل مختلف، ۲) تحلیل روند زمانی، و ۳) تحلیل احتمالاتی. دوره زمانی برای محاسبه نیاز سرمایی از ۱ نوامبر (۱۰ آبان) تا ۴ فوریه (۱۵ بهمن) هر سال در نظر گرفته شد که دوره رکود اصلی پسته را پوشش می‌دهد.

۱- مدل ساعات سرمایی (Chilling Hours - CH): این مدل که به مدل واینبرگر (Weinberger) نیز معروف است، ساده‌ترین و رایج‌ترین روش محاسبه انباشت سرمایی است. در این مدل، تعداد ساعاتی که دما در بازه بهینه برای شکستن خواب (بین ۰ تا ۷.۲ درجه سلسیوس) قرار می‌گیرد، شمارش می‌شود. دماهای خارج از این بازه هیچ اثری (نه مثبت و نه منفی) در نظر گرفته نمی‌شوند (لودلینگ و همکاران، ۲۰۱۳).

پایین، یک محصول میانی ناپایدار تولید می‌شود. سپس اگر دما به اندازه کافی بالا نرود، این محصول میانی به یک واحد سرمایی پایدار و برگشت‌ناپذیر به نام "بخش سرمایی" (Chill Portion- CP) تبدیل می‌شود. دماهای بالا می‌توانند محصول میانی را از بین ببرند اما بر بخش‌های سرمایی انباشته شده تأثیری ندارند. این مدل به ویژه برای اقلیم‌های گرم‌تر که با دوره‌های گرم متناوب در زمستان مواجه هستند، کارایی بالایی دارد.

برای تحلیل روند تغییرات سری زمانی انباشت سرمایی در هر سلول شبکه، از آزمون ناپارامتری من-کندال (Mann-Kendall) برای تشخیص وجود روند و از برآوردگر شیب تیل-سن (Theil-Sen) برای محاسبه مقدار شیب روند

استفاده شد. این روش‌ها به دلیل عدم نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها و مقاومت بالا در برابر داده‌های پرت، برای تحلیل سری‌های زمانی اقلیمی بسیار مناسب هستند (Sen, 1968). در نهایت، برای ارزیابی ریسک و پتانسیل مناطق، نقشه‌های احتمالاتی تهیه شد. برای این منظور، در هر سلول، توزیع فراوانی مقادیر انباشت سرمایی در دوره ۳۱ ساله محاسبه و سپس مقادیر متناظر با احتمال وقوع ۰.۵٪، ۷.۵٪ و ۹۰٪ استخراج گردید. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که با چه احتمالی می‌توان انتظار داشت که نیاز سرمایی مشخصی در یک منطقه تأمین شود. نیاز سرمایی ارقام غالب پسته نیز به عنوان معیار ارزیابی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نیاز سرمایی (بر اساس مدل CH) برای ارقام غالب و تجاری پسته (منبع: جوائشاه و همکاران، ۱۳۸۳)

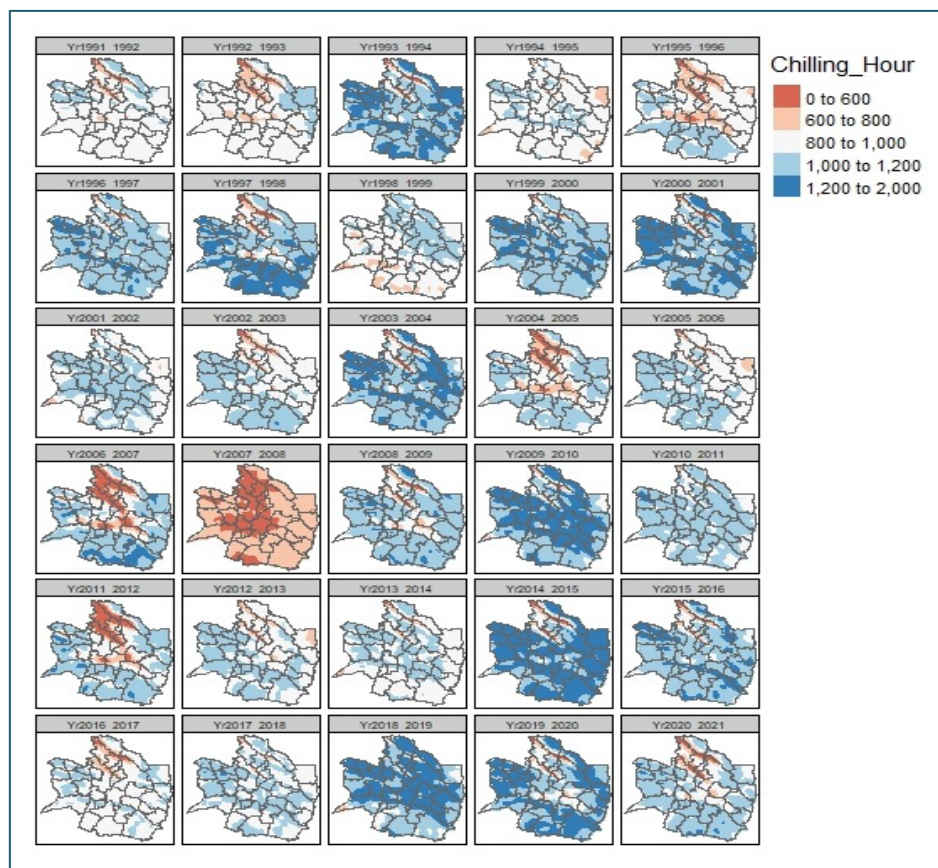
رقم	نوع رقم	نیاز سرمایی (ساعت)
کله قوچی	زودگل	۶۰۰
احمد آقایی	متوسط گل	۸۰۰
اوحدی	متوسط گل	۹۰۰
اکبری	دیرگل	۱۲۰۰

