Doi: 10.22034/IAES.2025.2058542.2122

اقتصاد کشاورزی/جلد ۲۰/شماره۲/صفحه های۴۱-۱

تحلیل اقتصادی کشت سماق به منظور افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر خشکسالی

وحید کلانتر، سید حبیب اله موسوی، حامد نجفی علمدارلو[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های بخش کشاورزی، تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر عملکرد محصولات زراعی و باغی دارد. سماق به عنوان یک گونه گیاهی دارویی و صنعتی، مقاومت بالایی در برابر خشکسالی از خود نشان می‌دهد. این مطالعه با هدف بررسی سازگاری‌های فیزیولوژیکی و مولکولی سماق در شرایط تنش آبی و ارزیابی پتانسیل آن به عنوان یک گیاه مقاوم به خشکسالی در کشاورزی پایدار انجام شده است. در این پژوهش، ابتدا به پیش‌نگری اقلیم در دورهٔ آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ در دشت همدان-بهار انجام گردید. سپس، شدت و فراوانی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی در سه بازه زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه ارزیابی شد. در ادامه، با توسعه یک مدل اقتصادی برای دشت مذکور، اثرات تغییرات اقلیمی و خشکسالی بر سود خالص کشاورزان شبیه سازی و الگوهای کشت بهینه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهند که باتوجه‌به روند روبه‌افزایش خشکسالی در دشت مذکور، منابع آب زیرزمینی به‌شدت تحت‌فشار قرار گرفته است. با شبیه‌سازی دقیق سناریوهای خشکسالی آتی و اعمال مدیریت‌های آبیاری متنوع در مدل شبیه‌سازی شده دشت مورد مطالعه، افزایش قابل توجهی در سطح زیر کشت محصول سماق به میزان ۹۱ هکتار مشاهده و همچنین این گسترش سطح زیر کشت، به طور مستقیم منجر به ارتقای ۱۴/۳۸ میلیارد تومانی سود خالص بخش کشاورزی در منطقه خواهد شد. بااین‌حال، کشت سماق به‌عنوان گیاهی مقاوم به خشکی، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار سازگار با شرایط اقلیمی جدید، موجب افزایش سود خالص کشاورزان و پایداری تولید در منطقه شود. همچنین این مقاله میتواند برای سیاست گذاران و کشاورزان منطقه موثر واقع شود.

طبقه‌بندی JEL: Q12، Q15، Q25، Q54، O13

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، دشت همدان-بهار، سطح زیرکشت، سماق، سود خالص

[۱] به‌ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد (نویسنده مسئول)، دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران.
Email: shamosavi@modares.ac.ir

مقدمه

پدیده خشکسالی از جمله مهم‌ترین پیامدهای تغییرپذیری اقلیم، می‌تواند سالانه آسیب و زیان‌های بسیاری بر بوم‌سامانه‌ها و جامعه انسانی تحمیل کند. این چالش که در قالب‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی - اقتصادی بروز می‌یابد، با کاهش بارش، افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش رطوبت خاک و در نهایت، اختلال در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی همراه خواهد بود (Upadhyay, 2020; Amanambu et al. 2020; Idrees et al. 2022; Suleymanov, 2024; Ehtasham et al. 2024). اگرچه خشکسالی هواشناسی به‌عنوان نقطه آغازین این فرآیند به‌شمار آیند، اما اثرگذاری‌های آن بر مؤلفه‌های هیدرولوژیک و بوم‌شناختی ، چالش‌های بسیاری ایجاد می‌کند (Zhang et al. 2022). با توجه به تغییرپذیری اقلیمی پیش‌نگری شده، شدت و فراوانی رخداد خشکسالی‌ها افزایش یافته و این امر، تهدیدهای جدی برای امنیت آبی و مواد غذایی جامعه بشری به همراه خواهد داشت (Saleem et al. 2024). بنابراین، گسترش مدل‌های پیش‌نگری دقیق و قابل اعتماد برای برآورد خشکسالی و ارزیابی اثرگذاری‌های آن، ضرورتی پرهیزناپذیر است. طی دو دهه اخیر، پژوهش‌های اقتصادی متعدد به شبیه‌سازی و پیش‌نگری اثرگذاری‌های تغییر اقلیم بر شاخص‌های کلیدی رفاه همچون کشاورزی، صنعت، سلامت عمومی، تقاضای انرژی و رشد اقتصادی پرداخته‌اند (Zhang et al. 2017; Kolstad & Moore, 2020; Andersson et al. 2020; Farajzadeh et al. 2022; Raihan, 2023; Dasgupta et al. 2023; Saleem et al. 2024). در دهه‌های اخیر راهکارهای بسیار مختلفی برای سازگاری با آن در سطح جهان گسترش یافته است. از مهم‌ترین رویکردها می‌توان به به‌کارگیری روش‌ها و فناوری‌های نوین آبیاری کم‌آب‌بر مانند آبیاری قطره‌ای و زیرسطحی (Pereira et al. 2023)، استفاده از ارقام و گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی (Bandurska, 2022)، بهبود مدیریت مزرعه از راه زمان‌بندی بهینه کاشت (Belaqziz et al. 2021) و تغییر الگوی کشت (Ghaffar et al. 2022)، و گسترش نظام‌های پیش‌نگری و هشدار زودهنگام خشکسالی (Yildirim et al. 2022) اشاره کرد. همچنین، اجرای طرح‌های آبخیزداری و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها (Woldearegay et al. 2024)، بازچرخانی و بهره‌گیری دوباره از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی (Kaur et al. 2022) از جمله اقدام‌های کارآمد خواهند بود. ترکیب این راهکارها با سیاست‌های

حمایتی، آموزش کشاورزان و بهره‌گیری از سامانه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب، می‌تواند تاب‌آوری جامعه‌های کشاورزی را در برابر خشکسالی به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

تغییرپذیری‌های اقلیم در سطح جهانی چالش‌های نوینی را پیشروی ایران، به‌ویژه در بخش حیاتی کشاورزی، قرار داده است (Nouri et al. 2023). این چالش نه تنها بر کشاورزی بلکه بر همه جنبه‌های اقتصاد کشور تأثیرگذار خواهد بود (Shahpari et al. 2023). با توجه به اهمیت روزافزون مسئله کمبود آب و خشکسالی در ایران، پژوهش‌های بسیاری به بررسی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی بر منابع آبی و کشاورزی این کشور پرداخته‌اند (زین‌الدینی و همکاران، ۱۳۹۸؛ یوسفی و همکاران، ۱۳۹۸؛ رحیمی و زارعی، ۱۳۹۸؛ برائی نژاد و همکاران، ۱۳۹۹؛ ذرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰؛ نوری و همکاران، ۱۴۰۱؛ میان‌آبادی و داوری، ۱۴۰۲؛ سراج ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۲). این پژوهش‌ها بیشتر بر ارزیابی تغییرپذیری بارندگی، دما و شاخص‌های خشکسالی متمرکز بوده و نشان از افزایش شدت و فراوانی رویدادهای خشکسالی در بسیاری از منطقه‌های مختلف کشور دارند. بااین‌حال، ارزیابی جامع و اقتصادی از پیامدهای خشکسالی و ارائه راهکارهای سازگاری با آن، همچنان به‌عنوان یک چالش مهم در مدیریت منابع آب ایران مطرح است. در ایران، با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و تداوم کاهش منابع آب تجدیدپذیر، راهکارهای بسیاری برای سازگاری با خشکسالی در بخش‌های مختلف به‌کار گرفته شده است. در حوزه کشاورزی، گسترش سامانه‌های آبیاری با فشار (طالب‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۰)، آبیاری نواری و قطره‌ای (قدمی فیروزآبادی و اکبری، ۱۴۰۲)، و گسترش کشت گونه و رقم‌های مقاوم به خشکی (طوبی‌نژاد و صادقی، ۱۳۹۷) از مهم‌ترین اقدام‌ها بوده است. در مدیریت منابع آب، طرح‌های تعادل‌بخشی آبخوان‌ها (پورفلاح و همکاران، ۱۳۹۸)، انسداد چاه‌های غیرمجاز (صلاحی و همکاران، ۱۳۹۶) و استفاده از پساب تصفیه‌شده برای آبیاری مزارع (قلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷) مورد توجه قرار گرفته است. افزون به این، بهینه‌سازی الگوی کشت متناسب با شرایط هر منطقه (جمی و همکاران، ۱۳۹۹)، به‌کارگیری روش‌های نوین مانند کشاورزی هوشمند (روستایی و همکاران، ۱۴۰۰)، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای مدیریت مزرعه (کهخاکهن و همکاران، ۱۳۹۸) و اجرای سیاست‌های حمایتی مانند بیمه محصول‌های کشاورزی در برابر خشکسالی (اخگری و قاسمیان‌مقدم، ۱۴۰۲)، از دیگر اقدامات کلیدی به‌شمار می‌روند که می‌تواند اثربخشی این اقدامات را در شرایط اقلیمی آینده ایران افزایش دهد. در این پژوهش، با هدف ارزیابی اثرگذاری

اقتصادی تغییر الگوی کشت به سمت گیاهان مقاوم به خشکسالی، دشت همدان-بهار به‌عنوان پژوهش موردی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

همان‌طور که پیش‌نگری شده‌است، پدیده‌های کاهش بارندگی و افزایش دما به‌عنوان پیامدهای تغییرپذیری اقلیم، همچنان در آینده‌ای نزدیک بر اکثر دشت‌های ایران، از جمله دشت همدان - بهار، حاکم خواهند بود (Soltani et al. 2023; Ershadfath et al. 2023). این دشت پهناور که مساحتی بالغ بر ۲۴۵۹ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد، در دامنه شمالی کوهستان الوند گسترده شده است. حدود ۴۹ هزار هکتار از اراضی این منطقه به کشت آبی اختصاص یافته است (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). بر مبنای مشاهدهای سازمان هواشناسی استان همدان، منطقه موردپژوهش طی سال‌های اخیر با روند افزایشی دما و کاهش محسوس بارندگی روبه‌رو بوده است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۲). تداوم این روند اقلیمی، می‌تواند بر الگوهای کشت و تولید محصول‌های کشاورزی تأثیرگذار بوده و منجر به افزایش چالش‌ها و عدم قطعیت‌های متعدد در تولیدهای غذایی شود. نوسان‌های ناشی از تغییرپذیری اقلیمی در عرضه محصول‌های کشاورزی، به طور مستقیم بر زندگی و رفاه تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان تأثیرگذار بوده و پایداری نظام‌های کشاورزی را تهدید می‌کند. در این دشت، برای سازگاری با خشکسالی، مجموعه‌ای از راهبردها مبتنی بر شواهد و کاربردی اجرا و ترویج شده است؛ از جمله تغییر الگوی کشت (سلطانی و همکاران، ۱۴۰۲)، گسترش بهینه کشت رقم‌های و گونه‌های مقاوم به خشکی (کلانتر و همکاران، ۱۴۰۴)، کنترل و مدیریت برداشت آب از منابع زیرزمینی (سلطانی ذوقی و حاجی رحیمی، ۱۳۹۷)، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز (گنجائیان و همکاران، ۱۳۹۸)، کاهش ضایعات محصول های کشاورزی (سلطانی و همکاران، ۱۴۰۲)، اقدامات لازم جهت تعادل آبخوان (اسدآبادی و همکاران، ۱۳۹۸)، بهره‌گیری از سامانه‌های پایش و هشدار زودهنگام خشکسالی مبتنی بر داده‌های معتبر محلی و ماهواره‌ای و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی کاشت و آبیاری (نیاستی و همکاران، ۱۴۰۰)، سامانه‌های نوین آبیاری (معززی و همکاران، ۱۳۹۹)، تغییر تاریخ کشت محصول‌های (افروزی و زارع ابیانه، ۱۳۹۹)، بهبود راندمان آبیاری (معززی و همکاران، ۱۴۰۰). این مجموعه راهکارها که بر ترکیب مداخلات فنی، مدیریتی و نهادی تکیه دارد، هدف‌گذاری شده‌اند تا تاب‌آوری کشاورزیِ دشت همدان - بهار را در سازگاری با خشکسالی‌های آتی افزایش دهند.

