

تولید ماده خشک وارد مدل SSM-iCrop2 شد. در ادامه خروجی مدل تغییر اقلیم GCM در مناطق مورد مطالعه با استفاده از مدل ریزمقیاس شده LARS-WG6 و با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم RCP4/5 و RCP8/5 مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مدل تولید SSM-iCrop2 با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم دو مدل IPSL-CM5A-MR و CSIRO-MK36 پارامترهای تولید و فنولوژی محاسبه و سپس برآورد شده است. طبق خروجی‌های مدل در هر دو سناریوی RCP4/5 و RCP8/5 در هر دو دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ دمای بیشینه و کمینه و بارش افزایش خواهد داشت. میزان بارندگی، دمای بیشینه و دمای کمینه به ترتیب برای ایستگاه آبدلی ۰/۹۷-۰/۹۱ درصد، ۱/۷-۲/۲ و ۱/۵۶-۱/۸۸ درجه سانتی‌گراد و برای ایستگاه کیاسر مقادیر پارامترهای فوق به ترتیب ۰/۸۷-۰/۹۶ درصد، ۱/۷۲-۲/۱۸ و ۱/۶۲-۱/۸۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. ارزیابی تولید نشان داد مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای تولید ماده خشک ۲۲ گرم بر مترمربع که معادل ۲۱ درصد میانگین کل ماده خشک مشاهده شده است و ضریب تغییرات ۲۰ درصد بوده است که نشان داد شبیه‌سازی با استفاده از مدل SSM-iCrop2 رضایت‌بخش بوده و برآورد قابل قبول پارامترها و کارایی مدل در پیش‌بینی رشد و تولید گیاهان مرتعی است. با توجه به سناریوهای تغییر اقلیم برای آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۶۰-۲۰۴۱) در هر چهار سایت مورد مطالعه، طول فصل رشد کاهش و تولید مرتع افزایش خواهد یافت. کلید واژه: سطح آب زیرزمینی، ویژگی‌های هندسی قنات، یادگیری ماشینی، مدل‌سازی

مقدمه

ضرورت بهره‌برداری پایدار و مدیریت علمی منابع طبیعی به‌ویژه مراتع در فرایند توسعه پایدار از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۱۵]. یکی از ابزارهای مناسب جهت برآورد تولید مرتع با تکیه بر اطلاعات هواشناختی مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی است. مدل SSM-iCrop2^۶ برای شبیه‌سازی مراحل رشد، نمو و عملکرد محصولات زراعی مختلف در شرایط متفاوت استفاده می‌شود [۳۳]. این مدل رشد، نمو و عملکرد را با استفاده از زیر مدل‌های فنولوژی، گسترش و پیری برگ، تولید و توزیع ماده

پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی تولید علوفه مراتع (مطالعه موردی: مناطق کوهستانی البرز میانی)

مهرنوش پارسا^{۱*}، حسین بارانی^۲، افشین سلطانی^۳، عبدالرضا بهره‌مند^۴

و حسن قلیچ^۵ نیا

تاریخ دریافت ۱۴۰۵/۰۳/۲۵ تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

DOI:/ 10.22034/wmji.2026.2091733.1141

چکیده

تغییر اقلیم، از بزرگ‌ترین چالش‌هایی است که بشر در قرن بیست و یک با آن مواجه بوده است چراکه می‌تواند اثرات شدیدی بر منابع آب، کشاورزی، انرژی، گردشگری و حتی زیست اقلیم انسان داشته باشد یکی از ابزارهای مناسب جهت برآورد تولید مرتع با تکیه بر اطلاعات آب‌وهوایی مدل‌های شبیه‌سازی است. از آنجاکه پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از اجزای مهم بوم‌سازگان طبیعی، تأثیرپذیری بسیار زیادی از اقلیم دارد شاخص‌ها و مدل‌های زیادی در خصوص رابطه اقلیم و پوشش گیاهی ارائه شده است که می‌توانند روابط موجود و اثرات متقابل را بهتر بیان کنند. این مطالعه، باهدف تعیین پارامترهای مؤثر بر تولید گیاهان مرتعی نواحی کوهستانی البرز میانی و ارزیابی اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل آب‌وهوایی LARS WG6 و مدل SSM-iCrop2 در مناطق (پلور، رینه، کنگر چال و پشتکوه) به انجام رسیده است. در این پژوهش داده‌های آماری ایستگاه هواشناسی سینوپتیک آبدلی از سال (۱۹۸۳) و کیاسر از سال (۲۰۰۲) استان مازندران برای دوره ۱۵ ساله جمع‌آوری و داده‌های (دمای کمینه، دمای بیشینه، بارندگی و تابش خورشیدی روزانه) برای برآورد

۱- دانشجوی دکتری مرتعداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و نویسنده مسئول

Email: mehrnush_parsa65@yahoo.com

۲- دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- استاد گروه زراعت، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- استاد گروه منابع طبیعی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۵- دانشیار گروه علوم مرتع، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی ساری

خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک محاسبه می‌کند. پارامتریابی برای شبیه‌سازی دقیق رشد و نمو محصولات انجام می‌شود که می‌تواند مناسب‌ترین مقدار پارامترهای مدل که بر اساس داده‌های مشاهده‌شده و یا کالیبراسیون به‌دست آمده را برآورد کند [۴]. این مدل شبیه‌سازی را به‌صورت روزانه انجام می‌دهد و مراحل سبز شدن، شروع مؤثر پرشدن دانه، پایان مؤثر پرشدن دانه، شروع پیرشدن برگ و رسیدگی را نیز پیش‌بینی می‌کند [۲]. برای شبیه‌سازی تولید مرتع در هر منطقه با مدل SSM-iCrop2 به اطلاعات هواشناسی و خاک نیاز است. اطلاعات هواشناسی شامل دمای کمینه روزانه، بیشینه روزانه، بارش روزانه و ساعات آفتابی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به هر منطقه نیاز است تهیه شود. مدل SSM-iCrop2 به‌واسطه دارا بودن مزیت‌هایی مانند تسهیل در ساخت، آزمون، کاربرد، درک و تفسیر نتایج و هم‌چنین نیاز به کمینه ورودی‌ها، در تجزیه و تحلیل عملکرد و عوامل محدودکننده عملکرد، کارایی بالایی دارد [۲۶]. تغییرات اقلیمی یکی از ویژگی‌های طبیعی چرخه جو است که به‌صورت ناهنجاری‌ها و یا نوساناتی در روند پارامترهای هواشناختی، ازجمله بارندگی و دما حاصل می‌شود. بررسی روند داده‌های آب‌وهوایی ثبت‌شده در دهه‌های گذشته، مطالعات دیرینه‌شناسی و نتایج خروجی تمامی مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی‌کننده اقلیم، نشان‌دهنده بروز تغییرات غیرقابل‌اغماض در اقلیم جهانی است. بدون شک این تغییرات حاصل تأثیر منفی فعالیت‌های انسانی بوده که ازدیاد گازهای گلخانه‌ای و افزایش اثر گلخانه‌ای را به دنبال داشته است. دلایل اصلی افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای عبارت‌اند از مصرف سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی جنگلی و مرتعی (تأثیر بر جذب هم دارد)، گسترش دامداری‌ها، گسترش تولید و استفاده از کودهای نیتروژنه، ضایعات صنعتی و لندفیل‌ها [۳۵]. معتبرترین ابزار، جهت بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف، استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های جفت شده گردش عمومی جوی - اقیانوسی است [۱]. این مدل‌ها سناریوهای اقلیمی ازجمله داده‌های بارش و دما آینده را برای سراسر کره زمین شبیه‌سازی می‌کنند. مقایسه و انتخاب مناسب‌ترین مدل‌ها بر اساس خطای مجموع مربعات بین مشاهدات و نتایج مدل‌ها برای سری‌های زمانی بارندگی صورت گرفت چراکه نتایج مدل‌های مختلف در خصوص دمای کمینه و دمای بیشینه اختلاف بارز و معنی‌داری در دوره موردبررسی نداشتند؛ بنابراین دو مدل CSIRO-MK36 و IPSL-CM5A-MR انتخاب شدند. خدامرادپور و همکاران [۱۶] خروجی‌های دمای مدل Regime جفت شده با طرح‌واره سطح ۵/CLM4 و مدل دریاچه با شرایط مرزی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 را موردبررسی قرار دادند. ارزیابی مدل نشان از عملکرد مناسب مدل، در برآورد بیشینه، کمینه و به‌ویژه میانگین دمای هوا در مقیاس زمانی روزانه، به دلیل خطاهای کوچک‌تر و ضریب کارایی مثبت و بالای مدل،

دارد. نه‌بندانی و همکاران [۲۳] در شبیه‌سازی مدل SSM-iCrop2 برای ۲۰ سال اخیر نشان دادند که متوسط تولید علوفه مرتع ۱۰/۸۵ میلیون تن در سال است؛ ولی کمینه تولید سالانه هشت میلیون تن در سال است که مربوط به خشک‌ترین سال‌ها است. شبیه‌سازی برای آینده (۲۰۳۰ و ۲۰۵۰) بر اساس سناریوی RCP8/5 حاصل از مدل HadGEM نشان داد که در ۲۰۳۰ متوسط تولید مراتع به ۱۰/۸۳ میلیون تن در سال از تولید کنونی کاهش می‌یابد. کمری و همکاران [۱۱] جهت پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 از داده‌های هشت آزمایش انجام‌شده طی هفت سال در نقاط مختلف کشور و برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از داده‌های آزمایشی استفاده کردند. نتایج کارایی قابل‌قبول مدل برای پیش‌بینی روز تا رسیدگی برای ارزیابی بود. هم‌چنین، نتایج نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی به ترتیب برای شبیه‌سازی عملکرد (۲۶/۷۷، ۱۲/۹ و ۰/۷۲ گرم بر مترمربع) تبخیر و تعرق (۳/۱۵۰، ۱۶ و ۰/۷۳ میلی‌متر) و مقدار آب مصرفی (۵/۱۷۸، ۱۹/۶ و ۰/۸۵ میلی‌متر) در برخی از مناطق مهم تولید پنبه در ایران که برآورد متغیرهای مختلف توسط مدل با توجه به ضریب همبستگی بالای ۰/۷ از دقت قابل‌قبولی برخوردار است و مدل SSM-iCrop2 می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد پنبه و واکنش آن به عوامل محیطی و مدیریتی مورد استفاده قرار بگیرد. ترابی و همکاران [۳۸] به‌منظور تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشد و نمو گیاه باقلا در شرایط آب‌وهوایی گرگان روی گیاه باقلا تحقیق کردند. نتایج ارزیابی نشان داد مدل به‌خوبی می‌تواند روز تا گلدهی = ۳۸ جذر میانگین مربعات خطا و $\frac{4}{1}$ ضریب تغییرات روز تا رسیدگی را پیش‌بینی کند. رهبان و همکاران [۲۷] باهدف استفاده از مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کلزا در سطح کشور با پارامتریابی مدل، سه رقم زودرس، میان‌رس و دیررس برای کلزا تعیین شد که درجه حرارت تجمعی برای کامل شدن دوره رشد آن‌ها به ترتیب ۲۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۷۰۰ درجه سانتیگراد برآورد کردند. با توجه شکل ۱:۱ و آماره‌های $\frac{0.87}{0.97}$ = ضریب همبستگی، ۱۸ = ضریب تغییرات، (گرم بر مترمربع) جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه و $\frac{68.07}{0.97}$ = ضریب همبستگی، ۵ = ضریب تغییرات روز و $\frac{10.68}{0.97}$ = جذر میانگین مربعات خطا برای رسیدگی و $\frac{0.83}{0.97}$ = ضریب همبستگی، $\frac{91.9}{0.97}$ = جذر میانگین مربعات خطا و $\frac{19.35}{0.97}$ = ضریب تغییرات برای نیاز آبی نتیجه گرفتند که شبیه‌سازی رشد کلزا با استفاده از مدل SSM-iCrop2 رضایت‌بخش بوده است و نتایج حاکی از برآورد صحیح پارامترهای مدل و تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی عملکرد کلزا در ایران است. این مطالعه باهدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر تولید مراتع کوهستانی البرز و ارزیابی و پارامتریابی به‌وسیله مدل SSM-iCrop2 انجام‌شده است.