بحث و تفسیر نتایج

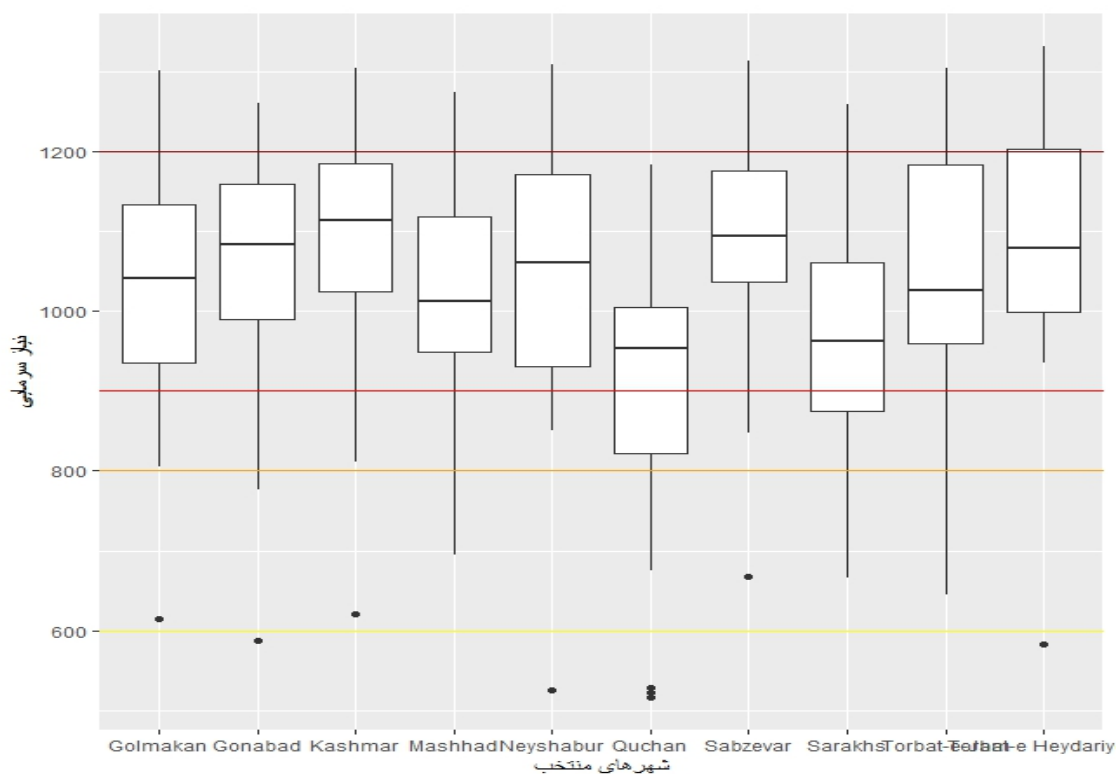
الگوی انباشت سرمایی بر اساس مدل ساعات سرمایی (CH)

نتایج حاصل از محاسبه میانگین بلندمدت انباشت سرمایی بر اساس مدل CH در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که در نقشه مشاهده می‌شود، توزیع مکانی ساعات سرمایی در سطح استان از یک الگوی مشخص پیروی می‌کند که عمدتاً تحت تأثیر ارتفاع و عرض جغرافیایی است. بیشترین مقادیر انباشت سرمایی (بیش از ۱۲۰۰ ساعت) در مناطق مرتفع شمالی و شمال غربی استان و همچنین بخش‌هایی از ارتفاعات جنوبی در شهرستان‌های تربت حیدریه و کاشمر متمرکز شده است. در مقابل، کمترین مقادیر (کمتر از ۸۰۰ ساعت) در دشت‌های پست و گرم شرقی و شمال شرقی استان، به ویژه در شهرستان سرخس، مشاهده می‌شود. بخش‌های وسیعی از مناطق مرکزی، غربی و جنوبی استان که قطب‌های اصلی تولید پسته هستند، دارای انباشت سرمایی در بازه ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ ساعت هستند که این محدوده برای کشت اکثر ارقام تجاری پسته مناسب است.