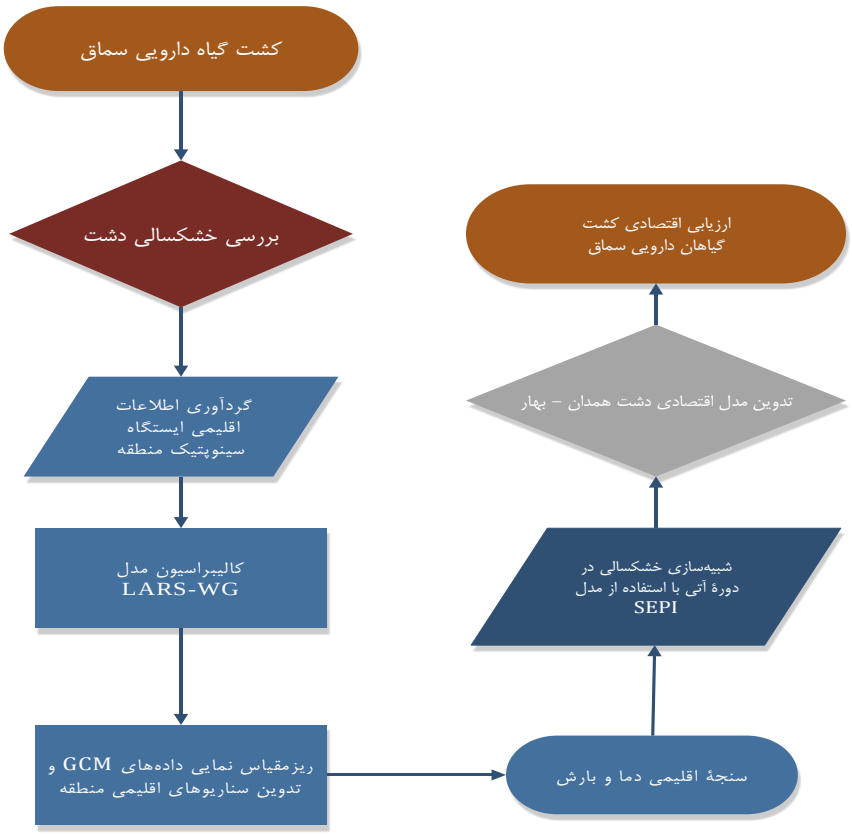
انسان به‌عنوان عضوی جدایی‌ناپذیر از طبیعت، همواره در طول تاریخ حیات خود به گیاهان دارویی به‌عنوان یک منبع غنی برای درمان بیماری‌ها تکیه کرده است. شایان یادآوری است که حدود ۸۰ درصد از گیاهان دارویی شناخته شده در جهان، قابلیت کشت در مناطق مختلف ایران را دارا بوده و تحقیقات نشان می‌دهد که بیش از ۲۳۰۰ گونه گیاهی در ایران دارای خواص دارویی، عطری، ادویه ای و آرایشی و بهداشتی می‌باشند (کاووسی کلاشمی و همکاران، ۱۴۰۱). گونۀ سماق (*Rhus coriaria L.*) از تیرۀ Anacardiaceae از خانواده پسته‌ایان منطقه دشت همدان - بهار است و میوۀ آن که منبع قوی برای تانن‌های قابل آبکافت است، به‌صورت سنتی به‌عنوان غذا و مصارف دارویی استفاده می‌شود (Pourahmad et al. 2010). در ایران، سطح زیرکشت سماق حدود ۲۶۷۵ هکتار برآورد شده است که نشان‌دهنده جایگاه حائز اهمیت این گونه در میان گیاهان دارویی مقاوم به خشکی است (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). همچنین، بر مبنای گزارش‌های سازمان کشاورزی و خواربار ملل متحد
[1]، ارزش تجاری سماق در بازار جهانی حدود ۶۰ میلیون دلار برآورد می‌شود که بیانگر توان بالقوه اقتصادی شایان‌توجه این محصول در بازارهای بین‌المللی است (FAO, 2023). سماق، به‌عنوان یک گیاه دارویی با ارزش اقتصادی بالا، در مناطق گرمسیری آسیا جایگاه شایان دارد. با توجه به تشدید تغییرپذیری اقلیمی همچون خشکسالی‌های شدید، بارش‌های سنگین، امواج گرما و سرما، نگرانی‌ها در خصوص تأثیر این تغییرپذیری بر زیستگاه، پراکنش و چرخه زیستی سماق افزایش یافته است. این تغییرپذیری اقلیمی پتانسیل آن را دارند تا شرایط زیستی این گونه ارزشمند را به مخاطره انداخته و بقای آن را تهدید کنند (Aguirre-Liguori et al. 2020 ; Ramírez-Preciado et al. 2019). ادبیات موجود در زمینه سازگاری با تغییر اقلیم، به طور سنتی بر راهبردهای متداول همچون مدیریت منابع آبی و تغییر الگوی کشت محصول‌های عمده تمرکز داشته است. با این حال، پتانسیل کشت گیاهان دارویی، به ویژه گیاهانی با تحمل بالا به تنش‌های محیطی مانند سماق، به‌عنوان یک راهبرد نوین و پایدار برای سازگاری با اثرگذاری‌های نامطلوب تغییرپذیری اقلیمی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مرور ادبیات تحقیق، مطالعات پیشین عمدتاً بر راهکارهای فنی و مدیریتی سازگاری با خشکسالی متمرکز بوده و کمتر به ارزیابی جامع کشت گیاهان دارویی به‌عنوان یک راهبرد

[1] Food and Agriculture Organization (FAO)

اقتصادی - اقلیمی پرداخته‌اند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی این فرضیه طراحی شده است که آیا کشت گیاهان دارویی نظیر سماق می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای سازگاری با تغییرپذیری اقلیمی و بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان عمل کند؟ برای پاسخ به این پرسش، ابتدا ماهیت تغییر اقلیم و خشکسالی در منطقه مورد پژوهش در دورهٔ آتی ۲۰۲۶ الی ۲۰۵۰ مورد تجزیه‌وتجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. سپس، با گسترش یک مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با شرایط مدیریت آبیاری، اثرگذاری‌های اقتصادی-اجتماعی گسترش کشت سماق بر الگوی کشت و درآمد کشاورزان شبیه‌سازی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیران در تدوین سیاست‌های مناسب برای ارتقای پایداری سامانه و نظام کشاورزی در رویارویی با تغییرپذیری اقلیمی کمک کند. با توجه به اهمیت اطمینان از موفقیت اجرای این راهبرد، این پژوهش همچنین به بررسی عامل‌های مؤثر بر پذیرش کشت سماق توسط کشاورزان می‌پردازد.

روش تحقیق

پژوهش‌های بسیاری در زمینه خشکسالی (Li et al. 2020; Mokhtar et al. 2021; Laimighofer & Laaha, 2022; Gumus, 2023; Zarei et al. 2023; Burić et al. 2024) نشان می‌دهند که برای پاسخگویی به پرسش‌های تحقیق در این زمینه، در آغاز ضروری است تغییر اقلیم در دشت مورد پژوهش آشکارسازی شود. به عبارت دیگر، باید روند تغییرپذیری فراسنجه‌های اصلی اقلیمی یعنی دما و بارش با پیش‌فرض‌های مختلف و محتمل تغییر اقلیم و نیز دوره‌های زمانی مختلف، با بهره‌گیری از روش‌های علمی پیش‌نگری و تجزیه‌وتجزیه‌وتحلیل شود. این امر به محققان کمک می‌کند تا درک بهتری از اثرگذاری‌های احتمالی خشکسالی در آینده داشته باشند و بتوانند راهکارهای مناسبی برای سازگاری با آن ارایه دهند.



شکل (۱) فرایند روش‌شناسی پژوهش

Figure (1) Research methodology flowchart

شکل (۱) روند فرایند این پژوهش حاضر را نشان می‌دهد که آیا مرحله‌های مختلف تجزیه‌وتجزیه‌وتحلیل کشت گیاه دارویی سماق برای سازگاری با خشکسالی را نشان می‌دهد. در مرحله نخست، داده‌های هواشناسی مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ از سازمان هواشناسی کشور گردآوری شد. این داده‌ها آنگاه برای واسنجی مدل آماری LARS-WG مورد استفاده قرار گرفتند تا بتوان

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی GCM انجام و پیش‌فرض‌های اقلیمی مربوط به منطقه دشت همدان-بهار تدوین شود. بر مبنای این پیش‌فرض‌ها، پیش‌نگری اقلیمی برای دوره آتی ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰ صورت پذیرفت. در گام بعد، با استفاده از نتایج مدل LARS-WG، ارزیابی و پیش‌نگری خشکسالی منطقه با بهره‌گیری از شاخص SPEI انجام شد. نهایتاً، با توجه به روندهای خشکسالی پیش‌نگری‌شده، مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی گسترش یافت تا اثرگذاری‌های پیش‌فرض‌های مختلف تغییر میزان آبیاری بر الگوی کشت تجزیه‌وتحلیل شود. این روش‌شناسی، امکان بررسی قابلیت کشت سماق به عنوان یک گیاه دارویی مقاوم به خشکی و دستیابی به اهداف پژوهش را فراهم آورد.

مدل LARS-WG به‌عنوان یک ابزار توانمند در تولید داده‌های هواشناسی شناخته شده‌است که قابلیت تولید داده‌های روزانه‌ای از جمله بارش و دماهای کمینه و بیشینه را در یک ایستگاه هواشناسی، با پیش‌فرض‌های مختلف اقلیمی فراهم می‌آورد (Esteve et al. 2015 ; Rasco et al. 1991). در این پژوهش، با هدف پیش‌نگری مقدارهای بارش و دما در ایستگاه همدید فرودگاه (همدان)، واقع در دشت همدان - بهار، از مدل مولد داده‌های تصادفی هواشناسی LARS-WG بهره گرفته شد. به این منظور، داده‌های بدست‌آمده از سناریوی مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک[1] (SSP) در مدل گردش عمومی جو CMIP6[2] به‌عنوان ورودی مدل LARS-WG مورداستفاده قرار گرفت.

پس از ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ضریب تعیین[3]، ضریب نش - ساتکلیف[4] (NSE)، میانگین خطای مطلق[5] (MAE)، میانگین انحراف خطا[6] (MBE) و خطای جذر میانگین مربعات[7] (RMSE) با هدف تولید پیش‌فرض‌های اقلیمی آینده، خروجی‌های مدل گردش عمومی جو (AOGCM) با سه سناریوی انتشار مشترک (SSP1.26، SSP2.45 و SSP3.70) استخراج شد. پیش‌فرض‌های مورد پژوهش با استناد به نتایج پژوهش‌های پیشین و به‌منظور پوشش طیف گسترده‌ای از تغییرپذیری اقلیمی با رویکردی هدفمند انتخاب شدند. این انتخاب بر پایه نتایج بدست‌آمده از تحقیقات سرابی و همکاران (۱۳۹۹)، محمدی و همکاران (۱۴۰۲)، ساری صراف و

[1] Shared Socioeconomic Pathways
[2] Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
[3] Roefficient of Determination
[4] Nash-Sutcliffe Efficiency
[5] Mean Absolute Error
[6] Mean Bias Error
[7] Root-Mean-Square Deviation

همکاران (۱۴۰۲)، خان سالاری و محمدی (۱۴۰۲)، نعمتی شیشه‌گران و همکاران (۱۴۰۳) و رضایی و همکاران (۱۴۰۳) صورت پذیرفت که در آن‌ها، جنبه‌های مختلف تغییرپذیری اقلیمی با استفاده از روش‌های گوناگون مورد بررسی و تجزیه‌وتجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند. در مطالعات زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰)، سلطانی و همکاران (۱۴۰۲)، احمدی و کمانگر (۱۴۰۲)، کدخدا و همکاران (۱۴۰۲)، مازندرانی و شکوهی‌فر (۱۴۰۲)، احمدی و محمدی‌مهر (۱۴۰۳)، جوان و عزیززاد (۱۴۰۳) و کلانتر و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از مدل GFDL-ESM4 نتایج دقیقی در بازتولید بارش و دما به‌دست آوردند. این نتایج نشان می‌دهد انتخاب این مدل برای دشت همدان - بهار نه‌تنها از نظر به‌روز بودن و همخوانی با چارچوب گزارش ششم IPCC (CMIP6) توجیه‌پذیر است، بلکه با توجه به شباهت‌های اقلیمی منطقه با نتایج پژوهش‌های پیشین، از پشتوانه تجربی و اعتبار علمی کافی برخوردار بوده‌است. آنگاه، با محاسبهٔ هفت متغیر کلیدی آب‌وهوایی شامل تغییرپذیری نسبی بارش و طول دوره‌های تر و خشک، تغییرپذیری مطلق دمای کمینه و بیشینه، تغییرپذیری نسبی نوسان‌های دمایی روزانه و تغییرپذیری مطلق تابش، پیش‌فرض‌های اقلیمی برای سه دوره آینده نزدیک، میان‌مدت و دور مدت تدوین شدند. رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برای محاسبهٔ اختلاف دمای کمینه و بیشینه و نسبت بارش دوره‌های آینده و پایه مورداستفاده قرار گرفت.

$$\Delta T_{i,Min} = \left(\overline{T}_{Min(GCM,Fut,i)} - \overline{T}_{Min(GCM,Base,i)}\right) \quad (۱)$$

$$\Delta T_{i,Max} = \left(\overline{T}_{Max(GCM,Fut,i)} - \overline{T}_{Max(GCM,Base,i)}\right) \quad (۲)$$

$$\Delta P_i = \frac{\overline{P}_{GCM,Fut,i}}{\overline{P}_{GCM,Base,i}} \quad (۳)$$

در رابطه‌های ارائه شده، متغیرهای ΔP_i، $\Delta T_{i,Min}$ و $\Delta T_{i,Max}$ به‌عنوان ورودی‌های مدل برای شبیه‌سازی تغییرپذیری اقلیمی در بارش، دمای کمینه و بیشینه به کار رفته‌اند $1 \le i \le 12$. مجموع بارش شبیه‌سازی شده در دوره‌های آینده (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و پایه (۲۰۱۴-۲۰۲۲) به ترتیب با $\overline{P}_{GCM,Fut,i}$ و $\overline{P}_{GCM,Base,i}$ نشان داده شده و برای محاسبه تغییرپذیری بارش به کار رفته است. همچنین، میانگین دمای کمینه و بیشینه شبیه‌سازی شده در دوره‌های آینده و پایه به ترتیب با $\overline{T}_{Min(GCM,Fut,i)}$ و $\overline{T}_{Min(GCM,Base,i)}$ نشان داده شده و برای ارزیابی تغییرپذیری دما استفاده شده است.