منطقه پلور در استان مازندران و در امتداد رشته کوه‌های البرز و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان آمل در محدوده بخش لاریجان قرار دارد. مساحت منطقه ۳۴۰۰ هکتار و جزء مراتع ییلاقی عشایری محسوب می‌شود. منطقه رینه در استان مازندران و در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان آمل در محدوده بخش لاریجان قرار دارد. دامنه ارتفاعی آن بین ۲۴۴۱ تا ۲۶۷۹ متر از سطح دریا است. منطقه کنگر چال در استان مازندران و در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب غرب شهر چمستان در محدوده منطقه نور قرار دارد. دامنه ارتفاعی آن بین ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا است. منطقه پشت کوه نیز در ارتفاع ۱۷۰۰-۱۵۰۰ در ارتفاعات جنوب شرق ساری قرار دارد.

تولید سناریوهای اقلیمی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۰): ۲۰۳۰ و دوره میانه (۲۰۶۰-۲۰۴۱: ۲۰۵۰) با استفاده از دو مدل گردش عمومی IPSL-CM5A-MR و CSIRO-MK36 حاصل پروژه CMIP5 تحت دو سناریوی انتشار RCP4/5 و RCP8/5 گزارش ارزیابی پنجم IPCC با ابزارهای تولید سناریوی اقلیمی LARS-WG6 صورت گرفت. در ادامه به بررسی، ارزیابی و کالیبره مدل شبیه‌سازی تولید برای مراتع چهار منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. برای انتخاب مدل‌های گردش عمومی با بررسی مدل‌های LARS-WG دو مدل، بر اساس همبستگی بالای بین داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده گذشته توسط مدل صورت گرفت. بر این اساس برای اجرای مدل در تحقیق حاضر، داده‌های مورد نیاز (دمای کمینه، دمای بیشینه، تابش و بارش) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها و تهیه فایل‌های ورودی، مدل برای دوره پایه ایستگاه آبعلی (۱۹۹۸-۱۹۸۳) و کیاسر (۲۰۱۷-۲۰۲۰) با در نظر گرفتن دوره پایه ۱۵ ساله برای هر ایستگاه اجرا شد. در مرحله بعد با استفاده از آماره ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق که روابط آن‌ها در ادامه آمده است، اقدام به ارزیابی عملکرد مدل در دوره پایه گردید.

ضریب تبیین

رابطه (۱) نحوه محاسبه آن را نشان می‌دهد [۲۸]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (3)$$

در این روابط x_i و y_i به ترتیب داده‌های واقعی (مشاهده‌شده)

و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، x و y میانگین کل داده‌های x_i و y_i و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی است. مدل با تنظیم ورودی و ارزیابی داده‌ها و بررسی خروجی‌ها واسنجی می‌گردد.

برای بررسی تغییرات متغیرهای مورد بررسی نسبت به دوره مشاهداتی، پس‌ازاین که توانمندی مدل LARS-WG در مدل‌سازی متغیرهای اقلیمی مورد نظر مشخص شد، اقدام به پیش‌بینی این متغیرها تحت دو سناریوی RCP4/5 و RCP8/5 برای دوره‌های ۲۰۶۰-۲۰۲۱ شد. سپس تغییرات این متغیرها نسبت به دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت. فاصله ایستگاه‌های هواشناسی تا مناطق مورد مطالعه تقریباً ۶۰ کیلومتر است.

به‌منظور شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد گیاهان مرتعی با مدل SSM-iCrop2 در مناطق کوهستانی البرز میانی چهار منطقه (پلور، رینه، کنگر چال و پشتکوه) بر اساس اطلاعات فنولوژی، خاک، هواشناسی و شاخص سطح برگ برای پارامتریابی و ارزیابی از استان مازندران جمع‌آوری شدند. در گونه‌های چندساله مثل گیاهان مرتعی شروع شبیه‌سازی موازنه آب خاک از اول ژانویه (دی‌ماه) هر سال شروع می‌شود. در این گیاهان فرض شده است که با تجمع مقدار معینی واحد دمایی (درجه روزرشد) از ابتدای ژانویه رشد مجدد آغاز می‌شود یا جوانه‌ها باز می‌شوند. این مقدار معین واحد دمایی (ForcReq) برای پوشش‌های مرتعی محاسبه و در مدل به‌عنوان پارامتر وارد شده است. پس از شروع رشد بهاره سایر مراحل فنولوژی گیاه بر اساس مفهوم واحد دمایی (درجه روزرشد) اصلاح شده برای تنش خشکی پیش‌بینی می‌شوند [۲۲].

نموفنولوژیک در مدل SSM-icrop2

مراحل فنولوژیک که مدل برای همه گونه‌های گیاهی شبیه‌سازی می‌کند در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

جدول ۲: مراحل فنولوژیک در مدل SSM_iCrop2

کد مرحله	توصیف
EMR	سبز شدن در گیاهان، باز شدن جوانه‌ها در درختان یا شروع مجدد رشد بهاره در یونجه و گیاهان چندساله
BRG	آغاز رشد ریشه، در گیاهان زراعی هم‌زمان با مرحله سبز شدن
BSG	شروع مؤثر پر شدن دانه‌ها
BLS	شروع پیرشدن برگ‌ها
TRG	پایان رشد ریشه
TSG	پایان مؤثر پر شدن دانه‌ها (کامل شدن تشکیل میوه در درختان)
PM	رسیدگی فنولوژیک (افزایش ماده خشک بعد از این مرحله اتفاق نمی‌افتد)
HAR	رسیدگی برداشت (ریزش برگ در درختان)

جدول ۱: ایستگاه‌های هواشناسی به همراه موقعیت جغرافیایی آن‌ها واقع در منطق کوهستانی البرز میانی

شماره	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال برداشت	طول	عرض	ارتفاع
۱	کیاسر	سینوپتیک	۲۰۰۹	۴۶°۵۳	۱۵°۳۶	۱۷۰۰
۲	آبعلی	سینوپتیک	۱۹۸۳	۸۸°۵۱	۷۵°۳۵	۲۴۶۵

گیاهان زراعی و یا ریزش برگ در درختان یک است و tuHAR مقدار واحد دمایی لازم از شروع شبیه سازی تا رسیدگی برداشت است.

شاخص سطح برگ در مدل SSM-icrop2

شاخص سطح برگ در هر روز در طی فصل رشد از رویش تا پایان فصل رشد با استفاده از رابطه (۶) پیش بینی می شود.

$$LAI = RLAI \times LAIMAX \quad (6)$$

که در آن LAI شاخص سطح برگ و RLAI شاخص سطح برگ نسبی (LAI/LAIMAX) و LAHMAX بیشینه شاخص سطح برگ قابل انتظار است. شاخص سطح برگ نسبی طی دو مرحله تخمین زده می شود. مرحله فاز گسترش سطح برگ است و در آن شاخص سطح برگ نسبی با کمک یک معادله سیگموییدی به مرحله نمو نسبی یعنی نسبت زمان حرارتی تجمعی TT تقسیم بر زمان حرارتی از کاشت تا رسیدگی برداشت TTHAR ارتباط داده می شود (NDS=TT/TTHAR). بر اساس این معادله افزایش شاخص سطح برگ در ابتدا و انتهای فاز گسترش با سرعت کمتری افزایش می یابد. معادله S شکل به صورت زیر است (۷):

$$y = x / [x + \exp(a - bx)] \quad (7)$$

که در آن y شاخص سطح برگ نسبی، x مرحله نمو نسبی و a و b ضرایب معادله هستند. با در دست داشتن دونقطه مربوط به این معادله می توان ضرایب آن را برآورد کرد. در فاز دوم که مرحله پیری یا کاهش اصلی شاخص سطح برگ است، شاخص سطح برگ نسبی به صورت خطی از مرحله شروع پر شدن دانه کاهش یافته و در رسیدگی برداشت به صفر می رسد و مقدار آن از یک در شروع فاز پیری به صفر در رسیدگی برداشت کاهش می یابد. در مدل SSM-icrop2 [۳۱] از روش ساده تری برای شبیه سازی سطح برگ استفاده می شود که نیاز به اطلاعات گیاهی کمتری داشته باشد در این روش مقدار LAI با کمک یک تابع نمایی به مرحله رشد نرمالیزه شده NDS و به واحد دمایی که گیاه تجربه کرده است مرتبط می شود.

$$LAI_i = NDS / [NDS + \exp(AL - BL \times NDS)] \times LAIMAX \quad (8)$$

که در آن AL و BL ضرایب ثابت و پارامتر ورودی مدل هستند، LAIMAX نیز بیشینه شاخص سطح برگ مورد انتظار و پارامتر ورودی دیگری در مدل است. از معادله نمایی قبلاً در مدل های EPIC [۱۳] برای شبیه سازی سطح برگ استفاده شده است؛ بنابراین پارامترهای مورد نیاز این معادله را می توان از معادله های ذکر شده تهیه نمود. در این پژوهش داده های مورد نیاز طی برداشت های زمینی به منظور محاسبه شاخص سطح برگ از مرحله شروع رشد تا مرحله گلدهی گونه های مورد نظر صورت گرفت. ابتدا در دوره های زمانی رشد گیاه بعد از شروع رویش اقدام به جمع آوری پایه های پوشش

سلطانی و سینکلا [۳۳] روش هایی را برای پیش بینی زمان وقوع مراحل فنولوژیک به عنوان تابعی از دما، طول روز، بهاره سازی و کمبود آب ارائه داده اند؛ اما در مدل حاضر به دلیل این که گونه های متنوعی را پوشش می دهد و برای بیش تر آن ها اطلاعات کمی لازم مربوط به واکنش به طول روز و بهاره سازی در دسترس نیست مدل سازی فنولوژی بر اساس مفهوم واحد دمایی که برای کمبود آب تعدیل می شود، صورت می گیرد. مقدار واحد دمایی که گیاه در هر روز تجربه می کند^۱ (DTU، درجه سانتی گراد) بر اساس منحنی واکنش سرعت نمو گیاه به دما محاسبه می گردد و برای هر گونه کمبود آب اصلاح می شود.

$$DTU = (TP1D - TBD) \times tempfun \times WSFDS \quad (4)$$

که در آن DTU واحد دمایی روزانه، TP1D^۲ دمای مطلوب تحتانی برای گیاه، TBD^۳ دمای پایه برای گیاه tempfun ضریب اصلاحی سرعت نمو برای دما و WSFDS ضریب اصلاحی سرعت نمو برای کمبود آب است.