تحلیل تغییرات بین‌سالی نشان داد که انباشت سرمایی از سالی به سال دیگر نوسانات قابل توجهی را تجربه می‌کند. به عنوان مثال، در سال زراعی ۲۰۱۹-۲۰۲۰ که با زمستانی سردتر از نرمال همراه بود، تقریباً تمامی مناطق استان (به جز نوار شرقی) بیش از ۱۲۰۰ ساعت سرمایی را دریافت کردند که شرایطی ایده‌آل برای ارقام پرنیاز مانند اکبری فراهم آورد. در نقطه مقابل، سال زراعی ۲۰۰۷-۲۰۰۸ که با رخداد سرمای شدید و ماندگار در دی ماه ۱۳۸۶ همزمان بود، به دلیل استقرار طولانی مدت دماهای بسیار پایین (زیر صفر درجه)، ساعات قرارگیری در بازه مؤثر سرمایی (۰ تا ۷.۲ درجه) کاهش یافت و در نتیجه، انباشت سرمایی در کل استان به شکل غیر منتظره‌ای نامناسب برآورد شد. این موضوع نشان می‌دهد که نه تنها گرمای زمستانه، بلکه سرمای بیش از حد و طولانی نیز می‌تواند تأمین نیاز سرمایی را مختل کند. این یافته‌ها با نتایج فلاح قالهری و احمدی (۱۳۹۷) که به بررسی الگوهای انباشت سرمایی در ایران پرداختند، همخوانی دارد و اهمیت تحلیل داده‌های بلندمدت را برای درک این نوسانات برجسته می‌سازد.



شکل ۲- نقشه میانگین بلندمدت نیاز سرمایی پسته بر اساس مدل CH برای دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۱ (واحد: ساعت)

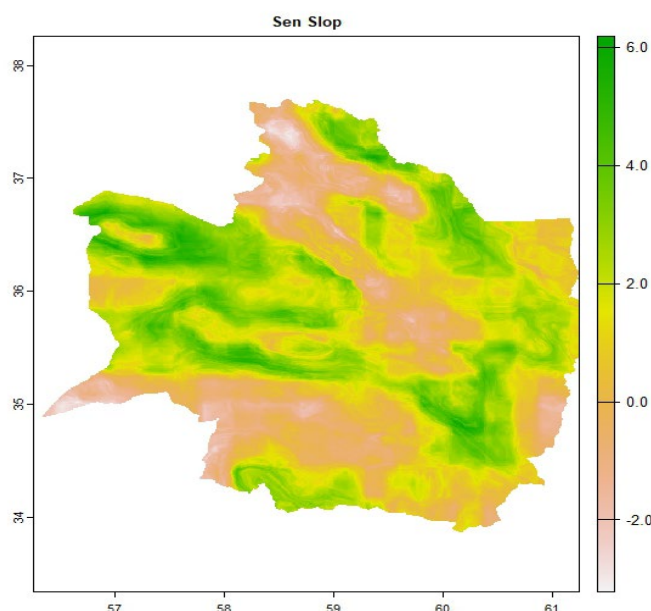


شکل ۳- نمودار جعبه‌ای نیاز سرمایی (مدل CH) در ایستگاه‌های منتخب استان طی دوره آماری

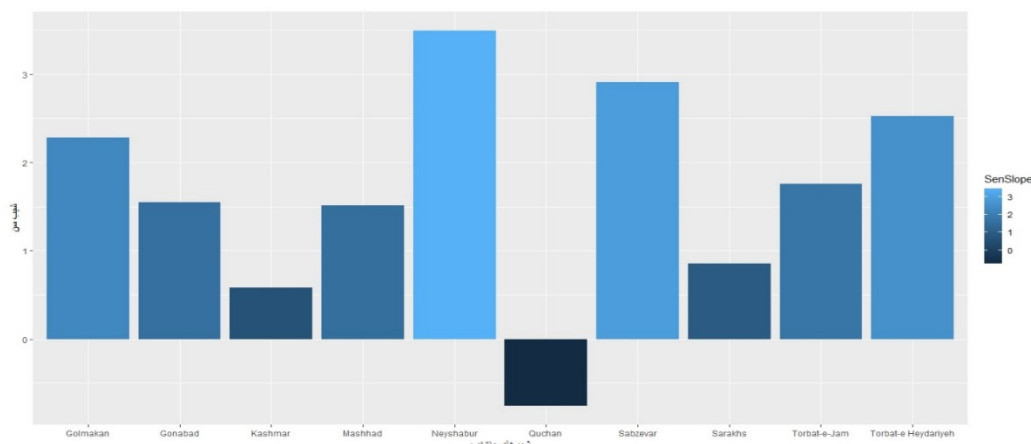
تحلیل روند ساعات سرمایی

نقشه توزیع مکانی شیب روند تغییرات انباشت سرمایی طی دوره ۳۱ ساله در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که تغییرات روند در سطح استان یکنواخت نیست. پهنه‌های قابل توجهی در محدوده شرق (شهرستان‌های تایباد و خواف)، غرب (شهرستان‌های بردسکن و سبزوار) و بخش‌هایی از مرکز استان، روند افزایشی مثبت و معناداری (در سطح اطمینان ۹۵٪) را نشان می‌دهند. مقدار این افزایش بین ۲ تا ۶ ساعت در سال متغیر است. این روند افزایشی، که در نگاه اول ممکن است با پدیده گرمایش جهانی متناقض به نظر برسد، می‌تواند ناشی از تغییر در الگوی دمای روزانه باشد؛ به طوری که ممکن است کاهش