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی خشکسالی، از شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق[1] (SPEI) استفاده شد. شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) از جمله ابزارهای دقیق و کارآمد در ارزیابی و پایش خشکسالی است که در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته است (Namazi et al. 2024). با محاسبه SPEI، می‌توان به طور دقیق‌تر تغییرپذیری در بیلان آبی را شناسایی کرده و مناطق مستعد خشکسالی را مشخص نمود (Mokhtar et al. 2021). این شاخص همچنین به‌عنوان ابزاری توانمند در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزیابی اثرگذاری‌های تغییرپذیری اقلیم بر منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور، در آغاز داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل[2] (PET) به صورت ماهانه برای دوره زمانی مورد پژوهش گردآوری شد. سپس، اختلاف بارش و تبخیر و تعرق توان بالقوه (P-PET) محاسبه و مجموع تجمعی آن برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه تعیین شد. برای محاسبه شاخص SPEI، توزیع لگ-لجستیک سه فراسنجه‌ای بر داده‌های مجموع تجمعی P-PET برازش داده شد و فراسنجه‌های آن با استفاده از روش گشتاورهای L برآورد شد. سرانجام، داده‌های مجموع تجمعی P-PET با استفاده از توزیع احتمال برازش‌شده، استانداردسازی شدند تا شاخص SPEI با میانگین صفر و انحراف معیار یک بدست‌آمده شود. برای درک عمیق‌تر فرایند مدلسازی و دستیابی به اطلاعات تکمیلی، مراجعه به منابع یادشده تاکید می‌شود (Vicente-Serrano et al. 2010; Mokhtar et al. 2021; Zhang et al. 2022; Namazi et al. 2024; An et al. 2024; Shen et al. 2024). محاسبه‌ها با استفاده از نرم‌افزار R انجام گرفت.

در این پژوهش، با هدف ارزیابی اثرگذاری‌های راهبرد کشت گیاه دارویی سماق که گیاهی مقاوم به خشکی بر مدیریت منابع آب کشاورزی در دشت همدان - بهار با پیش‌فرض‌های تغییر اقلیم، از مدل گسترش یافته اقتصادی دشت یادشده بهره گرفته شد. در واقع، با توجه به نتایج پژوهش سلطانی و همکاران (۱۴۰۱)، ساختار این مدل به‌گونه‌ای طراحی شده است که با درنظرگرفتن توابع هدف و محدودیت‌های چندی، امکان تجزیه‌وتحلیل واکنش کشاورزان به تغییرپذیری احتمالی در شرایط محیطی و بازار، ارزیابی سیاست‌های کشاورزی و بررسی پیامدهای اقتصادی این سیاست‌ها را فراهم می‌آورد.

[1] Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
[2] Potential evapotranspiration

در این پژوهش، از مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی[1] (PMP) در قالب نسخه گسترش‌یافته برای تجزیه‌وتجزیه‌وتحلیل سیاست‌های منطقه‌ای ارائه شد که از سه مرحله متمایز تشکیل شده است. در آغاز، الگوی کشت بهینه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های اعتبارسنجی و منابع موجود، محاسبه شد. سپس، مقدارهای دوگان بدست‌آمده از این مرحله، فراسنجه‌های تابع هدف غیرخطی را تعیین کردند. سرانجام، تابع هدف اعتبارسنجی شده در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به‌منظور تجزیه‌وتحلیل سیاست‌ها به کار گرفته شد، که در آن تابع تولید غیرخطی به عنوان جزء اصلی تابع هدف لحاظ شد. این مدل با استفاده از روش بیشینه آنتروپی اعتبارسنجی شده و قادر به بازتولید سطح‌های فعالیت‌های مشاهده شده و مقدارهای دوگان محدودیت‌های منابع است، که نشان‌دهنده دقت و قابلیت اطمینان مدل در تجزیه‌وتحلیل سیاست‌های مختلف است. مدل PMP نخستین‌بار توسط هاویت[2] در سال ۱۹۹۵ معرفی شد و هدف آن رفع مسئله اختلاف بین الگوی کشت مشاهده‌شده و الگوی بهینه مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، از طریق کالیبراسیون مدل بر مبنای داده‌های واقعی، بوده‌است[3] (Howitt, 1995; Heckelei & Britz, 2000; Howitt, 2005; Caputo & Paris, 2008; Blanco et al. 2008; Cortignani & Severini, 2009; Liu et al. 2020; Bashiri et al. 2021; Petsakos & Rozakis, 2022; Soltani et al. 2023).

الگوی غیرخطی واسنجی شده یادشده، موفق به بازتولید دقیق سطح‌های فعالیت‌های مشاهده شده در سال پایه زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و مقدارهای دوگان محدودیت‌های منابع شده است و بدین ترتیب، برای شبیه‌سازی تغییرپذیری در فراسنجه‌های مطلوب به‌طور کامل آماده است. ترکیب‌بندی مدل گسترش‌یافته مورد استفاده در دشت یادشده به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Max} \quad \omega = \sum_{i=1}^{18} X_i(P_i Y_i - C_i) + X_s(P_s Y_s - C_s) \tag{۴}$$

st:

$$\sum_{i=1}^{18} X_i \le Tl, \qquad X_s \le Tl \rightarrow \sum_{i=1}^{19} X_i + X_s \le TI \tag{۵}$$

[1] Positive Mathematical Programming Model

[2] Howitt

[3] برای اطلاع از نحوه مدلسازی و کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه، می‌توانید به مطالعات ذکر شده مراجعه فرمایید؛ در این مطالعات، جزئیات مربوط به روش‌های مختلف مدلسازی، داده‌های مورد استفاده، و نتایج حاصل از تحلیل‌ها به تفصیل شرح داده شده است.

$$\sum_{i=1}^{18} W_i X_i \le TWater, \qquad W_s X_s \le TWater \rightarrow \sum_{i=1}^{19} W_i X_i + W_s X_s \le TWater \tag{۶}$$

$$\sum_{i=1}^{18} L_i X_i \le Tlabor, \qquad L_s X_s \le Tlabor \rightarrow \sum_{i=1}^{19} L_i X_i + L_s X_s \le Tlabor \tag{۷}$$

$$\sum_{i=1}^{18} T_i X_i \le TMachin, \qquad T_s X_s \le TMachin \rightarrow \sum_{i=1}^{19} T_i X_i + T_s X_s \le TMachin \tag{۸}$$

$$\sum_{i=1}^{18} F_i X_i \le TFeltilizer, \qquad F_s X_s \le TFeltilize \rightarrow \sum_{i=1}^{19} F_i X_i + F_s X_s \le TFeltilize \tag{۹}$$

$$\sum_{i=1}^{18} K_i X_i \ge TInvest, \qquad K_s X_s \le TInvest \rightarrow \sum_{i=1}^{19} K_i X_i + K_s X_s \le TInvest \tag{۱۰}$$

$$X_i, X_s \ge 0 \tag{۱۱}$$

که در رابطه‌های بالا، ω بازده ناخالص سالانه بدست‌آمده از کل فعالیت‌های زراعی در منطقه، X میزان سطح زیر کشت محصول‌های کشاورزی برحسب هکتار، P قیمت محصول‌های کشاورزی، Y عملکرد محصول‌های کشاورزی بر حسب کیلوگرم بر هکتار (kg/ha)، C شامل کل هزینه‌های تولید در یک هکتاری برای هر محصول و نمایه‌های i مربوط به محصول‌های کشاورزی درون الگوی کشت پایه و s مربوط به محصول سماق کشت‌شده، در منطقه مورد پژوهش است. علاوه بر این، TI، TWater، Tlabor، TMachin، TFeltilizeو TInvest به ترتیب مقدار کل منابع زمین، آب، نیروی کار، ماشین‌آلات، کود و سرمایه در دسترس برای فعالیت‌های زراعی محصول‌های مدنظر در منطقه مورد پژوهش را نشان می‌دهند. رابطه‌های (۵) الی (۱۰) محدودیت نهاده‌های مصرفی لحاظ شده در مدل برای تولید محصول سماق و محصول‌های زراعی در الگوی کشت منطقه را نشان می‌دهند و بیانگر آن هستند که میزان استفاده از هر یک از منابع ذکر شده برای تولید هر هکتار محصول i و همچنین محصول سماق نمی‌تواند از کل منابع در دسترس منطقه مورد پژوهش بیشتر باشد. رابطه (۱۱) نیز بیانگر محدودیت غیرمنفی بودن سطح فعالیت است.

مدل گسترش یافته منطقه مورد بررسی با هدف شبیه‌سازی دقیق مشاهده‌های دنیای واقعی، بر مبنای فرضیه‌های اقتصادی بسط داده شده است. با این حال، به دلیل پیچیدگی فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان، ترکیب‌بندی دقیق عامل‌های مؤثر بر تصمیم‌های آنها در قالب مدل با چالش‌هایی خواهد

شد و وجود شکاف بین نتایج مدل و مشاهده‌های واقعی پرهیزناپذیر است. برای کاهش خطای مدل و افزایش دقت آن، از روش‌وفن برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (PMP[1]) استفاده شده است.

محدوده جغرافیایی این پژوهش، اراضی کشاورزی دشت همدان - بهار را شامل می‌شود که از دو شهرستان، چهار بخش و ۳۴ روستا تشکیل شده است و بیش از ۴۶۰۰۰ هکتار اراضی زراعی دارد. این منطقه با توجه به سهم شایان‌توجه در تولید محصول‌های کشاورزی استان و کشور، به‌عنوان یک منطقه پژوهشی مهم انتخاب شد. جهت گردآوری داده‌ها، پرسشنامه‌ای طراحی و از کشاورزان منطقه در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ تکمیل شد. همچنین، با مراجعه به سازمان‌ها و نهادهای مرتبط، اطلاعات مکمل جمع‌آوری شد. برای تعیین رابطه‌های فنی بین محصول‌های و نهاده‌ها، نمونه‌ای تصادفی دو مرحله‌ای از مزارع کشت شده با سماق و سایر محصول‌های انتخاب شد. در مرحله اول، چهار بخش همدان-بهار به دلیل همگنی شرایط اقلیمی به‌عنوان خوشه‌های اصلی در نظر گرفته شدند. در مرحله دوم، روستاهای هر بخش بر مبنای همگنی شرایط خاک و توپوگرافی خوشه‌بندی شدند. آنگاه، با بهره‌گیری از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده، خوشه‌های مورد نظر در هر دو مرحله انتخاب شدند (Fraboni et al. 2021; Aga et al. 2023; Nazrin et al. 2023):

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)\frac{B^2}{4} + \sigma^2} \Longrightarrow \frac{1000 \times 0.351}{(1000-1) \times \frac{0.05^2}{4} + 0.351} = 360 \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲)؛ n: حجم نمونه لازم، N: شمار کل بهره‌برداران زراعی دشت، σ^2: واریانس سود خالص و سطح زیرکشت محصول‌های (به‌ترتیب بر حسب تومان و هکتار) و B: خطای برآورد میانگین جامعه با احتمال تقریبی ۰/۹۵. با بهره‌گیری از روش نمونه‌گیری یادشده، مجموعه‌ای شامل ۳۶۰ پرسشنامه از کشاورزان منطقه جمع‌آوری و اطلاعات آن استخراج شد. این نمونه به نحوی طراحی شد تا همه‌ی محصول‌های زراعی کشت شده در منطقه را پوشش داده و نمایانگر جامعهٔ آماری مورد پژوهش باشد.

نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی بادقت بالا، شاخص‌های آماری مختلفی نظیر RMSE، MAE، MBE، ضریب نش - ساتکلیف و ضریب تبیین محاسبه و مقایسه شدند. افزون بر این، ویژگی‌های آماری داده‌های تولید شده توسط مدل با داده‌های

[1] Positive Mathematical Programming

مشاهده‌ای به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست‌آمده از این ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که مدل LARS-WG توانسته است بادقت قابل قبولی، داده‌های اقلیمی را در ایستگاه فرودگاه همدان شبیه‌سازی نماید.