Tempfun همان منحنی واکنش سرعت نمو به دما یا تابع دمایی است که مقدار آن در دماهای مطلوب یک است و در دماهای غیر مطلوب کمتر از یک است و در دماهای کمتر از دماهای پایه یا بالاتر از دمای سقف TCD صفر است. Tempfun در هر روز با توجه به دمای آن روز (TMP، درجه سانتی گراد) و دماهای کاردینال گیاه با کمک یک تابع تکه ای محاسبه می شود.

Tempfun = 0	If	TMP ≤ TBD
= (TMP - TBD) / (TP1D - TBD)	If	TBD < TMP < TP1D
= 1	If	TP1D ≤ TMP ≤ TP2D
= (TCD - TMP) / (TCD - TP2D)	If	TP2D < TMP, TCD
= 0	If	TMP ≥ TCD

که در آن TBD و TP1D به ترتیب دماهای پایه، مطلوب اول، TP2D^۴ دمای مطلوب دوم و TCD^۵ دمای سقف هستند. مقدار واحد دمایی تجمعی (CTU، درجه سانتی گراد) از مبدأ کاشت یا شروع مجدد رشد بهاره یا باز شدن جوانه تا هر روز معینی که وضعیت نمو گیاه را نشان می دهد با معادله (۵) محاسبه می شود.

$$CTU_i = CTU_{i-1} + DTU_i \quad (5)$$

که در آن i روز مدنظر، i-1 روز قبل و DTU واحد دمایی تجربه شده در روز i هستند. در مدل شکل نرمالیزه شده ای از CTU به صورت زیر محاسبه می شود.

$$NDS_i = CTU_i / tuHAR$$

که در آن NDS واحد دمایی نرمالیزه شده است که مقدار آن در شروع شبیه سازی گیاهی صفر و در زمان رسیدگی برداشت در

1. Day temperature unit
2. Lower optimum temperature for development
3. Base temperature for development
4. Upper optimum temperature for development
5. Ceiling temperature for development

گیاهی شد و سپس با استفاده از نرم افزار فتوشاپ ابتدا برگ ها اسکن شدند. سپس با انتخاب سایز زمینه مناسب و بعد از آن نقطه گذاری دوره تصویر برگ ها آنالیز و مساحت برگ را به دست آورده شد. در این روش با استفاده از یک تناسب ساده مساحت برگ را برحسب سانتی متر مربع به دست آورده شد، از آنجا که مقیاس تعریف شده دارای ابعاد مشخص ۱۰ سانتی متر در ۱۰ سانتی متر بوده؛ لذا مساحت آن برحسب سانتی متر و پیکسل به دست آمده و با استفاده از تناسب بین تعداد پیکسل های برگ مورد نظر و مقیاس میزان سطح برگ بر اساس سانتی متر مربع به دست می آید.

تولید و توزیع ماده خشک در مدل SSM-icrop2

در این مدل تولید ماده خشک با روش ساده مبتنی بر کارایی استفاده از تشعشع RUE^۱ پیش بینی می شود. برای این منظور خصوصیات پوشش گیاهی شامل ضریب خاموشی KPAR^۲ و کارایی استفاده از تشعشع IRUE به عنوان پارامترهای ورودی مورد نیاز هستند. KPAR برای اکثر گونه های گیاهی و در مقیاس روزانه و نه لحظه ای معادل ۰/۶ تا ۰/۶۵ است. کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد در مدل استفاده می شود. مقدار PAR دریافت شده در هر روز FINT از شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (K برای PAR) بر اساس قانون بیر - بوگر - لامبرت در مدل محاسبه می شود [۳۱] مقدار ماده خشک تولید شده در هر روز DBP از حاصل ضرب PAR دریافت شده کسری از تشعشع رسیده که به وسیله جامعه گیاهی دریافت می شود FINT (بدون واحد) و RUE به دست می آید.

$$FINT = 1 - \exp(-K \times LAI) \quad (9)$$

در این معادله FINT کسری از نور رسیده به بالای تاج گیاه است که توسط تاج گیاه دریافت می شود، شاخص سطح برگ LAI ضریب خاموشی K است. بین مقدار نور دریافت شده و ماده خشک تولید شده در گیاه یک رابطه خطی وجود دارد. شیب این خط به عنوان کارایی استفاده از تشعشع RUE شناخته می شود.

RUE حاصل عمل فتوسنتز، تنفس و نگهداری و تنفس رشد است که در یک عدد خلاصه شده است. درواقع شیب خط ماده خشک تولیدی در مقابل PAR دریافت شده است. مقدار RUE در شرایط مطلوب رشد (IRUE) یعنی شرایط با دمای مناسب بدون کمبود آب و عناصر غذایی یک پارامتر گیاهی در مدل است که باید مقدار آن مشخص باشد؛ اما در مدل در هر روز مقدار IRUE برای دماهای نامناسب بالا یا پایین و تنش آب اصلاح می گردد و RUE اصلاح شده با معادله (۱۱) و (۱۲) به دست می آید:

$$DDMP = SRAD \times 0/48 \times FINT \times RUE \quad (11)$$

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \times WSFG \quad (12)$$

که در آن TCFRUE ضریب اصلاحی RUE برای دما و

1. Radiation use efficiency under optimal growth conditions
2. Extinction coefficient for photosynthetically active radiation

ضریب اصلاحی RUE برای تنش آب هستند و مقدار آن ها برحسب شرایط دمای هوا و آب و خاک بین صفر و یک متغیر است. با استفاده از مقدار شاخص سطح برگ روزانه و با استفاده از ضریب خاموشی برای گیاه K به عنوان یکی از پارامترهای ورودی مدل SSM-iCrop، مقدار کسر دریافت تشعشع دریافتی تجمعی محاسبه شده با معادله (۱۰) محاسبه می شود.

$$CDM = RUE \times CPAR \quad (10)$$

در این معادله CDM ماده خشک تجمعی، CPAR مقدار تشعشع دریافتی تجمعی و RUE کارایی استفاده از تشعشع است. تشکیل دانه بر اساس مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت محاسبه می شود [۳۳]. ابتدا مقدار بالقوه افزایش شاخص برداشت به ازای هر واحد دمایی در طول دوره پر شده دانه ((frTSG-frBSG) × tuHAR) به دست می آید. TuHAR، frBTG و frTTG به ترتیب واحد دمایی از کاشت تا رسیدگی برداشت، واحد حرارتی از کاشت تا شروع رشد دانه و واحد حرارتی از کاشت تا پایان رشد دانه است. در طول دوره پر شده میزان افزایش شاخص برداشت در هر روز DHI به صورت حاصل ضرب PDHI و واحد دمایی در آن روز DTU محاسبه می شود. میزان افزایش ماده خشک دانه از تولید جاری یا انتقال مجدد به صورت حاصل ضرب DHI و ماده خشک کل محاسبه می شود.

اطلاعات خاک

جدول زیر پارامترهای خاک مورد نیاز برای مدل را نشان می دهد. این اطلاعات درواقع برای یک لایه خاک که همان لایه مؤثر ریشه است تهیه و در مدل وارد شد. لایه فوقانی به ضخامت ۱۵ تا ۶۰ سانتی متر است. در پوشش های مرتعی چندساله عمق اولیه را می توان برابر با عمق مؤثر در نظر گرفت. در هر استان یک اطلاعات خاک غالب (بافت خاکی که بیش تر اراضی زراعی استان) در محدوده آن قرار دارد شامل آلیدو، شماره منحنی خاک، فاکتور زهکشی، مقدار آب خاک در حالت اشباع، مقدار آب در ظرفیت زراعی و مقدار آب قابل استخراج از طرح گرفته شد [۲۵].

اطلاعات مدیریت زراعی

مدل برای شبیه سازی رشد و تولید به اطلاعات مدیریت زراعی نیاز دارد. تاریخ کاشت یکی از مهم ترین ورودی های مدیریتی مورد نیاز مدل است که در گیاهان مرتعی تاریخ کاشت در نظر گرفته نمی شود و شروع جوانه زنی به عنوان شروع رشد در نظر گرفته می شود.

شبیه سازی رشد و عملکرد گیاهان

در این مرحله شبیه سازی رشد و عملکرد پوشش های گیاهی مراتع در واکنش به شرایط اقلیمی پایه انجام شد. شبیه سازی رشد، نمو و عملکرد گیاهان مورد مطالعه با استفاده از مدل SSM-iCrop2

جدول ۳: اطلاعات خاک مورد نیاز مدل SSM-iCrop2

اطلاعات ورودی	منخفف	واحد	مقدار
شیب زمین	SLOPE	m m-1	۱۰
عمق خاک	SOLDEP	mm	۱۲۰۰
طلبیدی خاک	SALB	-	۱۱
فاکتور زهکشی خاک	DRAINF	-	۲/۰
فاکتور زهکشی سطحی	SDRSINF	-	۵/۰
مقدار آب در خاک پس از خروج آب ثقلی	DUL	mm mm-1	۶۶۷/۰
کمینه مقدار آب در خاک	LL	mm mm-1	۵۱۷/۰
مقدار آب در خاک در زمان اشباع	SAT	mm mm-1	۷۵۶/۰
مقدار آب قابل دسترس خاک	EXTR	mm mm-1	۱۶/۰
شماره منحنی خاک	CN	-	۷۸

در مناطق رویشی (کوهستانی مرتفع) استفاده شد و با شناسایی گونه‌های گیاهی، میزان تولید مرتع برآورد شد. وضعیت مراتع در این مناطق (خوب) انتخاب شدند و بعد از پارامتریابی مدل مقدار تولید فعلی و آینده مراتع در چهار منطقه محاسبه شد.

ارزیابی مدل

برای پیش‌بینی تولید ماده خشک شده توسط مدل، از مقادیر کل ماده خشک اندازه‌گیری شده در چهار منطقه مورد مطالعه از سال‌های (پلور و رینه، ۲۰۲۰-۲۰۰۰) و (کنگر چال و پشتکوه، ۲۰۲۰-۲۰۱۴) استفاده شد [۲۵]. با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده اقدام به اجرای مدل برای منطقه‌های مورد مطالعه شد. برای ارزیابی تولید ماده خشک پیش‌بینی‌شده توسط مدل از مقادیر کل ماده خشک اندازه‌گیری از منطقه‌های مورد بررسی با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات استفاده شد.

نتایج و بحث

بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده و پارامترهای گیاهی مربوط به شبیه‌سازی واحد دمایی از شروع رشد تا مرحله رسیدگی و سطح برگ در مدل، پارامتریابی شدند.