دمای شبانه یا کاهش تعداد روزهای بسیار سرد (زیر صفر) منجر به قرارگیری ساعات بیشتری در بازه مؤثر سرمایی (-۰.۲ تا ۷.۲ درجه) شده باشد. این یافته برای کشاورزان این مناطق می‌تواند مناسب باشد، زیرا نشان‌دهنده بهبود شرایط اقلیمی برای کشت ارقامی با نیاز سرمایی بالاتر و افزایش پایداری تولید در آینده است. در مقابل، مناطق محدودی در ارتفاعات شمالی و برخی نقاط مرکزی، روند کاهشی ضعیف و غیرمعناداری را نشان دادند که نیاز به پایش مستمر در سال‌های آتی دارد. این نتایج با یافته‌های پویان فر و همکاران (۱۴۰۱) در یزد که روند کاهشی شدیدی را گزارش کردند، متفاوت است و نشان می‌دهد که پاسخ اقلیمی مناطق مختلف به گرمایش جهانی می‌تواند بسیار متنوع باشد.



شکل ۴- توزیع مکانی شیب روند سالانه نیاز سرمایی پسته (مدل CH) برای دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۱ (واحد: ساعت بر سال)



شکل ۵- نمودار شیب سن (Sen's Slope) برای نیاز سرمایی (مدل CH) در ایستگاه‌های منتخب استان

نقشه‌های احتمال وقوع نیاز سرمایی

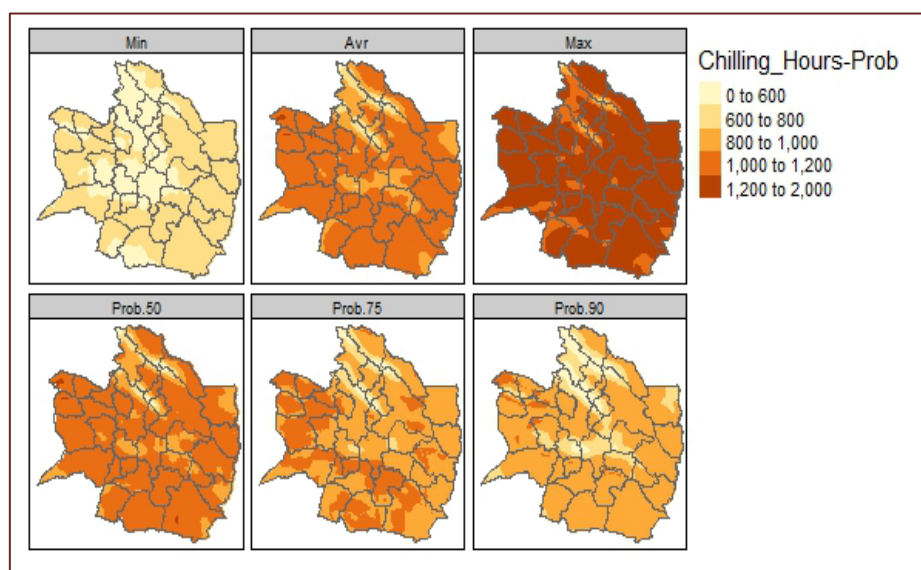
برای مدیریت ریسک در کشاورزی، اطلاع از مقادیر میانگین به تنهایی کافی نیست و تحلیل احتمالاتی می‌تواند دیدگاه دقیق‌تری را فراهم کند. شکل ۶، توزیع مکانی آماره‌های مختلف شامل کمینه، بیشینه، میانگین و مقادیر انباشت سرمایی با احتمال وقوع ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد را نشان می‌دهد. نقشه احتمال ۷۵ درصد (به این معنی که در ۳ سال از ۴ سال، نیاز سرمایی از این مقدار بیشتر خواهد بود) نشان می‌دهد که مناطق وسیعی در غرب و جنوب استان (شهرستان‌های بردسکن، خلیل‌آباد، کاشمر و بخش‌هایی از گناباد) پتانسیل تأمین نیاز سرمایی در دامنه ۱۰۰۰-۱۲۰۰ ساعت را با قابلیت اطمینان بالا دارا هستند. این مناطق برای کشت ارقام پرنیاز و با کیفیت مانند اکبری بسیار مناسب ارزیابی می‌شوند.

نقشه احتمال ۹۰ درصد (ریسک کمتر، اطمینان بالاتر) نیز نشان می‌دهد که پهنه‌های گسترده‌ای از استان، شامل اکثر مناطق پسته خیز فعلی، پتانسیل تأمین نیاز سرمایی در دامنه ۸۰۰-۱۰۰۰ ساعت را دارا می‌باشند. این یافته برای

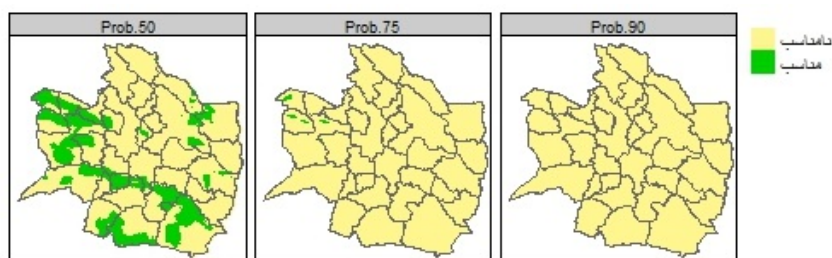
سرمایه‌گذاری‌های جدید در احداث باغات پسته بسیار حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که کشت ارقام تجاری مانند احمدآقایی و اوحدی در این مناطق با ریسک اقلیمی پایینی همراه است. این نقشه‌ها به عنوان یک ابزار کاربردی می‌توانند توسط کارشناسان ترویج کشاورزی و باغداران برای انتخاب رقم بهینه و کاهش ریسک ناشی از عدم تأمین نیاز سرمایی مورد استفاده قرار گیرند.