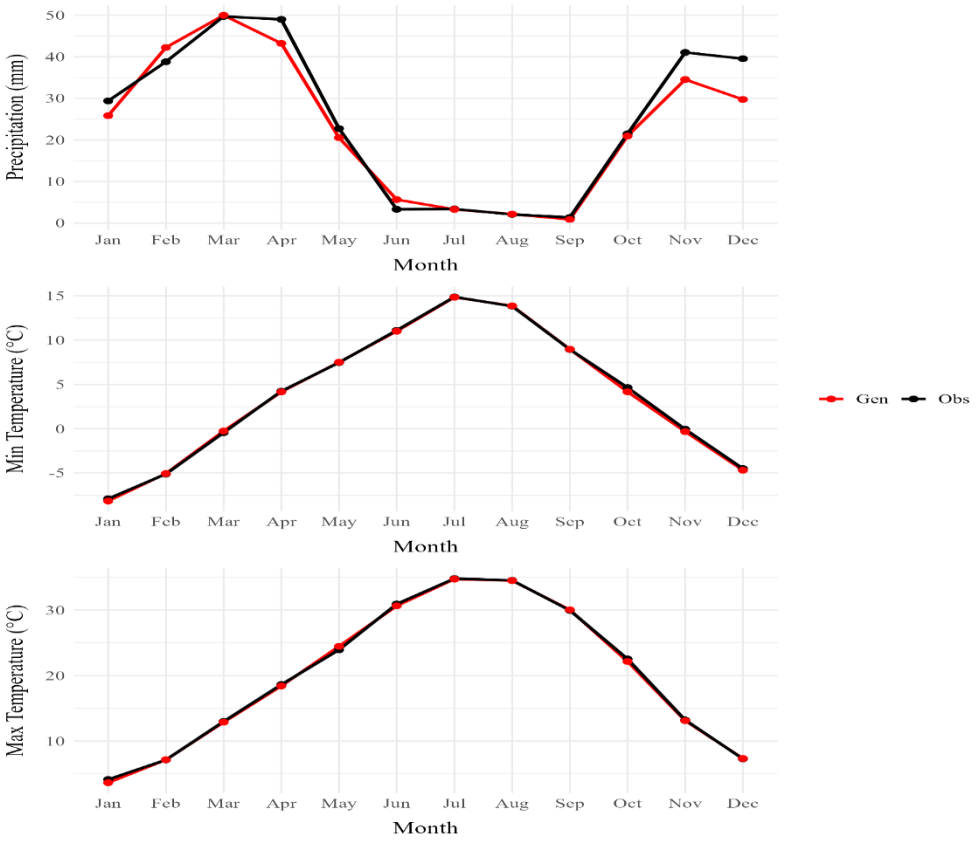
جدول (۱) نتایج فراسنجه‌های آماری بدست‌آمده از مقایسه مقدارهای مشاهده‌هایی و ایجاد شده توسط مدل

Table (1) Results of statistical parameters from comparing observed values and those generated by the model

شاخص‌های آماری Statistical indicators	بارش Precipitation	دمای کمینه Minimum temperature	دمای بیشینه Maximum temperature
RMSE	1.20	0.05	0.07
MAE	2.91	0.14	0.19
MBE	0.35	−0.03	−0.02
NS	0.93	0.98	0.98
R^2	0.96	0.98	0.98

منبع: یافته‌های تحقیق Source: Research Findings

جدول (۱) فراسنجه‌های آماری مربوط به مقایسه داده‌های مشاهده‌هایی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل LARS-WG را نشان می‌دهد. مقدارهای بالای ضریب نش - ساتکلیف (NSE) گواهی بر کارایی بالای مدل در بازتولید الگوهای زمانی و مکانی متغیرهای هیدروکلیماتولوژی است. همچنین، مقایسه مقدارهای RMSE، MAE و MBE برای دمای کمینه و بیشینه و بارش نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد خوبی داشته است. این امر را می‌توان به ماهیت پیوسته دمای هوا نسبت به بارش نسبت داد. از سوی دیگر، مقدارهای بالای ضریب همبستگی (R^2) برای فراسنجه‌های اقلیمی مورد بررسی نیز مؤید همبستگی قوی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. به‌طورکلی، نتایج بدست‌آمده از ارزیابی مدل بیانگر آن است که مدل LARS-WG ابزاری توانمند برای بررسی و ارزیابی تغییرپذیری اقلیمی در منطقه موردپژوهش است.



شکل (۲) نمودار فراسنجه‌های اقلیمی بارش و دمای کمینه و بیشینه مرحلهٔ صحت‌سنجی مدل LARS-WG

Figure (2) Validation Stage Climate Parameters (Precipitation, Minimum and Maximum Temperature) for the LARS-WG Model

مطابق شکل (۲)، بررسی نمودارهای مقایسه‌ای بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تولید شده توسط مدل، نشان می‌دهد که روند تغییرپذیری ماهانه در هر سه متغیر بارش و دمای کمینه و دمای بیشینه به‌خوبی توسط مدل بازتولید شده است. به‌ویژه، در ماه‌های با تغییرپذیری شدید اقلیمی، مدل توانسته است الگوی کلی تغییرپذیری را با دقت قابل‌قبولی بازنمایی کند. این تناسب در بیشتر ماه‌های سال، به‌ویژه در مقدارهای دما، گویای عملکرد باثبات مدل در بازتولید داده‌های اقلیمی است.

در جدول (۲) نتایج مربوط به اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای کمینه و دمای بیشینه در دشت همدان - بهار ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با اعمال پیش‌فرض‌های SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 بارش سالانه در مجموع و طی دورهٔ شبیه‌سازی به‌ترتیب ۲/۷۷، ۴/۴۴ و ۷/۱۵ درصد کاهش، دمای کمینه حدود ۰/۷۹، ۱/۰۰ و ۱/۲۲ و دمای بیشینه ۱/۳۶، ۱/۴۲ و ۱/۵۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. مطالعات اخیر، از جمله پژوهش‌های افروزی و زارع (۱۳۹۹)، معززی و همکاران (۱۴۰۰) و سلطانی و همکاران (۱۴۰۱)، به طور قاطع اثرگذاری‌های ملموس تغییر اقلیم بر روی بوم‌سامانه دشت همدان - بهار را به اثبات رسانده‌اند.

در مجموع می‌توان بیشترین تغییرپذیری بارش در فصل‌های بهار و زمستان، بیشترین تغییرپذیری دمای کمینه در فصل‌های زمستان و تابستان و بیشترین تغییرپذیری دمای بیشینه در فصل‌های پاییز و زمستان است. همچنین خروجی‌های بدست‌آمده از اعمال سناریوی SSP3-7.0 تغییرپذیری بیشتری نسبت به سناریوی SSP1-2.6 نشان می‌دهد. باتوجه به تاریخ کاشت و دورهٔ رشد غالب محصول‌های این دشت که در فصل پاییز و زمستان است، کاهش بارندگی طی این فصل‌های می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر عملکرد آنها داشته باشد. نتایج بدست‌آمده از مدل‌سازی اقلیمی نشان می‌دهد که در دشت همدان، تغییرپذیری اقلیمی منجر به افزایش محسوس دما و تغییرپذیری قابل توجه در الگوی بارش خواهد شد. بر مبنای پیش‌فرض‌های مختلف اقلیمی آینده‌نگر (SSP)، پیش‌نگری می‌شود که دمای کمینه و بیشینه به ترتیب به میزان ۰/۵۱ تا ۰/۸۱ درجه سانتی‌گراد و ۰/۵۷ تا ۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. همچنین، میزان بارش نیز باتوجه به شدت تغییرپذیری اقلیمی، بین ۸/۸۲ تا ۲۳/۳۲ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. این تغییر اقلیم، پیامدهای قابل توجهی بر منابع آبی، کشاورزی، و بوم‌سامانه‌های منطقه خواهد داشت و لذا برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

جدول (۲) بررسی اثرگذاری‌های تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی

Table (2) Investigating the effects of climate change on meteorological variables

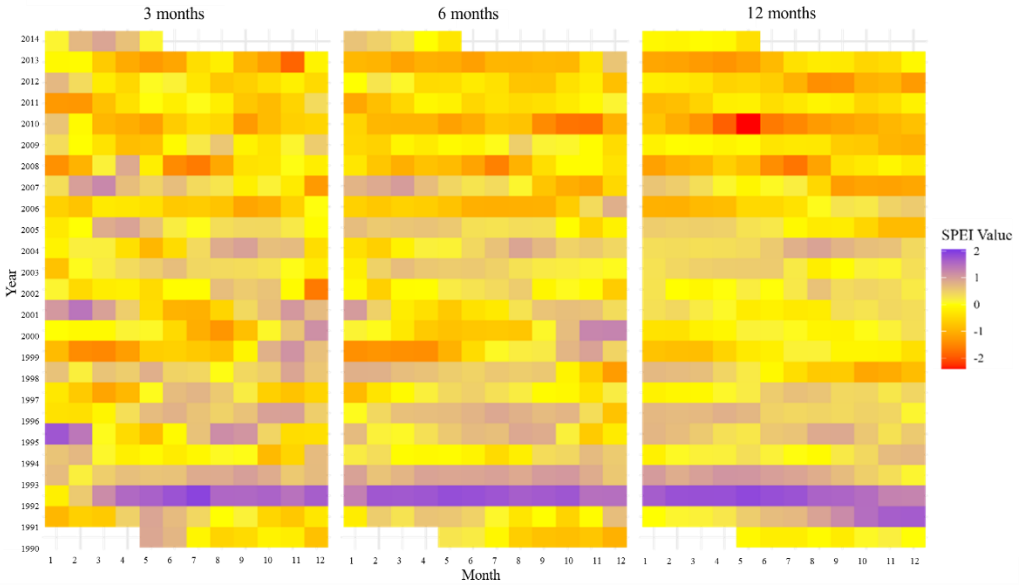
متغیر Variable	پیش‌فرض Scenario	دوره Period	بهار Spring	تابستان Summer	پاییز Autumn	زمستان Winter	مجموع / میانگین Total / Average
بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	SSP1-2.6	پایه base	73.63	6.83	102.03	119.88	302.38
		2026-2050	71.01	6.37	100.06	116.12	293.56
		تفاوت difference	-2.62	-0.46	-1.97	-3.76	-8.82
	SSP2-4.5	2026-2050	67.4	6.23	98.91	111.78	284.32
		تفاوت difference	-6.23	-0.6	-3.12	-8.1	-18.06
	SSP3-7.0	2026-2050	65.89	5.57	97.45	110.15	279.06
		تفاوت difference	-7.74	-1.26	-4.58	-9.73	-23.32
دمای کمینه (سلسیوس) Minimum temperature (Celsius)	SSP1-2.6	پایه base	6.98	12.49	-5.66	-13.88	-0.02
		2026-2050	4.04	9.40	-3.86	-7.55	0.51
		تفاوت difference	-2.94	-3.09	+1.80	+6.33	+0.53
	SSP2-4.5	2026-2050	4.33	9.40	-3.24	-7.83	0.66
		تفاوت difference	-2.65	-3.09	+2.42	+6.05	+0.68
	SSP3-7.0	2026-2050	4.37	9.64	-3.22	-7.61	0.79
		تفاوت difference	-2.61	-2.85	+2.44	+6.27	+0.81
دمای بیشینه (سلسیوس) Maximum temperature (Celsius)	SSP1-2.6	پایه base	23.48	32.65	12.27	5.25	18.41
		2026-2050	23.56	32.73	13.21	6.42	18.98
		تفاوت difference	+0.08	+0.08	+0.94	+1.17	+0.57
	SSP2-4.5	2026-2050	23.73	32.84	13.89	6.44	19.22
		تفاوت difference	+0.25	+0.19	+1.62	+1.19	+0.81
	SSP3-7.0	2026-2050	24.17	32.88	14.13	7.50	19.67
		تفاوت difference	+0.69	+0.23	+1.86	+2.25	+1.25

Source: Research Findings

منبع: یافته‌های تحقیق

پایش فصلی خشکسالی هواشناسی SPEI طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید و برونداد همادی مدل‌های CMIP6

خشکسالی هواشناسی با شاخص SPEI با داده‌های هواشناسی ایستگاه همدید فرودگاه (همدان) و داده‌های تاریخی مدل GFDL-ESM4 بررسی شده است. مدل‌سازی SPEI در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و در مقیاس‌های زمانی مختلف (سه، شش و نه ماه)، به طور قاطع رخداد خشکسالی‌های متعدد و شدید را در دشت همدان - بهار تأیید نمود. دشت مورد پژوهش برای مقیاس زمانی سه ماهِ ۲۲ دوره، برای شش ماهِ ۱۷ دوره و برای دوازده ماهِ ۱۰ دوره در دورهٔ تاریخی خشکسالی داشته است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که در دوره‌های زراعی مورد پژوهش، کمبود بارندگی و خشکسالی به‌عنوان یک چالش جدی مطرح بوده است. برای جبران این کمبود آبی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یک راهکار کوتاه‌مدت مورداستفاده قرار گرفته است. با توجه به هزینه‌های بالای آبیاری و پیامدهای نامطلوب برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، ضرورت اتخاذ تدابیر مدیریتی پایدار برای سازگاری با خشکسالی در این منطقه بیش‌ازپیش احساس می‌شود. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین و گزارش‌های اعلام شده در این زمینه همخوانی داشته و اعتبار مدل SPEI را در شبیه‌سازی شرایط خشکسالی درگذشته تأیید می‌کند. این هم‌خوانی نشان می‌دهد که مدل SPEI ابزاری مناسب برای ارزیابی و پیش‌نگری خشکسالی در منطقه مورد پژوهش بوده و می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب مورداستفاده قرار گیرد (شمسی‌پور، ۱۳۸۲؛ حسینی و همکاران، ۱۳۸۵؛ نظری‌فر و همکاران، ۱۳۸۵؛ زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۸۸؛ یزدانی و همکاران، ۱۳۸۷؛ کاظمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ نظری پویا و خسروشاهی، ۱۳۹۲؛ خوشبخت، ۱۳۹۳؛ معروفی و همکاران، ۱۳۹۳؛ رهنما و همکاران، ۱۳۹۵؛ اداره کل هواشناسی استان همدان، ۱۴۰۰؛ زارع ابیانه و همکاران، ۱۴۰۱؛ شریفی و همکاران، ۱۴۰۱).