واسنجی مدل

بر اساس نتایج پارامتریابی واحد دمایی تجمعی برای مراحل مختلف فنولوژیکی به ترتیب برای منطقه‌های پلور، رینه، کنگر چال و پشتکوه به ترتیب ۲۲۲۰، ۲۲۲۰، ۱۹۳۰ و ۲۶۲۰ درجه سانتی‌گراد و میزان بیشینه شاخص سطح برگ مورد انتظار به ترتیب ۱، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۷ است.

ارزیابی مدل

در شکل (۱) نتایج شبیه‌سازی تولید ماده خشک در منطقه‌های

انجام شد. این مدل رشد، نمو و عملکرد را به‌صورت روزانه به‌عنوان تابعی از شرایط آب‌وهوایی، خصوصیات خاک و مدیریت زراعی شبیه‌سازی می‌کند. در این شبیه‌سازی، متوسط مقدار CO_2 برای دوره پایه ۳۸۵ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد [۳۷].

پیش‌بینی تغییر اقلیم

برای شبیه‌سازی اقلیم آینده بر اساس مدل‌های مختلف گردش عمومی برای سناریوهای RCP4/5 غلظت CO_2 ، برای آینده نزدیک و میانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و (۲۰۴۱-۲۰۶۰) به ترتیب ۴۳۵ و ۴۸۵ قسمت در میلیون و برای سناریوی RCP8/5 غلظت CO_2 برای آینده نزدیک و میانی به ترتیب ۴۵۰ و ۵۴۰ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد [۳۷]. بعد از پارامتریابی مدل مقدار تولید فعلی و آینده مراتع در چهار منطقه محاسبه شد. به‌منظور مقایسه نتایج داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌شده از آماره‌های ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات استفاده شد.

اطلاعات مورد نیاز برای پارامتریابی مدل SSM-iCrop2

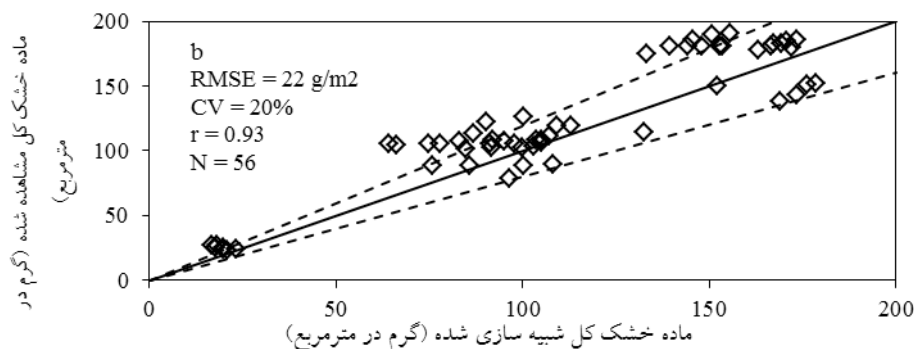
جهت پارامتریابی شامل تاریخ جوانه‌زنی، دوره رسیدگی، بیشینه عملکرد دانه، بیشینه شاخص سطح برگ مورد انتظار، میزان کارایی مصرف نور برحسب تشعشع فعال فتوسنتزی، شاخص برداشت گیاهان مرتعی بررسی شدند. پس از انجام پارامتریابی مدل با استفاده از اطلاعات منطقه‌های مورد بررسی مشخص شد که از ۳۷ پارامتر گیاهی مدل (مربوط به بخش‌های فنولوژی، سطح برگ، تولید ماده خشک، تشکیل عملکرد و روابط آب) برآورد ۲۹ پارامتر برای پوشش‌های گیاهی مرتعی با گیاهان زراعی مشابه بودند. پوشش‌های گیاهی مرتعی فقط از نظر هشت پارامتر گیاهی یعنی بیشینه شاخص سطح برگ مورد انتظار (LAIMX) و (RUE) و واحد دمایی از شروع رشد تا مرحله رسیدگی گیاه (tuHAR) متفاوت بودند. محاسبه میزان تولید مراتع در مناطق مورد نظر از پوشش‌های گیاهی

جدول ۴: مقادیر برآورد شده پارامترهای مدل SSM-iCrop2 برای پوشش مراتع

مقدار	مخفف	پارامتر
۲	TBD	دمای پایه برای رشد (°C)
۲۰	TP1D	دمای مطلوب پایین برای رشد (°C)
۳۰	TP2D	دمای مطلوب بالا برای رشد (°C)
۴۳	TCD	دمای سقف برای رشد (°C)
۲۵۰	ForReq	واحد دما از اول ژانویه تا رشد مجدد بهاره (°C)
۰۵۵/۰	frEMR	بخشی از tuHAR برای ظهور یا شروع رشد برگ (°C)
۷۰/۰	frBSG	بخشی از tuHAR برای شروع رشد دانه یا میوه (°C)
۹۰/۹	frTSG	بخشی از tuHAR برای خاتمه رشد دانه یا میوه (°C)
۹/۰	frPM	بخشی از tuHAR برای بلوغ فیزیولوژیکی (پایان تجمع ماده خشک (°C)
گسترش و پیری سطح برگ		
(۰۱/۰-۱/۰)	x1, y1	نقطه ۱ برای سطح برگ نرمال شده در مقابل واحد دمای نرمال شده * (x1, y1)
(۸/۰-۷/۰)	x2, y2	نقطه ۲ برای سطح برگ نرمال شده در مقابل واحد دمای نرمال شده * (x1, y1)
۷/۰	frBLS	بخشی از tuHAR برای شروع پیری برگ (°C)
۱	SRATE	ضریب سرعت پیری برگ
-۵	FrzTh	دمای پایین/آستانه انجماد برای مرگ برگ (°C)
۰۱/۰	FrzLDR	مرگ نسبی برگ به ازای هر درجه پایین تر از دمای پایین/آستانه انجماد
۳۰	HeatTH	دمای آستانه گرما برای پیری برگ (°C)
۱/۰	HtLDR	افزایش نسبی سرعت پیری برگ به ازای هر درجه بالاتر از آستانه گرما (°C)
تجمع ماده خشک		
۱۰	TBRUE	دمای پایه برای تولید ماده خشک (°C)
۲۰	TP1RUE	دمای بهینه پایین برای تولید ماده خشک (°C)
۳۰	TP2RUE	دمای بهینه بالا برای تولید ماده خشک (°C)
۳۵	TCRUE	دمای سقف برای تولید ماده خشک (°C)
۶/۰	KPAR	ضریب خاموشی تابش فعال فتوسنتزی
۷/۰	RUE	کارایی مصرف تابش در شرایط رشد بهینه (g MJ ⁻¹)
۸/۰	C3C4	ضریب واکنش RUE به غلظت CO ₂
تشکیل عملکرد		
۲/۰	HI _{max}	بیشینه افزایش شاخص برداشت/لایتر در شاخص برداشت (گرم در گرم در روز)
۰۲	FRTRL	بخشی از ماده خشک قابل انتقال مجدد از بافت رویشی به دانه‌ها/میوه‌های در حال رشد (گرم در گرم)
۱	GCC	ضریب تبدیل دانه (گرم در گرم)
روابط آب		
۰۶/۰	frBRG	کسر tuHAR برای شروع رشد ریشه (°C)
۷۰/۰	frTRG	کسر tuHAR برای پایان رشد ریشه (°C)
۱۰۰۰	iDEPORT	عمق اولیه ریشه‌ها در زمان ظهور یا شروع رشد برگ (mm)
۱۰۰۰	MEED	بیشینه عمق مؤثر استخراج آب از خاک (mm)
۴	TEC	ضریب راندمان تعرق (Pa)
۲۵/۰	WSSG	آستانه FTSW زمانی که تولید ماده خشک شروع به کاهش می‌کند
۳۵/۰	WSSL	آستانه FTSW زمانی که توسعه سطح برگ شروع به کاهش می‌کند
۰	WSSD	ضریبی که شتاب یا کندی توسعه را در پاسخ به کمبود آب مشخص می‌کند

به شکل (۱) اکثر نقاط از خط ۱:۱ در محدوده خطوط انحراف $\pm 20\%$ درصد هستند و تعداد مشاهدات ۵۶ بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده شبیه‌سازی ماده خشک با استفاده از این مدل موردقبول بود و می‌تواند نشان‌دهنده برآورد درست پارامترها و کارایی مدل در تخمین مقدار ماده خشک باشد.

مورد مطالعه با استفاده از مدل نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای کل ماده خشک اندازه‌گیری شده ۲۲ گرم در مترمربع بود که معادل ۲۰ درصد میانگین کل ماده خشک مشاهده‌شده بود. مقدار ضریب همبستگی برای رابطه بین مقدار کل ماده خشک شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده ۰/۹۳ بود. با توجه



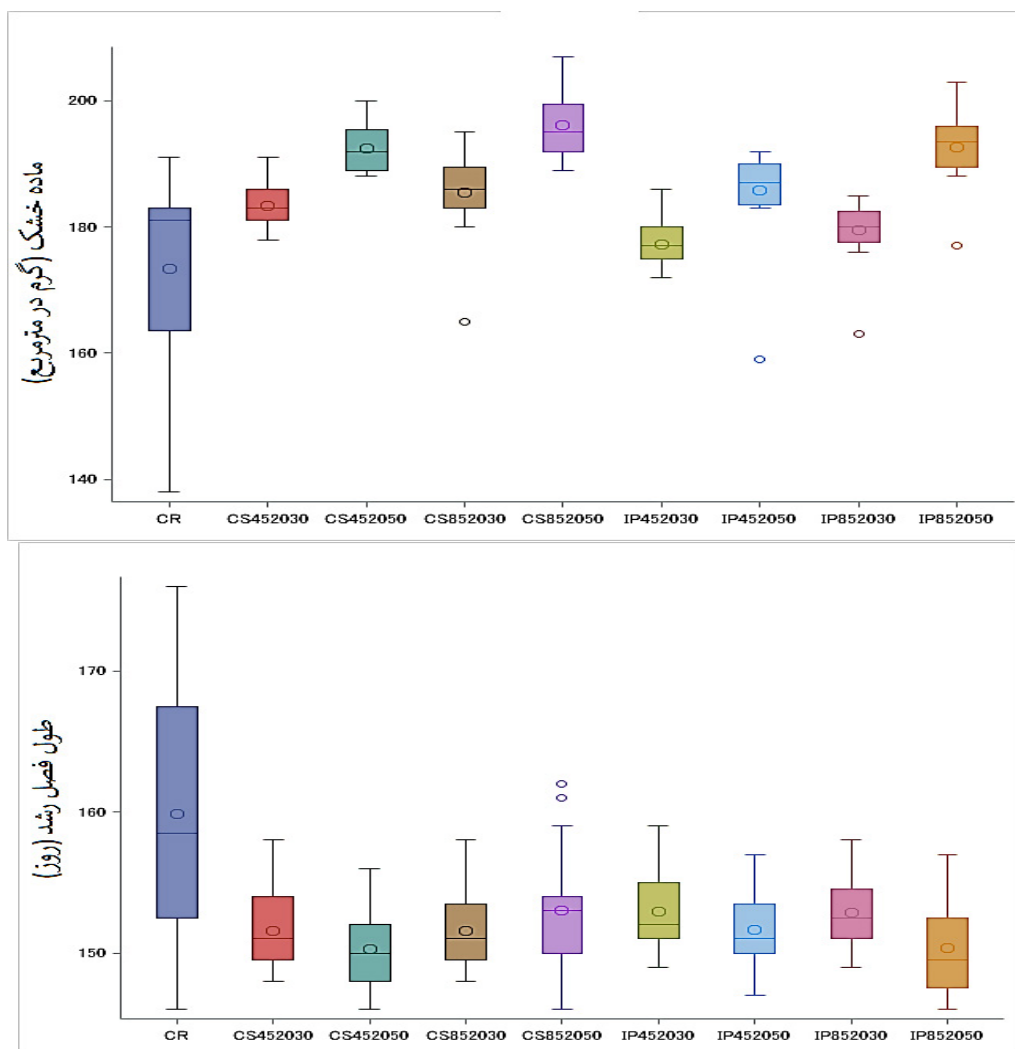
شکل ۱: نتایج ارزیابی مدل از مقدار ماده خشک مشاهده شده در مقابل شبیه سازی شده، دامنه ۲۰ درصد از اختلاف بین شبیه سازی شده و اندازه گیری شده توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است

با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه به ترتیب کاهش طول فصل رشد بین ۴/۷ و چهار درصد کاهش و به ترتیب ۱۵۳ و ۱۵۲ روز خواهد شد و میزان تغییر معادل هفت تا هشت روز است. کاهش طول فصل رشد تحت سناریوی RCP8/5 برای آینده نزدیک و میانی ۱۵۳ و ۱۵۰ روز خواهد شد که طول فصل رشد نسبت به دوره پایه چهار و ۵/۶ درصد کاهش خواهد یافت و مقدار تغییر معادل هشت و ۱۰ روز است.