پهنه‌بندی تناسب اقلیمی برای ارقام شاخص

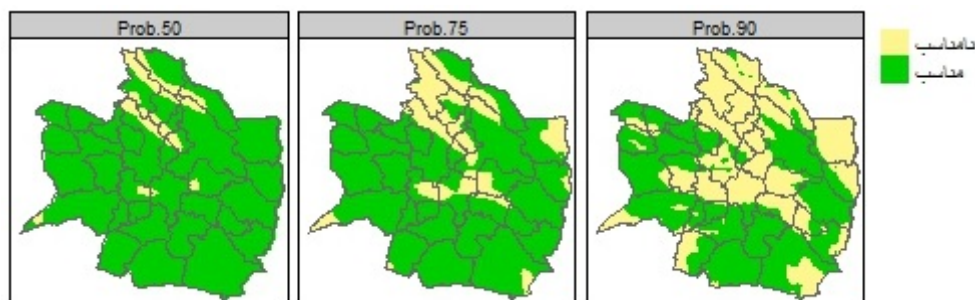
علاوه بر تحلیل کلی، نقشه‌های تناسب اقلیمی برای چهار رقم تجاری و مهم پسته شامل اکبری، احمد آقایی، اوحدی و فندق بر اساس احتمال تأمین نیاز سرمایی آن‌ها تهیه شد (اشکال ۷ تا ۱۰). این نقشه‌ها به صورت مستقیم مناطق «مناسب» و «نامناسب» را برای کشت هر رقم با در نظر گرفتن سطوح مختلف ریسک (احتمال ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد) مشخص می‌کنند و ابزاری عملی برای تصمیم‌گیری باغداران فراهم می‌آورند.



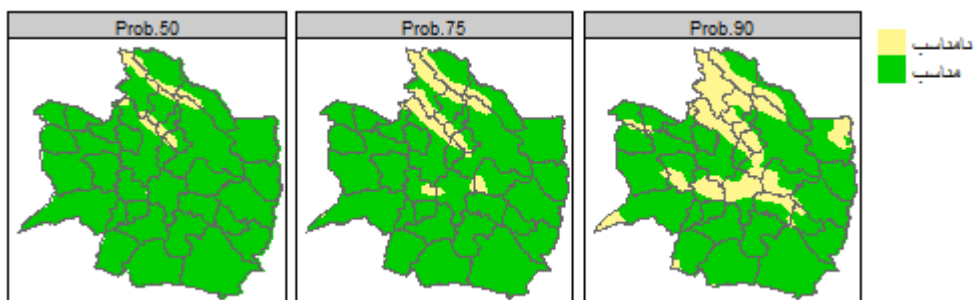
شکل ۶- پراکنش مکانی آماره‌های توصیفی و نقشه‌های احتمال ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد نیاز سرمایی پسته (مدل CH)



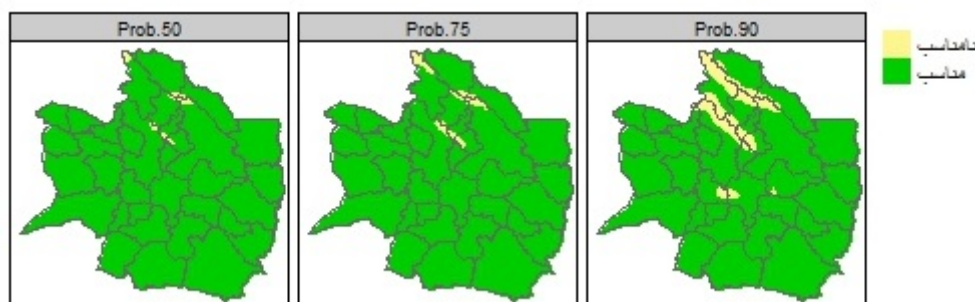
شکل ۷- پهنه‌بندی تناسب اقلیمی برای کشت رقم اکبری بر اساس احتمال تأمین نیاز سرمایی (CH)



شکل ۸- پهنه‌بندی تناسب اقلیمی برای کشت رقم احمد آقایی بر اساس احتمال تأمین نیاز سرمایی (CH)



شکل ۹- پهنه‌بندی تناسب اقلیمی برای کشت رقم اوحدی بر اساس احتمال تأمین نیاز سرمایی (CH)