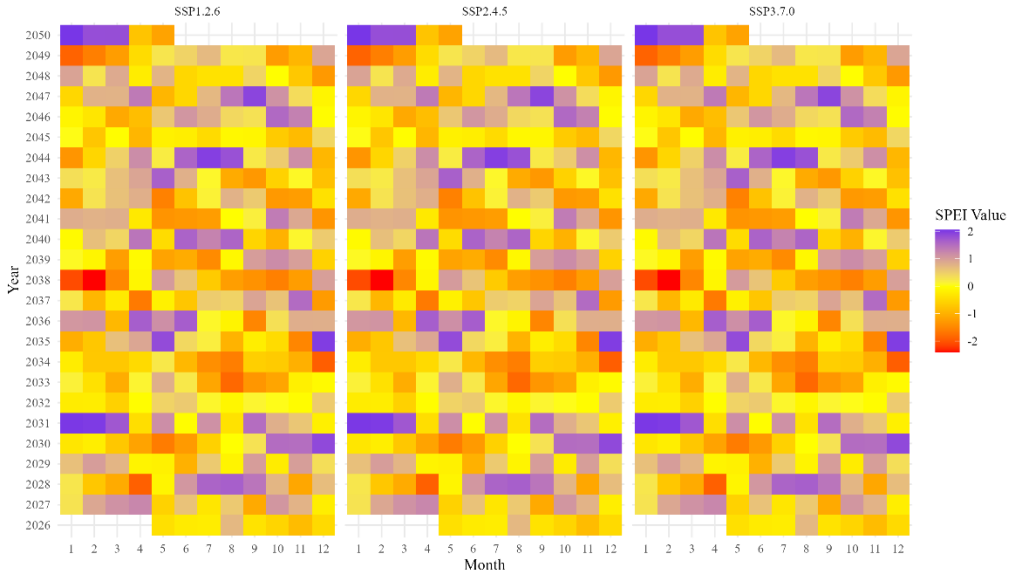
شکل (۳) بررسی روند خشکسالی در دورهٔ پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)

Figure (3) Review of drought trends in the base period (1990-2014)

پایش فصلی خشکسالی هواشناسی SPEI طی دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۶) با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید و برونداد همادی مدل‌های CMIP6

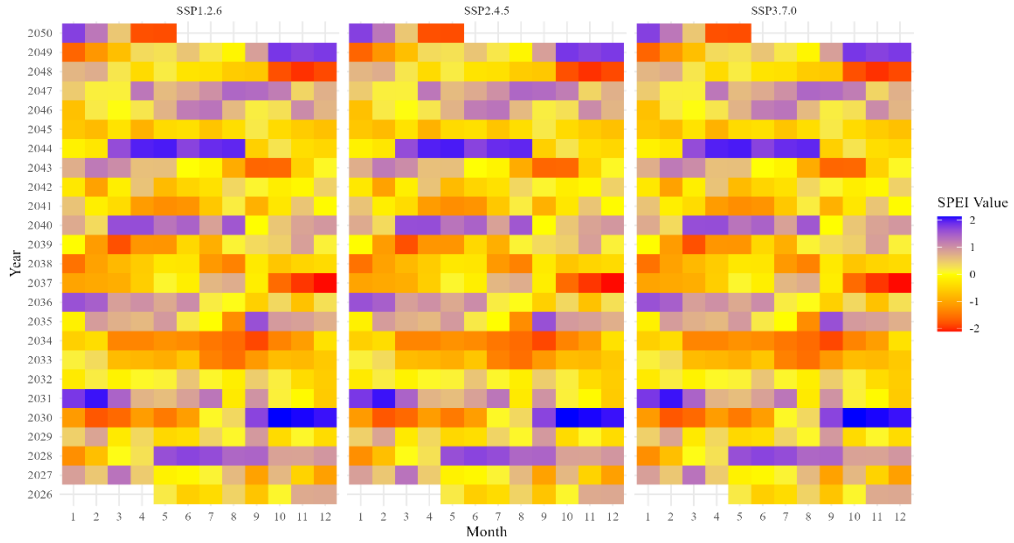
نتایج بدست‌آمده از مدل‌سازی SPEI در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، با سه سناریوی تغییرپذیری اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0، به روشنی بیانگر تداوم و تشدید خشکسالی در دشت همدان - بهار است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که در دوره‌های زراعی آتی، کمبود بارندگی و خشکسالی به‌عنوان یک چالش مهم و پایدار مطرح خواهد بود. بر مبنای نتایج کمی، در سناریوی مطلوب (SSP1-2.6) ۶۸ دوره خشکسالی، در سناریوی متوسط (SSP2-4.5) ۷۰ دوره و در سناریوی بحرانی (SSP3-7.0) ۷۳ دوره خشکسالی در بازه زمانی سه ماهه، در سناریوی مطلوب (SSP1-2.6) ۶۹ دوره خشکسالی، در سناریوی متوسط (SSP2-4.5) ۷۱ دوره و در سناریوی بحرانی (SSP3-7.0) ۷۳ دوره خشکسالی در بازه زمانی شش ماهه، در سناریوی مطلوب (SSP1-2.6) ۵۸ دوره خشکسالی، در سناریوی متوسط (SSP2-4.5) ۶۰ دوره و در سناریوی بحرانی (SSP3-7.0) ۶۱ دوره خشکسالی

در بازه زمانی دوازده‌ماهه پیش‌نگری شده‌است. این بدان معناست که کشاورزان منطقه با کاهش شایان‌توجه منابع آبی و افزایش هزینه‌های آبیاری روبه‌رو خواهند شد و برای جبران کمبود آب، ناگزیر به بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی خواهند بود. تداوم خشکسالی و کاهش منابع آبی، تأثیرات منفی قابل توجهی بر عملکرد و تولید محصول‌های کشاورزی داشته و در نهایت منجر به کاهش سوددهی بخش کشاورزی در منطقه موردپژوهش خواهد شد. با توجه به این شرایط، در این پژوهش، گیاه سماق به‌عنوان یک‌گونه مقاوم به خشکی، به‌عنوان یک گزینه مناسب برای جایگزینی محصول‌های زراعی حساس به خشکسالی و جبران آسیب‌وزیان اقتصادی وارده بر بخش کشاورزی پیشنهاد شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی SPEI ابزاری قدرتمند برای ارزیابی و پیش‌نگری خشکسالی در آینده و برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی در منطقه مورد پژوهش بوده است.



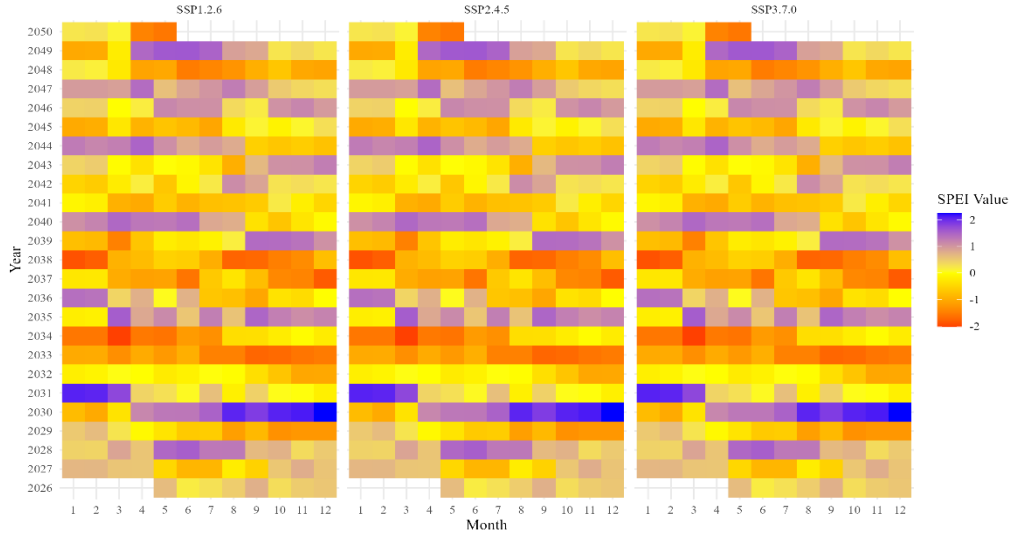
شکل (۴) پیش‌نگری نتایج دوره‌های سه ماه مدل SPEI برای سه سناریوی اقلیمی

Figure (4) Forecast results of three-month periods of the SPEI model for three climate scenarios



شکل (۵) پیش‌نگری نتایج دوره‌های شش ماه مدل SPEI برای سه سناریوی اقلیمی

Figure (5) Forecast results of six-month periods of the SPEI model for three climate scenarios



شکل (۶) پیش‌نگری نتایج دوره‌های دوازده ماه مدل SPEI برای سه سناریوی اقلیمی

Figure (6) Forecast results of the SPEI model for twelve-month periods for three climate scenarios

بازخورد بوم‌شناختی و فیزیولوژیک بین خشکسالی و پوشش گیاهی نیز پیامدهای جدی را بر محیط‌زیست و سامانه اقلیم خواهد داشت (Lian et al., 2020). بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه‌وتحلیل شاخص خشکسالی در دوره آتی، پیش‌نگری می‌شود دشت همدان - بهار با کاهش شایان‌توجه در منابع آبی روبه‌رو گردد. ارزیابی این شاخص با سه سناریوی آینده‌نگر SSP نشان داد که شدت و تداوم خشکسالی می‌تواند به‌طور مستقیم بر میزان آب قابل دسترس برای بخش کشاورزی اثرگذار باشد. به همین منظور، در این پژوهش، با استناد به نتایج شاخص خشکسالی و به‌منظور شبیه‌سازی شرایط آتی، کاهش در آب در دسترس آبیاری به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به‌ترتیب برای پیش‌فرض‌های SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 یادشده اعمال شد. انتخاب این مقدارهای بر مبنای شواهد و یافته‌های مطالعات پیشین در منطقه و همچنین در دشت‌هایی با شرایط اقلیمی مشابه با سه سناریوی اقلیمی مورد بررسی انجام شده است. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر اثرگذاری‌های خشکسالی بر بهره‌وری و الگوی کشت را در قالب سه سناریوی اقلیمی SSP فراهم می‌سازد. با توجه به تشدید پدیده خشکسالی و کاهش شایان‌توجه منابع آبی، به‌ویژه در کشت محصول‌های با نیاز آبی بالا، ضرورت بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. نتایج الگوی کشت بدست‌آمده از مدل گسترش‌یافته اقتصادی به همراه الگوی کشت پایه در صورت حذف سماق از الگوی کشت دشت همدان - بهار در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳) تفاوت سطح زیرکشت فعلی و برآوردی بدست‌آمده از مدل گسترش‌یافته اقتصادی در صورت حذف سماق از الگوی کشت در دشت همدان - بهار (هکتار)

Table (3) Difference Between Current Cultivated Area and Projected Area from the Developed Economic Model in the Absence of Sumac in the Cultivation Pattern in the Hamedan-Bahar Plain (Hectares)

محصول Crop	سطح زیر کشت فعلی Current Area Under Crop	تفاوت سطح زیر کشت برآوردی با سطح زیرکشت پایه Difference Between Projected Cultivated Area and Baseline Cultivated Area		
		سناریو ۱ Scenario 1	سناریو ۲ Scenario 2	سناریو ۳ Scenario 3
یونجه Alfalfa	14302	-431	-414	-379
جوBarley	7666	-1520	-1549	-1613
لوبیا Beans	104	-37	-36	-36

خیار Cucumber	812	144	144	144
سیر Garlic	1510	-1504	-1504	-1504
ذرت علوفه‌ای Forage corn	570	241	246	250
نخود Peas	1550	1616	1616	1616
سیب‌زمینی Potatoes	13247	10674	10671	10666
شبدر Clover	521	-386	-385	-384
کلزا Rapeseed	125	84	84	85
چغندرقند Sugar beet	48	33	31	30
گوجه‌فرنگی Tomatoes	66	18	18	18
هندوانه Watermelon	482	120	120	120
گندم Wheat	16788	8525	8524	8523
جمع Total	57791	-	-	-

منبع: یافته‌های تحقیق Source: Research Findings

بررسی نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که در شرایط حذف سماق از الگوی کشت، تغییرپذیری شایان‌توجه ی در سطح زیرکشت محصول‌های مختلف در دشت همدان - بهار با سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 که اساس میزان کاهش آب آبیاری در منطقه مورد پژوهش بوده، رخ داده‌است. به طور کلی، بیشترین افزایش سطح زیرکشت به محصول‌های سیب‌زمینی و گندم اختصاص یافته است؛ به‌گونه‌ای که در هر سه سناریو، سیب‌زمینی به ترتیب با ۱۰۶۷۴، ۱۰۶۷۱ و ۱۰۶۶۶ هکتار افزایش و گندم با ۸۵۲۵، ۸۵۲۴ و ۸۵۲۳ هکتار افزایش نسبت به سطح پایه، جایگاه نخست و دوم را در گسترش سطح زیرکشت به خود اختصاص داده‌اند. علاوه بر این، محصول‌های نخود، ذرت علوفه‌ای، خیار و کلزا نیز در تمامی سناریوها افزایش سطح زیرکشت را تجربه کرده‌اند،