بر اساس شکل (۳) میانگین تولید ماده خشک در منطقه رینه در شرایط فعلی ۱۰۲ گرم در مترمربع بود. با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۵ و ۱۰/۱ درصد پیش بینی شده است که این اختلاف معادل حدود ۵ و ۱۰ گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۱۰۷ و ۱۱۲ گرم در مترمربع خواهد رسید. هم چنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۶/۹ و ۱۲/۴ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل هفت و ۱۲ گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۱۰۹ و ۱۱۴ گرم در مترمربع خواهد رسید. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۱/۷ و هفت درصد پیش بینی شده است که این اختلاف معادل حدود یک و هفت گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۱۰۳ و ۱۰۹ گرم در مترمربع خواهد رسید. هم چنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۳/۶ و ۱۱ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل سه و ۱۱ گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۱۰۵ و ۱۱۳ گرم در مترمربع خواهد رسید. نوسان طول فصل رشد در منطقه رینه در شرایط آینده نسبت به شرایط فعلی کاهش خواهد یافت. متوسط طول فصل رشد در شرایط فعلی ۱۶۰ روز است. با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36

بر اساس شکل (۲) میانگین تولید ماده خشک در منطقه پلور در شرایط فعلی ۱۷۴ گرم در مترمربع بود. با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۵/۴ و ۱۰/۶ درصد پیش بینی شده است که این اختلاف معادل حدود ۸ و ۱۸ گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۱۸۳ و ۱۹۲ گرم در مترمربع خواهد رسید. هم چنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 تولید در دوره نزدیک و میانی افزایش خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۶/۶ و ۱۲/۸ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل ۱۱ و ۲۲ گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۱۸۵ و ۱۹۶ گرم در مترمربع خواهد رسید. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۱/۹ و ۶/۸ درصد پیش بینی شده است که این اختلاف معادل حدود سه و ۱۲ گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۱۷۷ و ۱۸۶ گرم در مترمربع خواهد رسید. هم چنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۳/۲ و ۱۰/۸ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل شش و ۱۹ گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۱۸۰ و ۱۹۳ گرم در مترمربع خواهد رسید. نوسان طول فصل رشد در منطقه پلور در شرایط آینده نسبت به شرایط فعلی کاهش نامحسوسی خواهد یافت. متوسط طول فصل رشد در شرایط فعلی ۱۵۹ روز است.

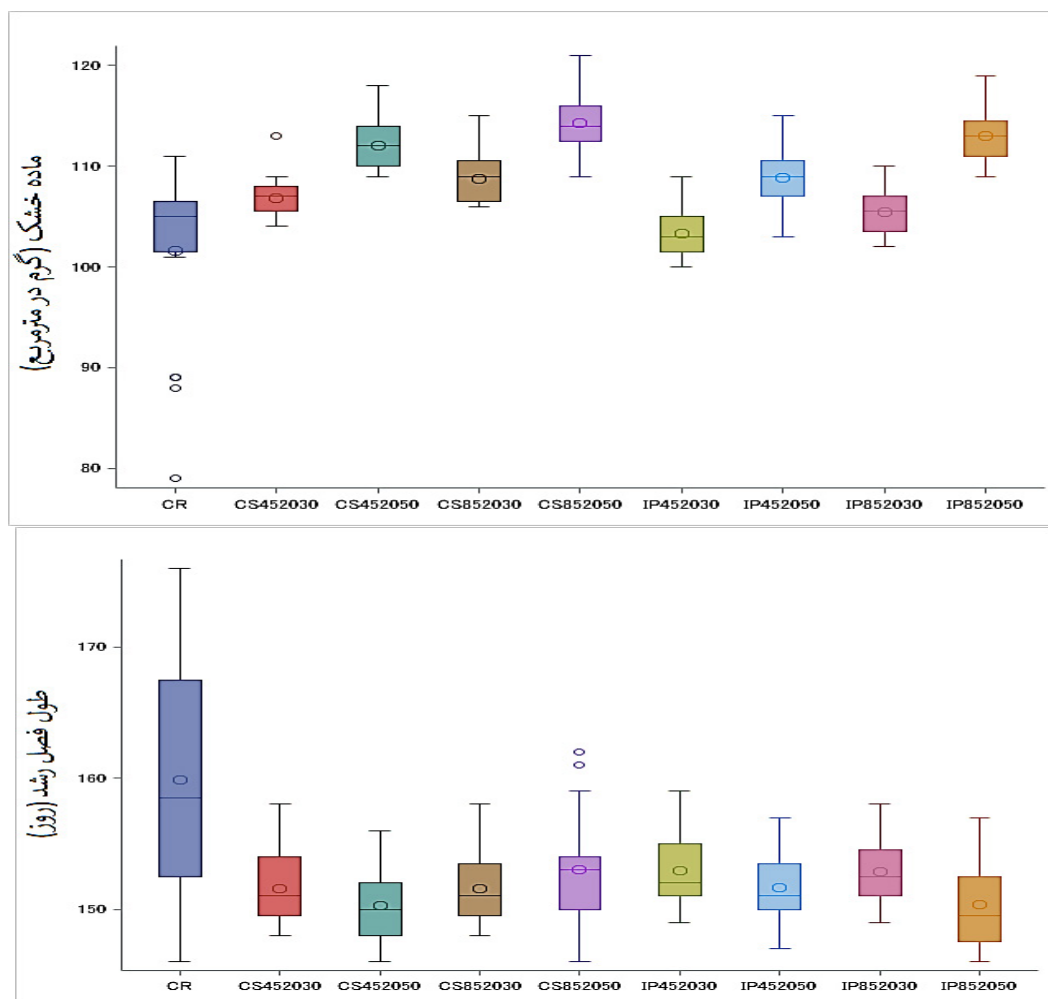
با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب طول فصل رشد بین پنج تا ۶/۲ درصد کاهش و به ترتیب ۱۵۲ و ۱۵۰ روز خواهد شد و میزان تغییر معادل هشت تا ۱۰ روز است. هم چنین، کاهش طول فصل رشد تحت سناریوی RCP8/5 برای آینده نزدیک و میانی به ترتیب ۱۵۲ و ۱۵۳ روز خواهد شد که طول فصل رشد نسبت به دوره پایه به ترتیب برای آینده نزدیک و میانی پنج و ۴/۳ درصد کاهش خواهد یافت و مقدار تغییر معادل هشت و هفت روز است.



شکل ۲: باکس پلات ماده خشک و طول دوره رشد در سناریوهای مختلف اقلیمی ایستگاه پلور (CR: شرایط فعلی؛ CS452030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS452050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ CS852030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS852050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP452030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP452050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP852030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP852050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره ۲۰۵۰)

۱۵۳ و ۱۵۰ روز خواهد شد که طول فصل رشد نسبت به دوره پایه ۴/۴ و ۵/۹ درصد کاهش خواهد یافت و مقدار تغییر معادل هشت و ۱۰ روز است. بر اساس شکل (۴) میانگین تولید ماده خشک در منطقه کنگر چال در شرایط فعلی ۱۱۴ گرم در مترمربع بود. با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۴/۹ و ۱۰ درصد پیش‌بینی شده است که این اختلاف معادل حدود پنج و ۱۱ گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۱۱۹ و ۱۲۵ گرم در مترمربع خواهد رسید. هم‌چنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار افزایش در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۶/۶ و ۱۲/۱ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل هفت و ۱۴ گرم در مترمربع

تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب طول فصل رشد بین ۶ تا ۵/۲ درصد کاهش و به ترتیب ۱۵۲ و ۱۵۰ روز خواهد شد و میزان تغییر معادل هشت تا ۱۰ روز است. هم‌چنین، کاهش طول فصل رشد تحت سناریوی RCP8/5 برای آینده نزدیک و میانی به ترتیب ۱۵۲ و ۱۵۳ روز خواهد شد که طول فصل رشد نسبت به دوره پایه به ترتیب برای آینده نزدیک و میانی ۵/۲ و ۴/۳ درصد کاهش خواهد یافت و مقدار تغییر معادل هشت و هفت روز است. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه به ترتیب کاهش طول فصل رشد بین ۴/۳ و ۵/۱ درصد کاهش و به ترتیب ۱۵۳ و ۱۵۲ روز خواهد شد و میزان تغییر معادل هفت تا هشت روز است. کاهش طول فصل رشد تحت سناریوی RCP8/5 برای آینده نزدیک و میانی