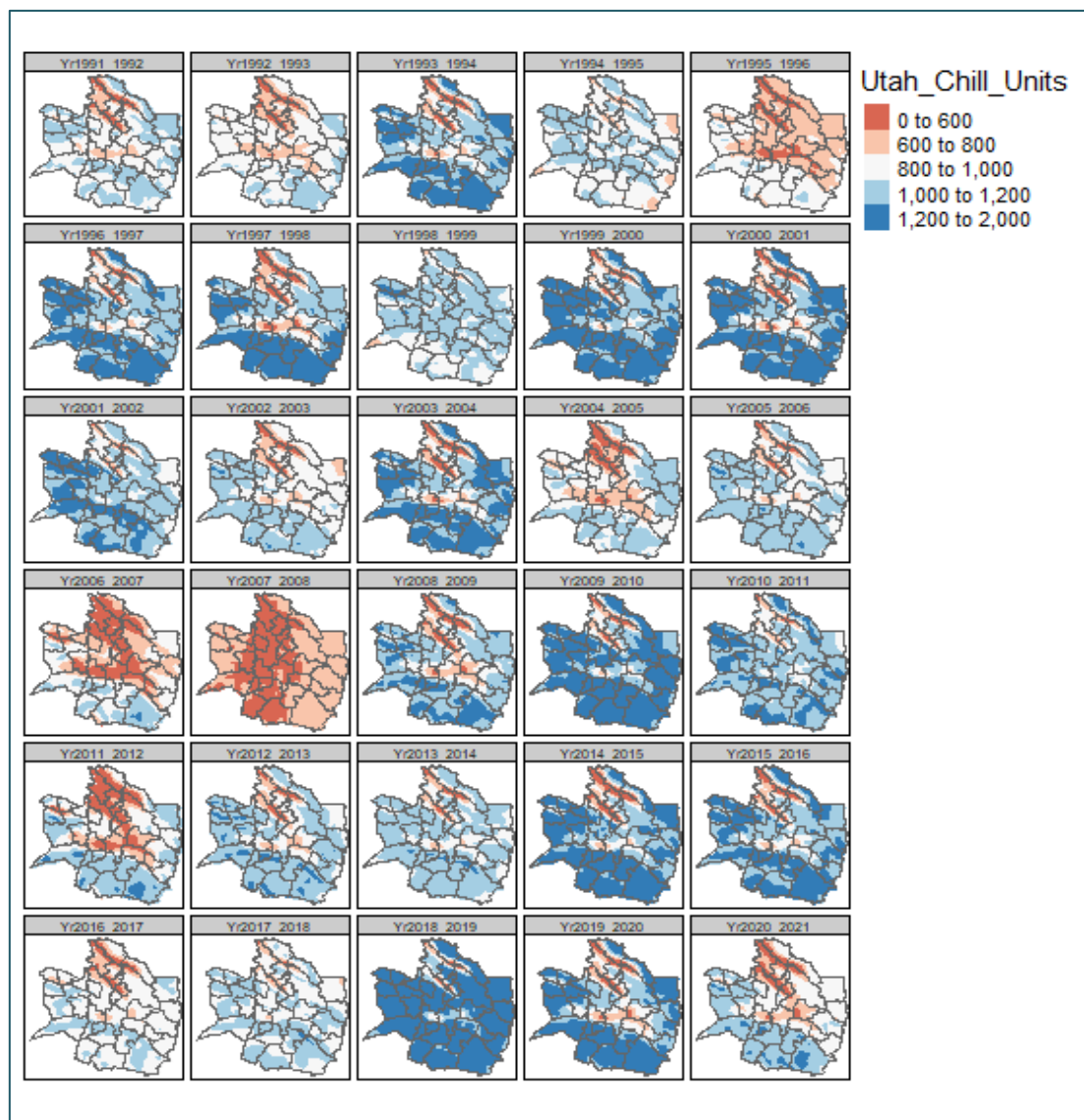


شکل ۱۰- پهنه‌بندی تناسب اقلیمی برای کشت رقم فندقی بر اساس احتمال تأمین نیاز سرمایی (CH)

مقایسه نتایج مدل‌های یوتا و دینامیک

تحلیل‌های انجام گرفته بر اساس مدل یوتا (شکل ۱۱) نشان داد که الگوی کلی توزیع مکانی واحدهای سرمایی یوتا مشابه مدل CH است، اما با تفاوت‌های قابل تأمل. بیشترین مقادیر انباشت سرمایی یوتا در بخش‌های جنوبی استان متمرکز است. دلیل این امر آن است که مدل یوتا به دماهای بالای ۱۶ درجه در طول زمستان امتیاز منفی اختصاص می‌دهد و این دماها در مناطق جنوبی کمتر رخ می‌دهند. در واقع، مدل یوتا مناطقی با زمستان‌های پایدارتر و بدون نوسانات گرمایی شدید را به عنوان مناطق برتر معرفی می‌کند. روند انباشت سرمایی بر اساس این مدل نیز مشابه مدل CH، در نواحی شرقی و غربی استان افزایشی (حدود ۲ تا ۴ واحد یوتا در سال) بوده است.