در حالی که اغلب سایر محصول‌های به‌ویژه یونجه، جو، سیر و شبدر با کاهش محسوس سطح زیرکشت روبه‌رو شده‌اند. در این پژوهش، باهدف ارزیابی پتانسیل کشت گیاه دارویی سماق به‌عنوان یک‌گونه مقاوم به خشکی، با پیش‌فرض‌های کاهش آب دردسترس در یک مدل اقتصادی گسترش‌یافته برای دشت همدان - بهار اعمال شد. نتایج الگوی کشت بدست‌آمده از مدل گسترش‌یافته اقتصادی به همراه الگوی کشت پایه در صورت افزودن سماق به الگوی کشت دشت همدان - بهار در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴) تفاوت سطح زیرکشت فعلی و برآوردی بدست‌آمده از مدل گسترش‌یافته اقتصادی در صورت افزودن سماق به الگوی کشت در دشت همدان - بهار (هکتار)

Table (4) Difference Between Current Cultivated Area and Projected Area from the Developed Economic Model Upon Adding Sumac to the Cultivation Pattern in the Hamedan-Bahar Plain (Hectares)

محصول Crop	سطح زیر کشت کنونی Current Area Under Crop	تفاوت سطح زیر کشت برآوردی با سطح زیرکشت کنونی Difference Between Projected Cultivated Area and Baseline Cultivated Area		
		سناریو ۱ Scenario 1	سناریو ۲ Scenario 2	سناریو ۳ Scenario 3
یونجه Alfalfa	14302	-441	-424	-389
جو Barley	7666	-1535	-1564	-1628
لوبیا Beans	104	-37	-36	-36
خیار Cucumber	812	144	144	144
سیر Garlic	1510	-1504	-1504	-1504
ذرت علوفه‌ای Forage corn	570	241	243	247
نخود Peas	1550	1616	1616	1616
سیب‌زمینی Potatoes	13247	10674	10671	10666
شبدر Clover	521	-386	-385	-384
کلزا Rapeseed	125	72	72	73

چغندرقند Sugar beet	48	31	31	30
گوجه‌فرنگی Tomatoes	66	18	18	18
هندوانه Watermelon	482	120	120	120
گندم Wheat	16788	8505	8504	8503
سماق Sumac	31	60	60	60
جمع Total	57822	-	-	-

منبع: یافته‌های تحقیق Source: Research Findings

بررسی نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که افزودن سماق به الگوی کشت در دشت همدان - بهار، تغییرپذیری ی در سطح زیرکشت محصول‌های ایجاد کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این گیاه در هر سه سناریوی اقلیمی آینده‌نگر SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 که اساس کاهش میزان آبیاری در منطقه بوده‌اند، با افزایش ۶۰ هکتار نسبت به سطح پایه همراه بوده است. این افزایش منطقی و پایدار، ناشی از ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک سماق و سازگاری بالای آن با کاهش منابع آبی است؛ به‌ویژه که در این پژوهش، کاهش آبیاری به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در سه سناریو اعمال شده و نتایج شاخص خشکسالی نیز مؤید لزوم تغییر به سمت محصول‌های کم‌نیاز آبی بوده است. مقایسه این جدول با جدول (۳) که حذف سماق را شبیه‌سازی می‌کرد، نشان می‌دهد که در صورت نبود این گیاه در الگوی کشت منطقه، افزایش سطح زیرکشت عمدتاً به سمت محصول‌های پرمصرف آبی مانند یونجه تخصیص یافته‌است. با وجود افزایش سماق، محصول‌های سیب‌زمینی و گندم همچنان بیشترین رشد سطح زیرکشت را دارند (به‌ترتیب بیش از ۱۰۶۶۰ هکتار و حدود ۸۵۰۰ هکتار در هر سه سناریو)، که بیانگر جایگاه راهبردی آن‌ها در اقتصاد کشاورزی منطقه است. از سوی دیگر، روند تغییرپذیری سایر محصول‌های نسبت به جدول قبلی تقریباً مشابه است؛ به‌طوری‌که نخود، ذرت علوفه‌ای، خیار و هندوانه افزایش سطح زیرکشت را تجربه کرده‌اند، در حالی که یونجه، جو، سیر و شبدر با کاهش قابل توجه همراه بوده‌اند. با این حال، اضافه شدن سماق به الگو باعث شده است که بخشی از اراضی که در جدول قبلی به محصول‌های با نیاز آبی بالاتر اختصاص می‌یافت، اکنون به یک

محصول پایدار و اقتصادی در شرایط محدودیت آب تخصیص یابد، که این امر می‌تواند به کاهش ریسک تولید و افزایش تاب‌آوری سیستم کشاورزی دشت کمک کند.

جدول (۵) نتایج بدست‌آمده از برآورد سود خالص بخش کشاورزی در دشت همدان - بهار را بر مبنای مدل گسترش‌یافته اقتصادی، برای دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ با سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 نشان می‌دهد. در این ارزیابی، دو حالت حذف و افزودن سماق به الگوی کشت در مقایسه با وضعیت پایه شبیه‌سازی شده است و میزان تغییرپذیری سود خالص نسبت به حالت پایه محاسبه شده است.

جدول (۵) نتایج بدست‌آمده سودخالص بخش کشاورزی از مدل گسترش یافته دشت همدان - بهار (میلیارد تومان)

Table (5) Results of the agricultural sector net profit from the developed model of Hamedan-Bahar Plain (billion 10IRR)

سناریو Scenario	کنونی base	دورهٔ آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ the future period 2026-2050		
		حذف سماق از الگوی کشت Elimination of Sumac from Cropping Pattern	افزودن سماق به الگوی کشت Incorporation of Saffron into Cropping Pattern	میزان تغییرپذیری Amount of change
سناریو ۱	864.154	863.850	878.080	14.23
سناریو ۲	864.154	860.230	875.213	14.39
سناریو ۳	864.154	856.044	870.564	14.52

منبع: یافته‌های تحقیق Source: Research Findings

بررسی نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که افزودن سماق به الگوی کشت در هر سه سناریو، منجر به افزایش پایدار سود خالص بخش کشاورزی نسبت به حالت پایه شده است؛ به‌طوری که این افزایش در سناریوی اول برابر با ۱۴/۲۳ میلیارد تومان، در سناریوی دوم معادل ۱۴/۳۹ میلیارد تومان و در سناریوی سوم برابر با ۱۴/۵۲ میلیارد تومان بوده است. به‌عبارتی دیگر، بر مبنای هر سه سناریو، مقدار برآوردی با افزایش ۱۴ میلیارد تومانی در دورهٔ آتی نسبت به رقم پایه ۸۷۵ میلیارد تومان روبه‌رو خواهد بود. این روند افزایشی بیانگر مزیت اقتصادی کشت سماق به‌عنوان یک محصول سازگار با کم‌آبی و شرایط اقلیمی آینده است. در مقابل، حذف سماق از الگوی کشت در تمامی سناریوها

باعث کاهش سود خالص نسبت به حالت پایه شده است؛ بیشترین کاهش مربوط به سناریوی سوم با افت حدود ۸/۱۱ میلیارد تومان بوده که نشان‌دهنده حساسیت بالای الگوی کشت منطقه به حضور این محصول در شرایط اقلیمی گرم‌تر و خشک‌تر آینده است. مقایسه دو حالت حذف و افزودن سماق آشکار می‌سازد که گنجاندن این محصول در الگوی کشت نه تنها اثرگذاری‌های منفی محدودیت منابع آب را تعدیل می‌کند، بلکه تاب‌آوری اقتصادی بخش کشاورزی را نیز به‌طور بهبود می‌بخشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش گویای از آن است که پیش‌نگری مدل اقلیمی مورداستفاده، در ۲۵ سال آیندهٔ منطقه موردپژوهش با روند افزایشی دما و کاهش بارندگی روبه‌رو خواهد بود. تجزیه‌وتحلیل شاخص SPEI نیز نشان می‌دهد که شدت و فراوانی خشکسالی در منطقه افزایش خواهد یافت. با توجه به نتایج بدست‌آمده از پیش‌نگری خشکسالی به کمک شاخص موردپژوهش، انتظار می‌رود که در آینده و با پیش‌فرض‌های مختلف تغییر اقلیم، رخداد خشکسالی با شدت و تداوم بیشتری همراه باشد. با استناد به مدل‌های پیش‌نگری خشکسالی، دوره‌های خشکسالی دو ماهه متوالی به‌عنوان مبنای تجزیه‌وتحلیل در نظر گرفته شد. نتایج بدست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که با هر سه سناریوی اقلیمی مورد بررسی، احتمال رخداد خشکسالی به طور متوسط در مقیاس زمانی سه ماهه حدود ۶۸ دوره، شش ماهه ۶۰ دوره و دوازده‌ماهه ۴۰ دوره برآورد می‌شود. با استفاده از همان رویکرد در نظرگیری خشکسالی دو ماهه متوالی، احتمال رخداد خشکسالی در دوره زراعی منطقه موردپژوهش برای بازه زمانی ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰ نیز بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که احتمال رخداد خشکسالی در مقیاس زمانی سه ماهه، شش ماهه و دوازده‌ماهه به ترتیب ۴۰ دوره ، ۳۲ دوره و ۲۴ دوره برآورد می‌شود. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر اقلیم به طور قابل توجهی بر شدت و فراوانی خشکسالی تأثیرگذار خواهد بود و این امر نیازمند اتخاذ تدابیر جدی برای مدیریت منابع آب و کاهش آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی است. با توجه به این شرایط اقلیمی نامساعد، کشت گیاه دارویی مقاوم به خشکی سماق به‌عنوان یک راهکار سازگار با اقلیم برای بهبود بهره‌وری آب و کاهش آسیب‌وزیان ناشی از خشکسالی پیشنهاد می‌شود. نتایج این پژوهش گویای از آن است که با اعمال پیش‌فرض‌های اقلیمی و آبیاری مختلف در دشت موردپژوهش و افزایش سطح زیر کشت گیاه دارویی سماق، مدل‌سازی اقتصادی نشان می‌دهد که به‌طور متوسط ۱۴/۳۸ میلیارد تومان از آسیب‌وزیان

ناشی از خشکسالی در دوره آتی کاسته خواهد شد. بنابراین، گسترش کشت سماق می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مهم برای سازگاری با اثرگذاری‌های نامطلوب تغییرپذیری اقلیمی در دشت همدان-بهار در نظر گرفته شود. بنابراین، با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

۱. با این‌حال، به‌منظور ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل، توصیه و تاکید می‌شود پژوهش‌های همانند بر روی سایر ایستگاه‌های هواشناسی واقع در منطقه مورد پژوهش نیز انجام گیرد.

۲. با توجه به اهمیت موضوع، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های بیشتری در این زمینه صورت پذیرد تا راهکارهای عملی و مؤثر برای کاهش اثرگذاری‌های منفی خشکسالی بر بخش کشاورزی و اقتصاد منطقه ارایه شود.

۳. با توجه به این‌که سماق یک گیاه‌دارویی مقاوم به خشکی بوده است، جهت سازگاری با تغییرپذیری‌های اقلیم می‌تواند نیز خود این یک راهبرد سازگاری در کنار دیگر راهبردهای موجود باشد.

۴. آموزش کشاورزان در زمینه مدیریت بهینه آب، هرس علمی کاربردی و برداشت اصولی سماق برای افزایش عملکرد و کیفیت محصول.

۵. با توجه به نتایج بدست‌آمده از بررسی گیاه دارویی سماق به عنوان یک گونه مقاوم به خشکی در دشت مورد پژوهش و سایر مناطق با اقلیم مشابه، پیشنهاد می‌شود که دیگر گیاهان دارویی و زراعی مقاوم به خشکی نیز به الگوی کشت منطقه اضافه شوند. این امر می‌تواند به تنوع بخشیدن به الگوی کشت، افزایش پایداری نظام‌های کشاورزی و کاهش اثرگذاری‌های منفی خشکسالی در منطقه کمک کند.

۶. با توجه به اینکه خشکسالی تأثیر قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی دارد، پیشنهاد می‌شود که سازمان آب منطقه‌ای با اجرای طرح‌های آبخیزداری، بهره‌گیری از روش‌های آبیاری کم‌آب‌بر (مانند آبیاری قطره‌ای) و مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی، به حفظ منابع آب زیرزمینی کمک کند.

منبع‌ها

Afruzi, A., & Zare Abyaneh, H. (2020). Investigation of agricultural water demand under combined scenarios of climate change, irrigation efficiency enhancement, cropping

pattern changes, and the development of early-maturing cultivars: A case study of Hamadan–Bahar Plain. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 14(1), 61–75*. (In Farsi)

Aga, G., Francis, D. C., Jolevski, F., Rodriguez Meza, J., & Wimpey, J. S. (2023). An application of adaptive cluster sampling to surveying informal businesses. Journal of Survey Statistics and Methodology, 11(5), 1246-1266. https://doi.org/10.1093/jssam/smac037

Aguirre-Liguori, J. A., Luna-Sánchez, J. A., Gasca-Pineda, J., & Eguiarte, L. E. (2020). Evaluation of the minimum sampling design for population genomic and microsatellite studies: An analysis based on wild maize. Frontiers in genetics, 11, 870. https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00870

Ahmadi M. & Kamangar, M. (2023). Forecasting the extreme temperatures of Iran's cold season using a multi-model Hamadi system with socio-economic scenarios of CMIP6 models. Newar Magazine, 47(120): 71-88. (In Farsi)

Ahmadi, M. & Mohammadi Mehr, N. (2024). Southwest Asia weather forecasts based on SSP scenarios of CMIP6 models. *Earth Science Research, 15(1), 131-141*. (In Farsi)

Akhgari, & Ghasemian-Moghadam. (2023). Prioritization of factors affecting economic resilience of rural households against drought (Case study: Dastgerdan District, Tabas County). *Rural and Sustainable Spatial Development, 14(4), 113–129*. (In Farsi)

Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., ... & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology, 589, 125163*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163

An, X., Zhang, Y., Sun, S., Chai, R., Bi, Z., Li, J., ... & Chen, H. (2024). Future drought overestimations due to no constraints of CO2 physiological effect and land-atmosphere coupling on potential evapotranspiration. *Environmental Research Letters, 19(12), 124031*. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad8c67

Andersson, M., Baccianti, C., & Morgan, J. (2020). Climate change and the macro economy (No. 243). ECB Occasional Paper.