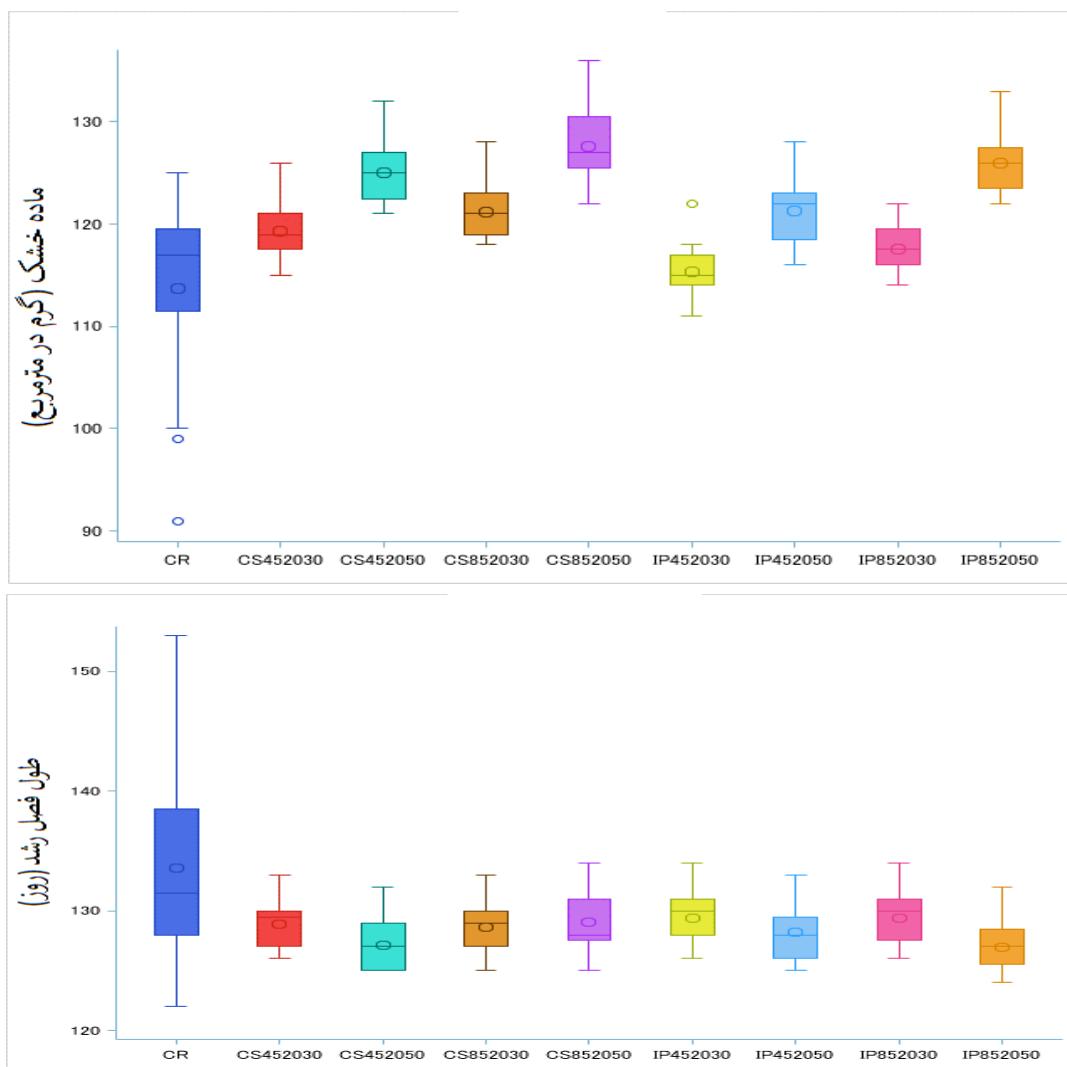


شکل ۳: باکس پلات ماده خشک و طول دوره رشد در سناریوهای مختلف اقلیمی ایستگاه رینه (CR: شرایط فعلی؛ CS452030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ CS452050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS852030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS852050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP452030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP452050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP852030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP852050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره ۲۰۵۰)

متوسط طول فصل رشد در شرایط فعلی ۱۳۴ روز است. با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب طول فصل رشد بین ۵/۳ تا ۸/۴ درصد کاهش و به ترتیب ۱۲۹ و ۱۲۷ روز خواهد شد و میزان تغییر معادل چهار تا شش روز است. همچنین، کاهش طول فصل رشد تحت سناریوی RCP8/5 برای آینده نزدیک و میانی ۱۲۹ روز خواهد شد که طول فصل رشد نسبت به دوره پایه بین ۷/۳ و ۴/۳ درصد کاهش خواهد یافت و مقدار تغییر پنج روز است. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه به ترتیب کاهش طول فصل رشد بین ۱/۳ تا چهار درصد کاهش و به ترتیب ۱۲۹ و ۱۲۸ روز خواهد شد و میزان تغییر معادل چهار تا پنج روز است. کاهش طول فصل رشد تحت سناریوی RCP8/5 برای آینده نزدیک و میانی ۱۲۹ و ۱۲۷ روز خواهد شد که

خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۱۲۱ و ۱۲۸ گرم در مترمربع خواهد رسید. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۵/۱ و ۷/۶ درصد پیش‌بینی شده است که این اختلاف معادل حدود یک و هفت گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۱۱۵ و ۱۲۱ گرم در مترمربع خواهد رسید. همچنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۴/۳ و ۷/۱۰ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل چهار و ۱۲ گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۱۱۸ و ۱۲۶ گرم در مترمربع خواهد رسید.

بر اساس شکل (۴) نوسان طول فصل رشد در منطقه کنگر چال در شرایط آینده نسبت به شرایط فعلی کاهش خواهد یافت.

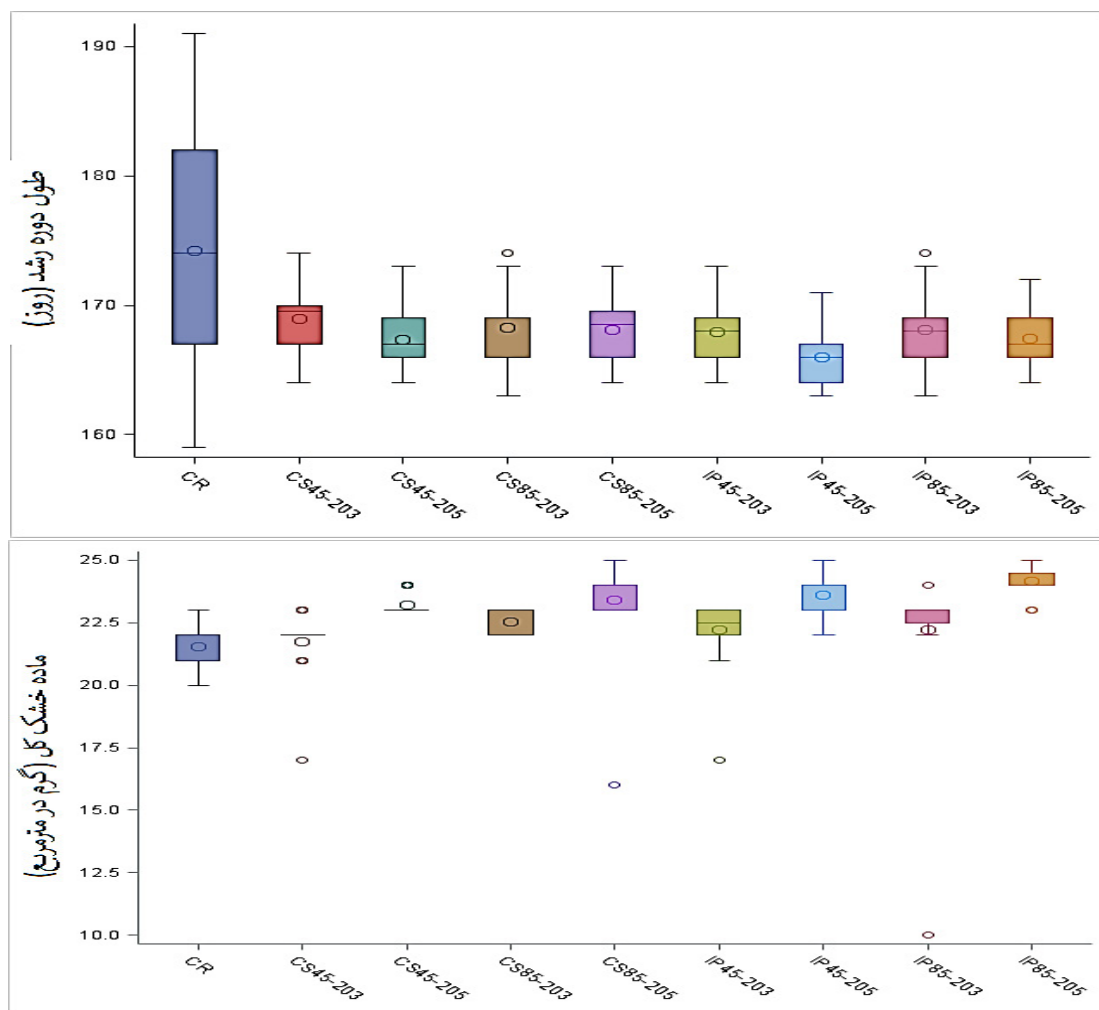


شکل ۴: باکس پلات ماده خشک و طول دوره رشد در سناریوهای مختلف اقلیمی ایستگاه کنگر چال (CR: شرایط فعلی؛ CS452030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS452050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ CS852030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS852050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP452030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP452050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP852030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP852050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره ۲۰۵۰)

خواهد رسید. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۱/۴ و ۹/۷ درصد پیش‌بینی شده است که این اختلاف معادل حدود دو گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۲۴ و ۲۲ گرم در مترمربع خواهد رسید. همچنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۳/۵ و ۱۲/۴ درصد افزایش خواهد داشت که معادل دو گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۲۴ و ۲۲ گرم در مترمربع خواهد رسید.

بر اساس شکل (۵) نوسان طول فصل رشد در شرایط آینده نسبت به شرایط فعلی کاهش خواهد یافت. متوسط طول فصل رشد در شرایط فعلی ۱۷۴ روز است. همچنین، کاهش طول فصل رشد بر

طول فصل رشد نسبت به دوره پایه ۳/۱ و پنج درصد کاهش خواهد یافت و مقدار تغییر معادل پنج و ۷- روز است. بر اساس شکل (۵)، میانگین تولید ماده خشک در منطقه پشتکوه در شرایط فعلی ۲۲ گرم در مترمربع بود. با استفاده از خروجی مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه، به ترتیب افزایش تولید تا ۱/۴ و ۸/۶ درصد پیش‌بینی شده است که این اختلاف معادل حدود یک گرم در مترمربع خواهد بود و به مقدار ۲۳ گرم در مترمربع خواهد رسید. همچنین تحت سناریوی RCP8/5 همانند سناریوی RCP4/5 افزایش تولید در دوره نزدیک و میانی خواهد داشت که مقدار تولید در دوره نزدیک و میانی به ترتیب تا ۴/۹ و ۱۱/۸ درصد افزایش خواهد داشت که به ترتیب معادل یک و دو گرم در مترمربع خواهد بود و مقدار تولید به ترتیب به ۲۳ و ۲۴ گرم در مترمربع



شکل ۵: باکس پلات ماده خشک و طول دوره رشد در سناریوهای مختلف اقلیمی ایستگاه پشتکوه (CR: شرایط فعلی؛ CS452030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS452050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ CS852030 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ CS852050 مدل اقلیمی CS سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP452030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP452050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP4/5 دوره زمانی ۲۰۵۰؛ IP852030 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۳۰؛ IP852050 مدل اقلیمی IP سناریوی اقلیمی RCP8/5 دوره زمانی ۲۰۵۰)