نتایج مدل دینامیک (شکل ۱۲) که برای اقلیم‌های گرم‌تر مناسب‌تر است، نشان داد که به غیر از نقاط بسیار مرتفع، بقیه مناطق استان در کل دوره بیش از ۵۰ واحد سرمایی (Chill Portion) دریافت کرده‌اند. این مقدار به طور کلی برای شکستن رکود اکثر جوانه‌های پسته کافی تلقی می‌شود و نشان‌دهنده شرایط عمومی مناسب برای کشت پسته در اکثر نقاط استان است. همگرایی نتایج حاصل از سه مدل مختلف، با وجود تفاوت در مبانی نظری آن‌ها، اعتبار یافته‌ها را در شناسایی مناطق مستعد (به ویژه جنوب و غرب استان) تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که نتایج این پژوهش از استحکام بالایی برخوردار است.



شکل ۱۱- نقشه میانگین بلندمدت نیاز سرمایی پسته بر اساس مدل یوتا برای دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۱ (واحد: واحد یوتا)

نتیجه‌گیری

انتخاب ارقام متناسب با شرایط اقلیمی منطقه، سنگ بنای یک باغداری پایدار و اقتصادی است. در مورد محصول استراتژیکی مانند پسته، توجه به نیاز سرمایی به عنوان یکی از اصلی‌ترین فیلترهای اقلیمی، امری ضروری است. این پژوهش با هدف پهنه‌بندی تناسب اقلیمی کشت پسته در استان خراسان رضوی و با استفاده از داده‌های دمای بازتحلیل با قدرت تفکیک بالای ERA5-Land و سه مدل مختلف نیاز سرمایی برای دوره ۳۱ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۱) انجام شد. نتایج اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

۱. بخش‌های وسیعی از استان خراسان رضوی، به‌ویژه مناطق جنوبی و غربی (شامل شهرستان‌های بردسکن، خلیل‌آباد،

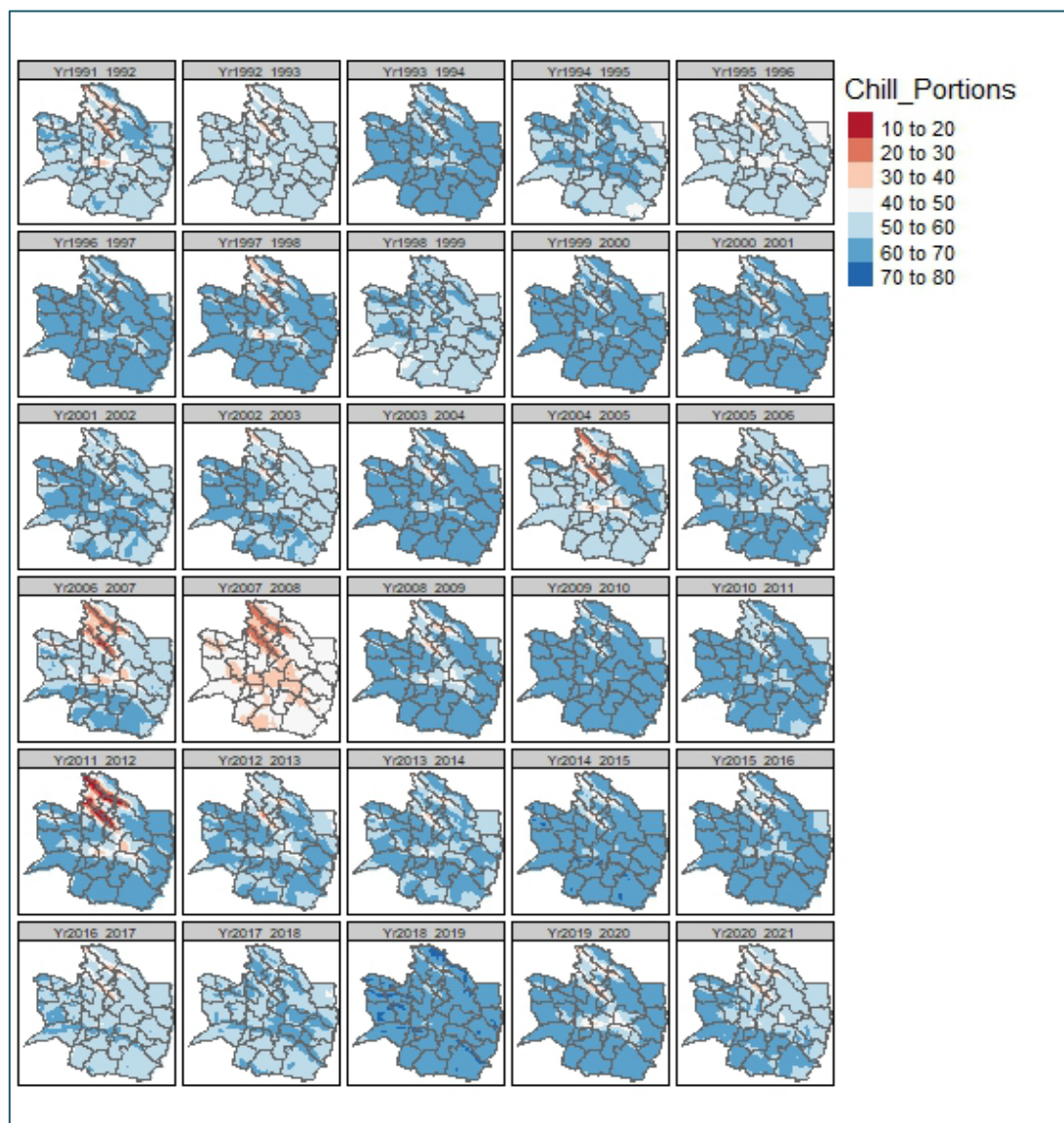
کاشمر، مهاباد و گناباد)، دارای پتانسیل اقلیمی بالا و قابل اطمینانی برای تأمین نیاز سرمایی ارقام مختلف پسته هستند. بر اساس مدل ساعات سرمایی، اغلب این نقاط توانایی تأمین بیش از ۸۰۰ ساعت سرمایی را با احتمال وقوع بالا دارند که برای کشت ارقام تجاری مانند احمدآقایی و اوحدی بسیار مناسب است.