Asadabadi, E., Asadi, A., & Kalantari, K. (2020). Dynamic modeling of the groundwater system in Hamadan–Bahar Aquifer. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 50(9), 2323–2340*. (In Farsi)

Bandurska, H. (2022). Drought stress responses: Coping strategy and resistance. Plants, 11(7), 922. https://doi.org/10.3390/plants11070922

Baraeinejad, Behnaz, Sayari, Nasrin, Rahnama, Mohammad Bagher, & Golestani Kermani, Soudabeh. (2021). Drought Monitoring Of Rafsanjani Plain Under Climate Change Conditions. *Nivar, 44(110-111), 77-90*. (In Farsi)

Belaqziz, S., Khabba, S., Kharrou, M. H., Bouras, E. H., Er-Raki, S., & Chehbouni, A. (2021). Optimizing the sowing date to improve water management and wheat yield in a large irrigation scheme, through a remote sensing and an evolution strategy-based approach. Remote Sensing, 13(18), 3789. https://doi.org/10.3390/rs13183789

Blanco, M., Cortignani, R., & Severini, S. (2008). Evaluating changes in cropping patterns due to the 2003 CAP reform. An ex-post analysis of different PMP approaches considering new activities (No. 692-2016-47491). https://doi.org/10.22004/ag.econ.6674

Burić, D., Mihajlović, J., Doderović, M., & Mijanović, I. (2024). Comparative analysis of SPI and SPEI drought indices for Montenegro and the impact of teleconnections. *Journal of Water and Climate Change, 15(10), 5149-5168*. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.238

Caputo, M. R., & Paris, Q. (2008). Comparative statics of the generalized maximum entropy estimator of the general linear model. *European Journal of Operational Research, 185(1), 195-203*. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.031

Cortignani, R., & Severini, S. (2009). Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using Positive Mathematical Programming. *Agricultural water management, 96(12), 1785-1791*. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.016

Dasgupta, S., Emmerling, J., & Shayegh, S. (2023). Inequality and growth impacts of climate change—insights from South Africa. *Environmental Research Letters, 18(12), 124005*.

Ehtasham, L., Sherani, S. H., & Nawaz, F. (2024). Acceleration of the hydrological cycle and its impact on water availability over land: an adverse effect of climate change. Meteorology Hydrology and Water Management.

Ershadfath, F., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M., & Eivind Olese, J. (2023). Combining Bias Correction Methods for Simulated Temperature and Precipitation by CMIP6 Models in Hamedan-Bahar Plain. *Journal of Watershed Management Research, 14(27), 75-85*. (In Farsi)

Farajzadeh, Z., Ghorbanian, E., & Tarazkar, M. H. (2022). The shocks of climate change on economic growth in developing economies: Evidence from Iran. Journal of Cleaner Production, 372, 133687. (In Farsi)

Fraboni, Y., Vidal, R., Kameni, L., & Lorenzi, M. (2021, July). Clustered sampling: Low-variance and improved representativity for clients selection in federated

learning. In International Conference on Machine Learning (pp. 3407-3416). PMLR.

Ganjaeian, H., Ghasemi, A., Ebrahimi, A., & Asadpour, Z. (2019). Evaluation of subsidence rate of Hamadan–Bahar Plain using SBAS time series method. *Arid Regions Geographic Studies, 9(36), 62–73*. (In Farsi)

Ghadami Firoozabadi, A., & Akbari, M. (2023). Effect of irrigation system type on irrigation water volume, yield, and water productivity of wheat under farmer conditions (Case study: Hamadan Province*). Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 17(5), 831–842*. (In Farsi)

Ghaffar, A., Rahman, M. H. U., Ahmed, S., Haider, G., Ahmad, I., Khan, M. A., ... & Ahmed, A. (2022). Adaptations in cropping system and pattern for sustainable crops production under climate change scenarios. In Improvement of plant production in the era of climate change (pp. 1–34). CRC Press.

Gholipour, J., Ebrahimi, M., & Abedi, J. (2019). Investigating the factors affecting farmers' viewpoints on the use of wastewater in Khorramabad County. Iranian *Journal of Water Research in Agriculture, 32(4), 597–613.* (In Farsi)

Gumus, V. (2023). Evaluating the effect of the SPI and SPEI methods on drought monitoring over Turkey. Journal of Hydrology, 626, 130386. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130386

Hamadan Province Meteorological Office. (2021). Climatological Data, In Airport Hamedan. (In Farsi)

Heckelei, T., & Britz, W. (2000). Positive mathematical programming with multiple data points: A cross-sectional estimation procedure. *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales (CESR), 57(905-2016-70480), 27-50*.

Hosseini, S. A., Merianji, Z. & Karmi Noor, M. (1385). Studying the distribution of droughts in Hamadan province and predicting the return cycle time using geographic information system. Iran Water Resources Management Conference. (In Farsi)

Howitt, R. E. (1995). A calibration method for agricultural economic production models. *Journal of agricultural economics, 46(2), 147-159*.

Howitt, R. E. (2005). PMP based production models-development and integration (No. 724-2016-49281).

Idrees, M., Shahzad, N., & Afzal, F. (2022). Growing climate change impacts on hydrological drought and food security in district Peshawar, Pakistan. In Handbook of Climate Change Across the Food Supply Chain (pp. 467-483). Cham: Springer International Publishing.

Iran Meteorological Organization. (2023). Annual Climatological Report 1402. (In Farsi)

Jami, A., Najafi Alamdar, H., & Mortazavi, S. A. (2020). Effects of drought on cultivation pattern and welfare of farmers in South Mahyar Plain. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture, 34(3), 481–494*. (In Farsi)

Kadkhoda, A., Omidhar, K., Zarin, A., Ughazi, A. & Dadashi Rudbari, A. A. (2023). Forecasting heat stress in Iran based on CMIP6 Hamadi multi-model output. *Iran Geophysics Journal, 17(2), 157-173*. (In Farsi)

Kahkhakohan, M. S., Ranjbar Fordoei, A., & Mousavi, S. H. (2019). Assessment of drought dynamics in Sistan and Baluchestan Province using MODIS satellite data (2000–2015). *Iranian Journal of Range and Desert Research, 26(3), 754–771*. (In Farsi)

Kalantar, V., Mousavi, S. H., & Najafi Alamdarloo, H. (2025). Russian olive and improving water resource productivity: A strategic approach for agricultural sustainability in arid regions. Agricultural Economics and Development. (In Farsi) https://doi.org/10.30490/aead.2025.367411.1667

Kaur, S., Diwan, F., & Reddersen, B. (2022). Mitigating the impacts of drought via wastewater conversion to energy, nutrients, raw materials, food, and potable water. In Climate change and environmental sustainability (pp. 45–60). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12015-2_6

Kavoosi Kalashami, M., Hassanpour, Kh., & Faridi, A. A. (2022). Evaluation of Factors Affecting the Consumption of Medicinal Plants in Urban Households (Case Study: Rasht City). *Agricultural Economics Research, 14(1), 20-34*. (In Farsi)

Kazemi, A., Sabzi Paror, A. A. & Phish Bahar, Sh. (2011). A Comparative Study Of Four Drought Profiles In Hamadan Province. Environmental Science And Technology, 14(3 (Serial 54)), 97-106. (In Farsi)

Khan Salari, S. & Mohammadi, S. A. (2023). Forecasting of extreme precipitation in Iran based on the Hamadi approach of CMIP6 models in the near future (2050-2026) with rank-based weighting. *Physics of Earth and Space, 49(3), 727-746*. (In Farsi)

Khoshbakht, M. (2013). Investigating the effect of drought on changes in the groundwater level of Hamedan-Bahar plain by using the standardized precipitation index (SPI) and drought zoning. The second national conference on water crisis (climate change, water and environment). (In Farsi)

Kolstad, C. D., & Moore, F. C. (2020). Estimating the economic impacts of climate change using weather observations. Review of Environmental Economics and Policy.

Laimighofer, J., & Laaha, G. (2022). How standard are standardized drought indices? Uncertainty components for the SPI & SPEI case. Journal of Hydrology, 613, 128385. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128385

Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z. L. (2020). Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology, 21(7), 1513-1530*.

Lian, X., Piao, S., Li, L. Z., Li, Y., Huntingford, C., Ciais, P., ... & McVicar, T. R. (2020). Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. Science advances, 6(1), eaax0255.

Liu, X., van Kooten, G. C., & Duan, J. (2020). Calibration of agricultural risk programming models using positive mathematical programming. Australian *Journal of Agricultural and Resource Economics, 64(3), 795-817*.

Maroufi, S., Khatar, B., Sadeghifar, M., Parsafer, N. & Ildurmi, A. (2013). Drought prediction using SARIMA time series and SPI index in the central region of Hamadan province. Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences), 28(1(b)), 213-225. (In Farsi)

Mazandaranizadeh, H. & Shokohi Far, F. (2023). Effectiveness Of Management Strategies To Preserve The Underground Water Resources Of Morvdasht-Khorame Plain Using The Dynamics Of Systems. Iran Soil And Water Research, 54(3), 455-472. (In Farsi)

Mianabadi, A. & Davary, K. (2023). Investigation of Changes in the Amount and Distribution of Precipitation and Temperature in Iran and Their Effects on Extreme Events. JOURNAL OF WATER AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 1: 13-26. (In Farsi)

Ministry of Agriculture Jihad. (2023). Agricultural Statistics Yearbook 1402. (In Farsi)

Moazzezi, F., Mosavi, S. H., Yavari, G., & Bagheri, M. (2021). Assessing the impact of climate change on food security and economic welfare: Case study Hamadan–Bahar Plain. *Iranian Journal of Agricultural Economics, 29(114), 249–284*. (In Farsi)

Moazzezi, F., Yavari, Gh.R., Mosavi, S.H., & Bagheri, M.. (2020). Assessing The Impact Of Climate Change On Agriculture In Hamedan-Bahar Plain With Emphasis On Water Productivity And Food Security. *Journal Of Economics And Agriculture Development, 34(3), 305-323*. (In Farsi)

Mohammadi, N., Sari-Saraf, B. & Rostamzadeh, H. (2023). Study of the trend and spatial analysis of the continuity of warm and cold periods based on SSPs scenarios in northwestern Iran. *Scientific Journal System, 10(3), 183-204*. (In Farsi)

Mokhtar, A., Jalali, M., He, H., Al-Ansari, N., Elbeltagi, A., Alsafadi, K., ... & Rodrigo-Comino, J. (2021). Estimation of SPEI meteorological drought using machine learning algorithms. IEEe Access, 9, 65503-65523. (In Farsi)

Namazi, M., Akbari, M., Memarian, H., & Asadolahi, Z. (2024). Drought trend evaluation and its impact on vegetation cover changes of Sarakhs county. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems, 12(2), 59-78*. (In Farsi)

Nazari Pouya, H., & Khosroshahi, M. (2014). Determining The Most Appropriate Meteorological Drought Index For Evaluation Of Drought In Hamedan Province. *Iranian Journal Of Range And Desert Research, 20(4 (53)), 625-633*. (In Farsi)

Nazarifar, M. H., Saifi, K. & Momeni, R. (1385). Managing the risk of hydrological occurrence of drought phenomena in Hamadan province to manage the water resources of the province. Iran Water Resources Management Conference. (In Farsi)

Nazrin, C. S., Bandyapadhya, A., & Gupta, A. (2023). General Estimation Procedures for Population Mean in Successive Cluster Sampling in Presence of Scrambled Response Situation. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: *Physical Sciences, 93(1), 95-105*.

Nemati Shishehgaran, N., Babaian, K. & Mianabadi, H. (2024). Assessing the uncertainty of monthly precipitation by using GCMs and quantitative map skew correction methods. *Water and Irrigation Management, 14(2), 463-486*. (In Farsi)

Niasti, Z., Ebadi, H., & Kiani, A. (2021). Estimation of reference evapotranspiration using remote sensing data in Hamadan–Bahar Plain. *Iranian Water Research Journal, 15(4), 00–00*. (In Farsi)

Nouri, Hamid, Ildoromi, Alireza, & Bakhshi, Maryam. (2022). Investigation Of Groundwater Quality Under Climate Change And Drought Conditions In A Mountainous Catchment In Zagros. *Geographic Space, 22(78), 31-53*. (In Farsi)

Nouri, M., Homaee, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: *A review focusing on water governance. Agricultural Water Management, 288, 108480*. (In Farsi)

Pereira, D., Leitao, J. C. C., Gaspar, P. D., Fael, C., Falorca, I., Khairy, W., ... & Cutajar, J. (2023). Exploring irrigation and water supply technologies for smallholder farmers in the Mediterranean region. Sustainability, 15(8), 6875. https://doi.org/10.3390/su15086875

Petsakos, A., & Rozakis, S. (2022). Models and muddles: comment on 'Calibration of agricultural risk programming models using positive mathematical programming'. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 66(3), 713-728*.