آینده نوسان تولید ماده خشک کاهش و مقدار تولید ماده خشک افزایش پیدا خواهد کرد که با توجه به نتایج در منطقه پلور در سال ۲۰۳۰ در سناریوهای اقلیمی بین دو تا هفت درصد و در سال ۲۰۵۰ در سناریوی اقلیمی بین هفت تا ۱۳ درصد افزایش خواهد یافت. در ادامه، با توجه به نتایج به دست آمده در منطقه رینه نیز متوسط تولید ماده خشک در شرایط فعلی ۱۰۲ گرم در مترمربع بوده که در سال ۲۰۳۰ در سناریوهای اقلیمی بین ۱/۷ تا هفت درصد و در سال ۲۰۵۰ در سناریوی اقلیمی بین هفت تا ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین متوسط تولید ماده خشک در منطقه کنگر چال در شرایط فعلی ۱۱۴ گرم در مترمربع بوده که در سال ۲۰۳۰ در سناریوهای اقلیمی بین یک تا هفت درصد و در سال ۲۰۵۰ در سناریوی اقلیمی بین پنج تا ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت و در منطقه پشتکوه در شرایط اقلیمی آینده، نوسان تولید ماده خشک کاهش و مقدار تولید

اساس سناریوی اقلیمی RCP8/5 بیش تر از RCP4/5 و در مدل اقلیمی CSIRO-MK36 نزدیک به IPSL-CM5A-MR خواهد بود. با استفاده از خروجی مدل IPSL-CM5A-MR تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه به ترتیب کاهش طول فصل رشد سه و ۴/۷ درصد پیش بینی شد و تحت سناریوی RCP8/5 در دو دوره نزدیک و میانه ۳/۵ و ۳/۹ درصد کاهش خواهد داشت. در ادامه با استفاده از مدل CSIRO-MK36 تحت سناریوی RCP4/5 در دوره نزدیک و میانه به ترتیب کاهش طول فصل رشد سه و ۱/۸ درصد پیش بینی شد و تحت سناریوی RCP8/5 در دو دوره نزدیک و میانه ۳/۴ و ۱/۸ درصد تغییر خواهد داشت. بر اساس نتایج به دست آمده از سناریوهای تغییر اقلیم برای دوره های آینده (۲۰۶۰-۲۰۲۱) برای مدل CSIRO-MK36 و IPSL-CM5A-MR افزایش دما و کاهش بارندگی را خواهیم داشت. با توجه به شرایط اقلیمی

ماده خشک کاهش خواهد یافت. بر این اساس، متوسط تولید ماده خشک در شرایط فعلی ۲۱ گرم در مترمربع بوده که در سال ۲۰۳۰ در سناریوهای اقلیمی بین چهار تا هشت درصد و در سال ۲۰۵۰ در سناریوی اقلیمی بین ۰/۳ تا دو درصد کاهش خواهد یافت. یافته‌های این مطالعه با پورشیرازی و همکاران [۵]، کرامت و همکاران [۱۴] همخوانی دارد.

به‌طورکلی در منطقه‌های کنگر چال، رینه و پلور و پشتکوه بارش نسبت به شرایط فعلی افزایش خواهد یافت. در هر دو مدل اقلیمی تحت سناریوهای ۸/۵ مقدار بارش نسبت به دوره پایه کمی افزایش خواهد داشت. هم‌چنین، مقدار بارش در مرحله گلدی تا رسیدگی افزایش خواهد یافت.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تولید گیاهان مرتعی برای منطقه‌های مورد مطالعه بیان می‌کند مدل SSM-iCrop2 با دقت خوبی شبیه‌سازی فنولوژی و تولید ماده خشک گیاهان مرتعی را انجام داده و نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترها و کارایی مدل در پیش‌بینی رشد و تولید گیاهان مرتعی است. نتایج با نتایج ترابی و همکاران [۳۶]، کمر و همکاران [۱۱] و رهبان و همکاران [۲۶] که باهدف استفاده از مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کلزا در سطح کشور با پارامتریابی مدل، سه رقم زودرس، متوسط رس و دیررس برای کلزا تعیین کردند و [۵] با تعیین پارامترهای گیاهی و ارزیابی عملکرد علوفه یونجه *Medicago sativa* با استفاده از مدل SSM-iCrop2 در مناطق عمده تولید آن در ایران و ارزیابی مدل بر اساس داده‌های آزمایشی مستقل از مرحله پارامتریابی کردند همخوانی دارد. [۲۲] در شبیه‌سازی مدل SSM-iCrop2 برای ۲۰ سال اخیر بیان کردند تولید علوفه مرتع ۱۰/۸۵ میلیون تن در سال برای کل ایران است؛ ولی کمینه تولید سالانه ۸ میلیون تن در سال است که شبیه‌سازی برای آینده (۲۰۳۰ و ۲۰۵۰) بر اساس سناریوی RCP8/5 نشان داد متوسط تولید مرتع کاهش می‌یابد. این کاهش برای ۲۰۵۰ بیش‌تر و حدود پنج درصد است. تغییر تولید بسته به استان و شرایط مراتع متفاوت بوده است؛ بنابراین با توجه به این مطالعه می‌توان از نتایج برای ارزیابی میزان تولید مراتع نواحی کوهستانی استفاده کرد و با تکرار و مطالعه بیش‌تر از این مدل برای سایر مناطق آب‌وهوایی نیز اندازه‌گیری انجام داد. افزایش دی‌اکسید کربن در غلظت‌های پیش‌بینی شده در اتمسفر به‌تنهایی تأثیر منفی بر روی رشد گیاه ندارد. رشد گیاه افزایش می‌یابد یا تغییر نمی‌کند؛ ولی کاهش نخواهد یافت [۳۳]. هم‌چنین، مطالعات نشان داده افزایش دی‌اکسید کربن در جو ممکن است باعث افزایش لایه چوبی شود. ماگوستی و همکاران [۲۰] و سندا و همکاران [۲۷]. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند که افزایش سطح دی‌اکسید کربن ممکن است مقدار تعرق علف‌ها را کاهش دهد و باعث نفوذ عمیق‌تر آب شود که به‌نوبه خود از استقرار نهال درختان و افزایش

رشد بسیاری از درختان حمایت می‌کند. افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم سرعت رشد گیاه را افزایش داده و بنابراین طول دوره رشد گیاه کوتاه‌تر می‌شود؛ یعنی گیاه زودتر گل داده و زودتر به مرحله رسیدگی خواهد رسید. در تمامی منطقه‌های موردبررسی در این مطالعه، در شرایط اقلیمی آینده طول دوره رشد کاهش خواهد یافت. با افزایش طول دوره رشد تولید ابتدا افزایش می‌یابد، در یک محدوده طول دوره رشد به بیشینه تولید خود می‌رسد و با افزایش بیش‌تر در طول دوره رشد، تولید کاهش می‌یابد [۳۳].

تأثیر نهایی افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، افزایش دما و تغییر بارش ناشی از تغییر اقلیم در سه منطقه کنگر چال، رینه و پلور منجر به کاهش طول دوره رشد و افزایش تولید نسبت به شرایط فعلی و در منطقه پشتکوه کاهش طول دوره رشد و کاهش تولید نسبت به شرایط فعلی خواهد شد. دلیل تفاوت تولید در منطقه پشتکوه با سایر منطقه‌ها توزیع نامناسب بارش و کاهش بارش در انتهای فصل رشد بود. در مورد اثرات تغییر اقلیم آینده بر پوشش گیاهی و زیست‌توده در مراتع کوهستانی آسیا نیز گزارشات متناقضی وجود دارد. در برخی از مطالعات کاهش در پوشش گیاهی و زیست‌توده ناشی از تغییر اقلیم توسط کلین و همکاران [۱۷] و هاپینگ و همکاران [۷] و در گزارشات گنجورچاو و همکاران [۶] و ثریا و همکاران [۳۷] افزایش پوشش گیاهی بیان شده است. خو و همکاران [۱۸] بیان داشتند که این یافته‌های متفاوت را می‌توان تا حدی با رژیم‌های بارش در این مکان‌ها توضیح داد. به‌طورکلی، طول فصل رشد در تمام ایستگاه‌ها و سناریوهای اقلیمی نسبت به زمان حاضر کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان به تجمع سریع‌تر درجه روزهای رشد در گیاه و در نتیجه افزایش سرعت رشد آن نسبت داد.

کار اندیش و همکاران [۱۲] بیان کردند که افزایش دمای میانگین با دوره رشد گیاه رابطه منفی داشته و با افزایش دما طول دوره رشد کاهش می‌یابد. در شرایط دیم، س تأثیر تغییر اقلیم مشابه شرایط آبی است با یک تفاوت بزرگ و آن این است که کاهش فصل رشد در اثر افزایش دما در شرایط دیم لزوماً منفی نیست و حتی می‌تواند مثبت باشد. در شرایط دیم، کاهش فصل رشد و زودرسی موجب فرار گیاه از خشکی انتهای فصل می‌شود و در نتیجه گیاه در مرحله پرشدن دانه با تنش خشکی کم‌تری مواجه خواهد بود و نهایتاً باعث افزایش عملکرد خواهد شد میزان تأثیر تغییر اقلیم از این طریق، با توجه به شدت تنش خشکی انتهای فصل رشد متغیر است. سلطانی و سینکلی [۳۲] افزایش ۲۶/۲ درصدی در متوسط عملکرد محصول نخود دیم را در شمال غرب ایران به دلیل کاهش دوره رشد گیاه و زودرس‌تر شدن آن و در نتیجه انطباق بهتر رشد گیاه در شرایط دیم با ذخیره آبی خاک و کاهش دوره تنش انتهای فصل رشد گزارش کردند. در خصوص اثر بارش بر تولید مرتع، آب محدودکننده‌ترین منبع در مراتع خشک و نیمه‌خشک است [۳۰]. تغییر اقلیم به‌شدت بر الگوهای بارش و مقدار تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد که به‌طور بالقوه منجر به تغییرات عمده در دسترس بودن آب خاک می‌شود

J. A. 2018. Warming and land use change concurrently erode ecosystem services in Tibet. *Global Change Biology*, 24(11), 5534–5548.

8- Hovenden, M. J., Newton, P. C., Wills, K. E., Janes, J. K., Williams, A. L., Vander Schoor, J. K., and Nolan, M. J. 2008. Influence of warming on soil water potential controls seedling mortality in perennial but not annual species in a temperate grassland. *New Phytologist*, 180(1), 143-152.

9-Hudson, L.N., Newbold, T., Contu, S., Hill, S.L., Lysenko, I., De Palma, A., Phillips, H.R., Senior, R.A., Bennett, D.J., Booth, H., and Choimes, A., 2014. The PREDICTS database: a global database of how local terrestrial biodiversity responds to human impacts. *Ecology and evolution*, 4(24), 4701-4735.

10-Jochum, G.M., Mudge, K.W., and Thomas, R.B., 2007. Elevated temperatures increase leaf senescence and root secondary metabolite concentrations in the understory herb *Panax quinquefolius* (Araliaceae). *American Journal of Botany*, 94(5), 819-826.

11-Kamari, H., Zeinali, E., Soltani, A., and Ghaderifar, F. 2019. Parameterization and evaluation of the SSM-iCrop2 model for predicting cotton growth and yield in Iran. *Simulation of cotton growth and yield using the SSM-iCrop2 model. Journal of Iranian Cotton Research*. 8(2). 72-49. (In Persian)

12-Karandish, F. Mousavi, S. and Tabari, H. 2016. Temporal and spatial changes in precipitation in Iran under the influence of climate change until the year 2100. (In Persian)

13-Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A., and Jones, R.G., 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, Vol. 92, pp. 41-63.