۲. مناطق جنوبی و غربی استان با احتمال ۷۵ درصد، قادر به تأمین نیاز سرمایی بیش از ۱۰۰۰ ساعت هستند که این امر کشت رقم دیرگل و بازارپسند اکبری را در این مناطق توجیه‌پذیر و کم‌ریسک می‌سازد.

۳. تحلیل روند نشان داد که برخلاف نگرانی‌های ناشی از گرمایش جهانی، در بخش‌های مهمی از مناطق پسته‌کاری

۴. مقایسه نتایج مدل‌های مختلف (ساعتی، یوتا و دینامیک) همخوانی کلی در شناسایی مناطق مستعد را نشان داد و اعتبار یافته‌ها را تقویت کرد. این امر نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده، مبنای علمی محکمی برای تصمیم‌گیری‌های کاربردی فراهم می‌کند.

استان (شرق و غرب)، روند افزایشی معناداری در ساعات سرمایی مؤثر مشاهده می‌شود. این پدیده می‌تواند فرصت‌های جدیدی برای توسعه باغات پسته و کشت ارقام پرنیازتر در مناطقی که پیش از این کمتر مورد توجه بوده‌اند، فراهم آورد.



شکل ۱۲- نقشه میانگین بلندمدت نیاز سرمایی پسته بر اساس روش دینامیک برای دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۱ (واحد: بخش سرمایی)

- probability of satisfying the chill requirements. Environmental and Experimental Botany, 64(2), 162-170.
- Baldocchi, D., & Wong, S. (2008). Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. Climatic Change, 87(S1), 153-166.
 - Bastan, M., Khorshid-Doust, R. R., Sisi, S. D., & Ahmadvand, A. (2018). Sustainable Development of Agriculture: A System

منابع

- Ahmadi, A. (2019). Chilling requirement and its importance in fruit trees. Atieh Sazan Mah Neshan Publication. [In Persian].
- Albuquerque, N., García-Montiel, F., Carrillo, A., & Burgos, L. (2008). Chilling and heat requirements of sweet cherry cultivars and the relationship between altitude and the

11. Luedeling, E., Zhang, M., & Girvetz, E. H. (2009). Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950–2099. *PloS one*, 4(7), e6166.
12. Ministry of Jihad-e Agriculture. (2017). Agricultural profile of Khorasan Razavi Province.
13. Pouyanfar, N., Mozaffari, G., Omidvar, K., & Mazidi, A. (2022). Trend of changes in pistachio chilling requirement and its prediction using the SDSM model (Case study: Yazd). *Geography and Planning*, 26(80), 45–60.
14. Richardson, E. A., Seeley, S. D., & Walker, D. R. (1974). A model for estimating the completion of rest for 'Redhaven' and 'Elberta' peach trees. *HortScience*, 9(4), 331-332.
15. Sabziparvar, A., & Nowruz-Valashadi, R. (2015). Effect of climate change on the trend of meeting chilling requirements of deciduous plants (Case study: Hamedan province). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 29(3), 358–367.
16. Samkhaniyani, A., & Mohammadi, A. (2022). Comparison of ERA5-Land reanalysis data with ground observations in Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 16(1), 195–212.
17. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- Dynamics Model. *Kybernetes*, 47(8), 1611-1632.
5. Erez, A., Fishman, S., Linsley-Noakes, G. C., & Allan, P. (1989). The dynamic model for rest completion in peach buds. In II International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management, 276, 165-174.
6. Eslami, M., Hasheminejad, H., Heidari, M., & Bazmandegan, M. (2019). Investigation of the effects of climate change on the chilling requirement of pistachio trees in Rafsanjan region. *Proceedings of the 6th Regional Conference on Climate Change*, Tehran, Iran.
7. Falah Ghalhari, G., & Ahmadi, H. (2018). Analysis of chilling accumulation patterns in cold regions of Iran based on CH, Utah, CP, and P models. *Geography and Development*, 16(51), 99–120.
8. Hokmabadi, H., & Javanshah, A. (2006). Meeting chilling requirements and its importance in pistachio. *Iran Pistachio Research Institute*.
9. Javanshah, A., Esmacilizadeh, M., Parsaei, M., & Esmaili Ranjbar, A. (2004). Determination of chilling requirements of three commercial pistachio cultivars (Akbari, Ohadi, and Kalleh Ghochi). *Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)*.
10. Luedeling, E., Kunz, A., & Blanke, M. M. (2013). Identification of chilling and heat requirements of cherry trees- a statistical approach. *International Journal of Biometeorology*, 57(5), 679-689.