Pourahmad, J., Eskandari, M. R., Shakibaei, R., & Kamalinejad, M. (2010). A search for hepatoprotective activity of aqueous extract of Rhus coriaria L. against oxidative stress cytotoxicity. *Food and chemical toxicology, 48(3), 854-858*. https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.12.021

Pourfallah, S., Ekhtesasi, M. R., Malekinezhad, H., & Barzegari, F. (2020). Application of SWOT analytical model in assessing the strengths and weaknesses of the area in order to balance the aquifer of Abarkuh Plain. *Journal of Watershed Management Research, 10(20), 179–188*. (In Farsi)

Rahimi, D., & Zarei, F.. (2019). The Effect Of Climate Change On Volume Of Water Resources And Transfer Of Inter-Basin Water. *Irrigation Sciences And Engineering (Jise) (Scientific Journal Of Agriculture), 42(3), 61-74*. (In Farsi)

Rahnama, M. B., Zunemat Kermani, M. & Azarian, Sh. (2015). Investigating the effects of drought on the drop of underground water level in Dasht Bahar (Hamadan province) using Modflow model in GMS software. Dissertation, Government, Ministry of Science, Research and Technology, Shahid Bahonar University of Kerman - Water Engineering Research Institute (Master's Degree).

Raihan, A. (2023). A review of the global climate change impacts, adaptation strategies, and mitigation options in the socio-economic and environmental sectors. *Journal of Environmental Science and Economics, 2(3), 36-58.*

Ramírez-Preciado, R. P., Gasca-Pineda, J., & Arteaga, M. C. (2019). Effects of global warming on the potential distribution ranges of six Quercus species (Fagaceae). Flora, 251, 32-38.

Rasco Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T. E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics, 120, 49-58. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017

Rezaei, H., Pashapour, H. A. & Sadeghi, F. (2024). Performance evaluation of CMIP6 models and forecasting temperature and precipitation changes under common socio-economic trajectory (SSP) scenarios in Iran. Strategic Futures Studies Quarterly, 3(10), 7-30. (In Farsi)

Rustaee, M., Asadi, A., & Kalantari, K. (2021). Investigating the mutual correlations between components of climate-smart agriculture using DEMATEL technique. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research, 52(3), 569–589*. (In Farsi)

Salahi, B., Rezaei Banafsh Daragh, M., Vaezi, A., & Faridpour, M. (2018). Monitoring and comparative analysis of meteorological drought on the groundwater level changes in Marand Plain. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 4(4), 61–78*. (In Farsi)

Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T., Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., ... & Nawaz, T. (2024). Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences, 1-17.*

Sarabi, M., Dasturani, M. T. & Zarrin, A. (2021). The effect of future climate change on the hydrological response in the Mashhad Torag Dam watershed. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences, 3(4), 310-330*. (In Farsi)

Sari Saraf, B., Bayati Khatibi, M. & Faraji, M. (2024). Data mining of the role of air pollutants (nitrate and nitrite oxide) in temperature and precipitation changes of Tabriz synoptic station using multi-layer perceptron neural network machine learning and logistic regression. *Ecohydrology, 11(2), 223-248*. (In Farsi)

Seraj Ebrahimi, R., Eslamian, S. & Zareian M. J. (2023). Investigation of the Effects of Climate Change and Meteorological Drought on Groundwater Drought in Wet and Semi-humid Areas (Case Study: Talesh plain). *Journal of Water Resources Engineering, 15(56): 54-68*. (In Farsi)

Shahpari, G., Ashena, M., Martinez-Cruz, A. L., & León, D. G. (2023). Implications for the Iranian economy from climate change effects on agriculture—a static computable general equilibrium approach. *Theoretical and Applied Climatology, 153(3), 1221-1235*.

Shamsipour, A.A. (2003). The Drought Effects On Underground Water Resources Hamadan Northern Plains. *Geographical Research Quarterly, 35(45), 115-130*. (In Farsi)

Sharifi, V., Ahmadi, S. & Gholam Nia, M. (2023). Analysis of the effect of drought on the phenology parameters of plant indicators using the time series of MODIS sensor images (case study: Hamadan province). *Mapping Sciences and Techniques, 12(2): 152-166*. (In Farsi)

Shen, J., Yang, H., Liu, Z., Li, C., Li, S., Cui, Y., & Yang, D. (2024). Assessment of meteorological drought in a changing environment: An example in the Upper Yangtze River. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129(20), e2024JD041019. https://doi.org/10.1029/2024JD041019

Soltani Zoghi, A., & Haji Rahimi, M. (2019). Estimation and comparison of groundwater exploitation under alternative exploitation models and its effect on sustainability: The study of Bahar–Hamedan Plain. *Journal of Agricultural Economics Research, 10(4), 173–194*. (In Farsi)

Soltani, S., Mosavi, S. H., Khalilian, S., & Najafi Alamdarlo, H. (2023). Reducing the waste of agricultural products: An optimal strategy to improve food security. *Iranian Journal of Agricultural Economics, 17(3), 35–66*. (In Farsi)

Soltani, S., Mosavi, S. H., Khalilian, S., & Najafi Alamdarlo, H. (2023). The effects of climate change and climate variability on economic surplus of producers and consumers in the agricultural sector of Hamadan–Bahar Plain. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research, 54(1), 53–72*. (In Farsi)

Soltani, S., Mosavi, S. H., Saghaian, S. H., Azhdari, S., Alamdarlo, H. N., & Khalilian, S. (2023). Climate change and energy use efficiency in arid and semiarid agricultural areas: *A case study of Hamadan-Bahar plain in Iran. Energy, 268, 126553*. (In Farsi)

Suleymanov, F. (2024). A review of the multifaceted relationship between drought dynamics and conflicts. *Hydrological Processes, 38(9), e15262*.

Talebnejad, R., Pachang, F., & Sepaskhah, A. R. (2021). Comparative evaluation of localized irrigation system (bubbler) and surface irrigation (basin) of palm trees: The case study of Bastak region of Hormozgan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 52(3), 733–747.*

Toulabi Nejad, M., & Sadeghi, K. (2019). Farmers' strategies in the face of droughts and examination of the factors affecting those strategies: *A case study of Roshtkhar County. Journal of Rural Research, 9(4), 608–627*. (In Farsi)

Upadhyay, R. K. (2020). Markers for global climate change and its impact on social, biological and ecological systems: A review. *American Journal of Climate Change, 9(03), 159.*

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate, 23(7), 1696-1718*.

Woldearegay, K., Grum, B., Hessel, R., van Steenbergen, F., Fleskens, L., Yazew, E., ... & Haftu, M. (2024). Watershed management, groundwater recharge and drought resilience: An integrated approach to adapt to rainfall variability in northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research, 12(3), 663–683*. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.009

Yazdani, V., Zare Abianeh, H. & Shadmani, M. (1387). Meteorological drought zoning using GIS in Hamadan province. International Conference on Water Crisis. (In Farsi)

Yildirim, G., Rahman, A., & Singh, V. P. (2022). A bibliometric analysis of drought indices, risk, and forecast as components of drought early warning systems. Water, *14(2), 253. https://doi.org/10.3390/w14020253*

Yousefi, Abdolhossein, Nasiri, Behrouz, & Karampoor, Mostafa. (2019). Evaluation Of Climate Change Effect On Groundwater Resources In The Sahraye Bagh Plain, Lar. Watershed Management Researches (Pajouhesh-Va-Sazandegi), 32(2 (123)), 31-42. (In Farsi)

Zare Abyaneh, H., Yazdani, V. & Azhdari, Kh. (2009). Comparative Study Of Four Meteorological Drought Index Based On Relative Yield Of Rain Fed Wheat In Hamedan Province. *Physical Geography Research Quarterly, -(69), 35-49*. (In Farsi)

Zarei, A. R., Mahmoudi, M. R., & Moghimi, M. M. (2023). Determining the most appropriate drought index using the random forest algorithm with an emphasis on agricultural drought. *Natural Hazards, 115(1), 923-946*. (In Farsi)

Zarin, A. & Dadashi Rudbari, A. A. (2021). Prediction of successive dry and wet periods in Iran based on Hammadi output of CMIP6 bias corrected models. Earth and Space Physics, 47(3), 561-578. (In Farsi)

Zarin, A. and Dadashi Rudbari, A. A. (2021). Drought risk management under climate change: the role of national policies and drought management plan (DMP). *Water and Sustainable Development, 8(1), 107-112*. (In Farsi)

Zeinodini, S., Anvari, S., & Zahmatkesh, Z.. (2020). Investigation Of Water Allocation Conditions In Aharchay Basin Under Climate Change Impacts. *Irrigation Sciences And Engineering (Jise) (Scientific Journal Of Agriculture), 42(4), 195-210*. (In Farsi)

Zhang, P., Zhang, J., & Chen, M. (2017). Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation. *Journal of Environmental Economics and Management, 83, 8-31*.

Zhang, X., Duan, Y., Duan, J., Jian, D., & Ma, Z. (2022). A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses. Science China Earth Sciences, 1-20.

Zhang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F. (2022). Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of the Total Environment, 838, 156021*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156021

Doi: 10.22034/IAES.2025.2058542.2122

Agricultural Economics/Volume 20/Issue 2/1405

Assessing the Economic Potential of Sumac Cultivation as a Drought Adaptation Strategy in Agriculture

Vahid Kalantar, Seyed Habibollah Mosavi, Hamed Najafi Alamdarlo1[1]

Received: 21 April.2025 **Accepted:8 Sept.2025**

Extended Abstract

Introduction

Drought and water scarcity pose major challenges to agriculture in arid and semi-arid regions. By constraining water availability, they can affect cropping patterns and reduce the profitability of agricultural production. The Hamadan–Bahar Plain is increasingly exposed to these challenges as precipitation declines and temperatures rise. Under such conditions, adjusting cropping patterns and introducing plant species suited to water-limited environments are potential strategies for climate change adaptation. Sumac (Rhus coriaria L.), a medicinal and industrial plant, offers a potential option for diversifying regional cropping patterns. However, few studies have jointly examined projected drought conditions and the economic implications of incorporating sumac into regional cropping patterns. This study therefore aimed to project future climate conditions and assess drought in the Hamadan–Bahar Plain over the period 2026–2050, while evaluating the economic effects of incorporating sumac into the cropping pattern in terms of the agricultural sector's net profit. The study's contribution lies in linking climate projections and drought assessment with economic modeling to evaluate sumac cultivation as a potential adaptation strategy under increasing water constraints.

Materials and Methods

Meteorological data on precipitation and minimum and maximum temperatures for 1990–2023 were obtained from the Hamedan Airport synoptic station of the Iran Meteorological Organization. Climate conditions for 2026–2050 were projected using the LARS-WG stochastic weather generator and outputs from the GFDL-ESM4 global climate model within the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) framework. Three climate scenarios

1 Respectively: Master's graduate, Professor (corresponding author), and Associate Professor in the Department of Agricultural Economics at Tarbiat Modares University, Tehran.
Email: shamosavi@modares.ac.ir

were considered: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0. Drought severity and frequency were assessed using the Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI) at 3-, 6-, and 12-month timescales. Based on the projected drought conditions, irrigation water availability was reduced by 5%, 10%, and 15% under the respective scenarios. For the economic analysis, data from 360 questionnaires completed by farmers during the 1401–1402 agricultural year (2022–2023), together with supplementary agricultural data, were used to extend the regional economic model based on Positive Mathematical Programming (PMP). The model was used to simulate and compare optimal cropping patterns and the agricultural sector's net profit under alternative scenarios with and without sumac, considering different levels of reduced irrigation water availability.

Results and Discussion

The climate projections indicated that the Hamadan–Bahar Plain is expected to experience declining precipitation and rising temperatures over the period 2026–2050. Relative to the baseline period, precipitation was projected to decrease by approximately 2.9%, 6.0%, and 7.7% under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0, respectively. The SPEI results also indicated that drought events are expected to persist and become more frequent, potentially further constraining agricultural water availability and increasing pressure on groundwater resources. The economic simulations showed that incorporating sumac into the cropping pattern under all three scenarios would increase its cultivated area by 60 hectares, from 31 hectares under baseline conditions to 91 hectares in the future period. Comparing the scenarios with and without sumac also indicated an economic advantage associated with including this crop. The study reported an average net-profit advantage of 14.38 billion 10IRR when sumac was incorporated into the cropping pattern. Overall, the findings suggest that sumac cultivation could offer an economically viable adaptation option under reduced irrigation water availability and help reduce the agricultural sector's economic vulnerability to drought.

Recommendations

The findings suggest that expanding sumac cultivation should be considered as one potential drought adaptation strategy, taking into account the climatic and economic conditions of the Hamadan–Bahar Plain. Farmer training in efficient water management, appropriate pruning practices, and proper sumac harvesting

should also be encouraged. In parallel, wider adoption of water-saving irrigation methods could improve water-use efficiency and contribute to the conservation of water resources. Further research should examine additional meteorological stations and evaluate the suitability of other drought-tolerant medicinal and field crops for regions with similar climatic conditions.
Keywords: Cultivation Area, Drought, Hamadan-Bahar Plain, Net Profit, Sumac
JEL Classification: Q12, Q15, Q25, Q54, O13