14-Keramat, Saleh, Torabi, B, Soltani, F, and Zainali, A. 2023. Parameterization and evaluation of the SSM-iCrop2 model for simulating rice plant growth and yield in Iran. *Journal of Plant Production Research*, 30 (1), 47-21. (In Persian)

15-Khaliqi, M.M. Khaliqi, N., and Farahpour, M. 2006. Investigating the social and ecological sustainability of rangeland exploitation methods.

[۲۷]. افزایش بارش اثر مثبت بر مرتع دارد و در نتیجه افزایش تولید را به دنبال دارد. همچنین، تغییر توزیع بارش در اثر تغییر اقلیم بر تولید مرتع مؤثر است. اگر تغییر اقلیم توزیع بارش را مناسب‌تر کند باعث افزایش تولید خواهد شد و برعکس اگر توزیع بارش را نامناسب‌تر کند سبب کاهش تولید خواهد شد [۳۳].

پیشنهاد می‌شود از نتایج این تحقیق برای سایر نقاط کشور که دارای شرایط همانند با مناطق مورد مطالعه هستند استفاده کرد. با توجه به پارامتریابی و ارزیابی مدل، با داشتن اطلاعات بیش‌تر در خصوص گیاهان مرتعی امکان برآورد و پیش‌بینی تولید ماده خشک برای سایر مناطق نیز است. در صورت ارزیابی مدل در سایر مناطق اقلیمی، با توجه به پیش‌بینی میزان تولید در آینده، حد بهره‌برداری مجاز از مراتع تعیین شود.

منابع

1-Abkar, A. J., Habibnejad, M., Soleimani, K., and Naqvi, H. 2013. Investigating the efficiency of the SDSM model in simulating temperature indices in arid and semi-arid regions. *Quarterly Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering*. 14. 17-1. (In Persian)

2-Amiri, E., and Rezaei, R. 2009. Testing the modelling capability of ORYZA2000 under water–nitrogen limit conditions in northern Iran. *World Applied Sciences Journal*, 6(8), 1113-1122. (In Persian)

3-Bond, W.J., and Midgley, G.F. 2000. A proposed CO₂-controlled mechanism of woody plant invasion in grasslands and savannas. *Global Change Biology*, 6(8), 865-869.

4-Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., and Zeinali, E. 2020. Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. *Potato Res.* 1-19. (In Persian)

5-Dukes, J.S., N.R. Chiariello, E.E. Cleland, L.A. Moore, M.R. Shaw, et al. 2005. Responses of grassland production to single and multiple global environmental changes. *PLoS Biology* 3(10): e319.

۶-Ganjurjav, H., Gao, Q., Zhang, W., Liang, Y., Li, Y., Cao, X., Wan, Y., Li, Y., and Danjiu, L. 2015. Effects of warming on CO₂ fluxes in an alpine meadow ecosystem on the central Qinghai-Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 10(7), e0132044.

7-Hopping, K. A., Knapp, A. K., Dorji, T., and Klein,

- 25-Polley, H.W., Bailey, D.W., Nowak, R.S., and Stafford-Smith, M., 2017. Ecological consequences of climate change on rangelands. *Rangeland systems: Processes, management and challenges*, 229-260.
- 26-Pourshirazi, Sh. Soltani, H. Zainali, A. and Torabi, B. 2023. Parameterization and evaluation of the iCrop2-SSM model for predicting alfalfa growth and yield in Iran, *Journal of Agricultural Ecology*, 15(1), 169-189. (In Persian)
- 27-Rahban, S. Torabi, B. Soltani, L. and Zainali, A. 2021. Using the SSM-iCrop model to predict the phenology, yield and water efficiency of rapeseed under Iranian conditions. *Journal of Agricultural Ecology*. 13(1), 157-177. (In Persian)
- 28-Sedaghatkarder, A., and Fattahi, E. 2008. Warning of drought indices in Iran, *Journal of Geography and Development*, University of Sistan and Baluchestan; 6 (11): 76-59. (In Persian)
- 29-Senda, T.S., Kiker, G.A., Masikati, P., Chirima, A., and van Niekerk, J., 2020. Modeling climate change impacts on rangeland productivity and livestock population dynamics in Nkayi District, Zimbabwe. *Applied sciences*, 10(7), 23-30.
- 30-Sherry, R.A., E. Weng, J.A. Arnone, D.W. Johnson, D.S. Schimel, P.S. Verburg, L.L. Wallace., and Luo, Y. 2008. Lagged effects of experimental warming and doubled precipitation on annual and seasonal aboveground biomass production in a tallgrass prairie. *Global Change Biology* 14, 2923-2936.
- 31-Sinclair, T., Farias, J., Neumaier, N., and Nepomuceno, A. 2003. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. *Field Crop Res.* 81, 149-158.
- 32-Smith, S.D., and R.S. Nowak. 1990. Ecophysiology of plants in the Intermountain lowlands. In *Ecological studies*, eds. C.B. Osmond, L.F. Pitelka, and G.M. Hidy. Vol. 80. Plant biology of the basin and range. Heidelberg: Springer-Verlag.
- 33-Soltani, A., and T.R. Sinclair, 2012. Modeling physiology of crop development, growth and yield. CAB International, Wallingford, UK. (In Persian)
- 34-Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency, *Simulation in a temperate, sub-humid Rangeland and Desert Research*. 13, 82-93. (In Persian)
- 16-Khodamoradpour, M. Khani, F. and Mahmoudvand, R. 2018. Forecasting climate change in air temperature using the RegCM model coupled with the lake model in the next decade (case study of northwest and west Iran). *Second National Conference on Meteorology and Hydrology of Iran*, 19. (In Persian)
- 17-Klein, J. A., Harte, J., and Zhao, X. Q. 2007. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 17(2), 541-557.
- 18-Kohli, M., Mijiddorj, T.N., Suryawanshi, K.R., Mishra, C., Boldgiv, B., and Sankaran, M., 2021. Grazing and climate change have site-dependent interactive effects on vegetation in Asian montane rangelands. *Journal of Applied Ecology*, 58(3), pp.539-549
- 19-Louhaichi, M., Ouled Belgacem, A., Petersen, S.L., and Hassan, S., 2019. Effects of climate change and grazing pressure on shrub communities of West Asian rangelands. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 11(5), 660-671.
- 20-Mokgotsi, R.O., 2018. Effects of bush encroachment control in a communal managed area in the Taung region, North West Province, South Africa (Doctoral dissertation, North-West University).
- 21- Morgan, J. A., LeCain, D. R., Pendall, E., Blumenthal, D. M., Kimball, B. A., Carrillo, Y., ... and West, M. C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. *Nature* 476, 202-206.
22. Miller, J., Franklin, J., and Aspinall, R. 2007. Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. *Ecology Model*, 202: 225-242
- 23-Nehbehndani, A., Barani, H., Soltani, A., and, Torabi, B. 2019. Modeling production in the country's deserts under current and future climatic conditions. *Agricultural Research, Education and Extension Organization*. (In Persian)
- 24-Ouled Belgacem, A., and Louhaichi, M., 2013. The vulnerability of native rangeland plant species to global climate change in the West Asia and North African regions. *Climatic Change*, 119, 451-463.

crops in Iran, Appendix 7 in Soltani et al. 2019. Analysis of the country's food security until 2050 by modeling the interrelationship of water, land, food and the environment: Perspectives and necessary policies. Research project report. Agricultural Research, Education and Extension Organization. (In Persian)

39-Wang, Q-x., Fan, X-h., Qin, Z-d., and Wang, M.-b. 2012. Change Trends of Temperature and Precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961–2010. *Global and Planetary Change*, 138–147.

environment. (In Persian)

35-Soltani, A., and Mirzaei, A.R. 2021. Sustainable Agriculture. (In Persian)

36-Soraya, M., Tavousi, T., and Amini, M. 2007. Study of the trend of changes in monthly temperature characteristics of Zahedan city during the last half century. Master's thesis, Faculty of Humanities, University of Sistan and Baluchestan. (In Persian)

37-Tebaldi, C., and Lobell, D. 2015. Estimated impacts of emission reductions on wheat and maize crops. *Climatic Change*. DOI 10.1007/s10584-015-1537-5.

38-Torabi, B., A., Soltani, S. Rahban, A. Habib-Pour-Kashfi, S., and Pourshirazi, M. Alimoqam. 2019. Assessment of the impact of future climate on the performance of important agricultural and horticultural



Abstract

Parameterization and Evaluation of the SSM-iCrop2 Model for Predicting Rangeland Forage Production (Case Study: Middle Alborz Mountainous Regions)

M. Parsa^{1*}, H. Barani², A. Bahreman³, A. Soltani⁴ and H. Ghelichnia⁵

Received: 2026/06/15 Accepted: 2026/08/03

Climate change is one of the biggest challenges that humanity has faced in the 21st century because it can have severe impacts on water resources, agriculture, energy, tourism, and even human bioclimate. One of the appropriate tools for estimating rangeland production based on climate data is simulation models. Since vegetation, as one of the important components of natural ecosystems, is highly influenced by climate, many indicators and models have been presented regarding the relationship between climate and vegetation that can better describe the existing relationships and mutual effects. This study aimed to determine the parameters affecting rangeland plant production in the mountainous areas of the Middle Alborz and to assess the impact of climate change using the LARS WG6 climate model and the SSM-iCrop2 model in the regions (Plor, Raine, Kangar Chal, and Poshtkooh). In this study, statistical data from the Abali synoptic meteorological station since (1983) and Kiasar since (2002) of Mazandaran province were collected for a 15-year period and the data (minimum temperature, maximum temperature, rainfall and daily solar radiation) were entered into the SSM-iCrop2 model to estimate dry matter production. Next, the output of the GCM climate change model in the study areas was evaluated using the downscaled LARS-WG6 model and considering the RCP4/5 and RCP8/5 climate change scenarios. In the SSM-iCrop2 production model, production and phenology parameters were calculated and then estimated by applying the two CSIRO-MK36 and IPSL-CM5A-MR climate change scenarios. According to the model outputs, in both RCP4/5 and RCP8/5 scenarios, maximum and minimum temperatures and precipitation will increase in both the periods 2040-2021 and 2041-2060. The rainfall, maximum and minimum temperatures will increase by 0.91-0.97%, 1.7-2.2% and 1.56-1.88°C for Abali station respectively and by 0.87-0.96%, 1.72-2.18% and 1.62-1.89°C for Kiasar station respectively compared to the base period. The production assessment showed that the root mean square error for dry matter production was 22 g/m², which is equivalent to 21% of the total observed dry matter average and the coefficient of variation was 20%, which indicated that the simulation using the SSM-iCrop2 model was satisfactory and the parameters and model efficiency in predicting the growth and production of rangeland plants were acceptable. Considering the climate change scenarios for the near future (2021-2040) and the distant future (2041-2060) in all four study sites, the length of the growing season will decrease and rangeland production will increase.

Keywords: Production forecast, Temperature change, Growing season length, Climate model, Crop production estimation model

1- PhD in Rangeland Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2- Department of Rangeland Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

3- Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Department of Agriculture, Faculty of Agricultural Plant products, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

5- Forest and Rangeland Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Research Organization, Sari, Iran