

ارزیابی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر میزان پوشش گیاهی مراتع خشک و نیمه خشک

مریم پیرمحمدی بارده،^۱ پژمان طهماسبی کهیانی،^{۲*} اسماعیل اسدی بروجنی،^۳ محسن فعال فیض آبادی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

چکیده

هدف این پژوهش، ارزیابی کمی اثرات سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی مراتع و نیمه خشک در استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان بود. داده‌های اقلیمی آینده تحت چهار سناریوی انتشار مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 و با استفاده از مدل MRI-ESM2-0 استخراج گردید. پس از نمونه برداری میدانی و اندازه‌گیری شاخص‌های پوشش گیاهی، روابط بین متغیرهای اقلیمی (میانگین دمای سالانه و بارش سالانه) و پوشش گیاهی با به‌کارگیری چهار الگوریتم مختلف شامل جنگل تصادفی، مدل تعمیم‌یافته افزایشی، مدل خطی تعمیم‌یافته و ماشین بردار پشتیبان مدل‌سازی شد. ارزیابی دقت مدل‌ها نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با داشتن بالاترین ضریب و کمترین خطای مربعات میانگین ریشه، بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی پوشش گیاهی دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۱۰۰، الگوهای مکانی-زمانی کاملاً متمایزی از تغییرات پوشش گیاهی را در سه منطقه مطالعاتی (مرجن، قمیشلو و سنگ سفید) آشکار ساخت. منطقه مرجن با افزایش نسبی پوشش گیاهی در بلندمدت، سازگاری و مقاومت بالایی از خود نشان داد. در مقابل، منطقه سنگ سفید با کاهش تدریجی و قابل توجه پوشش گیاهی، به‌عنوان آسیب‌پذیرترین منطقه شناسایی شد. منطقه قمیشلو نیز رفتاری پویا و غیرخطی از خود بروز داد که حاکی از تاب‌آوری اکولوژیک نسبی این منطقه بود.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، سناریوهای SSP، پوشش گیاهی، مراتع، مدل‌سازی اکولوژیکی.

۱. دانشجوی دکتری علوم مرتع، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران. maryampirmohamadi6@yahoo.com

۲. دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران، نویسنده مسئول، peyman.tahmasebi@sku.ac.ir

۳. دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران. asadi-es@sku.ac.ir

۴. دکتری تخصصی، اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان کاشمر، ایران. mo.faal65@gmail.com

مقدمه

مراعات خشک و نیمه خشک، به عنوان یکی از گسترده ترین و کلیدی ترین اکوسیستم های خشکی کره زمین، خدمات اکوسیستمی متعددی و حیاتی ارائه می دهند. این خدمات شامل تولید علوفه برای دامداری، حفاظت از خاک در برابر فرسایش، ترسیب کربن و حفظ تنوع زیستی می شود (بردگت و واردل،^۱ ۲۰۲۳؛ فائو،^۲ ۲۰۲۳)؛ به ویژه، نقش این مراعات در ترسیب کربن و کاهش غلظت گازهای گلخانه ای در اتمسفر، جایگاه آن ها را به عنوان یک راهکار طبیعی مؤثر در مقابله با تغییر اقلیم برجسته ساخته است (ارب^۳ و همکاران، ۲۰۲۲؛ آزاد و افضلی، ۲۰۲۲).

با این حال، پدیده تغییر اقلیم به عنوان یک چالش فراگیر و تعیین کننده، این خدمات حیاتی را به طور فزاینده ای با تهدید مواجه ساخته است. افزایش دمای جهانی، تغییر الگوهای بارش و افزایش تناوب و شدت رویدادهای حدی آب و هوایی مانند خشکسالی های طولانی مدت، آثار مستقیم و عمیقی بر ساختار، عملکرد و پایداری مراعات بر جای می گذارد (آی پی سی سی، ۲۰۲۳). این تغییرات اقلیمی می تواند منجر به ایجاد تنش آبی شدید، دگرگونی ترکیب گونه ای جامعه گیاهی به سمت گونه های سازگار با خشکی و گرما و در نهایت، تخریب و فرسایش خاک شود (هاور^۴ و همکاران، ۲۰۲۴؛ لیون اسپرگر^۵ و همکاران، ۲۰۲۳؛ رید^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). چنین پیامدهایی نه تنها ثبات و سلامت خود اکوسیستم های مرتعی، بلکه معیشت و رفاه میلیون ها نفر از جوامع محلی و روستایی را که به طور مستقیم یا غیرمستقیم به این عرصه ها وابسته اند، به مخاطره می اندازد (رید و همکاران، ۲۰۲۳).

تهدیدات ناشی از تغییر اقلیم در مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه خشک مانند ایران، با شدت و حدت بیشتری ظهور یافته و مشاهده می شود. داده های بلندمدت هواشناسی در ایران نشان از روند افزایش دما و کاهش بارش، به ویژه در مناطق مرکزی و غربی کشور دارد. این تغییرات نامساعد اقلیمی، در کنار

فشارهای انسانی از جمله چرای مفرط دام و مدیریت ناپایدار، منجر به تخریب گسترده پوشش گیاهی مراتع، کاهش شدید تولید علوفه، فقر گونه ای و شتاب گیری روند بیابان زایی شده است (حسینی و همکاران، ۲۰۲۳؛ غلامی و همکاران، ۲۰۲۴). در این بستر ملی، استان چهارمحال و بختیاری به دلایل متعددی در کانون توجه و نگرانی قرار دارد. این استان به عنوان یکی از مهم ترین کانون های تولید آب کشور (سرچشمه رودخانه های بزرگی چون کارون، زاینده رود و دز) و با توپوگرافی حساس کوهستانی، در برابر کوچک ترین نوسانات دما و بارش بسیار آسیب پذیر است (صفری و همکاران، ۲۰۲۳).

در چنین شرایط حساسی، برنامه ریزی برای مدیریت پایدار و خردمندانه مراعات، بدون در نظر گرفتن تغییرات پیش روی اقلیمی، ناقص و بی اثر خواهد بود. در این راستا، سناریوهای مسیرهای اشتراکی-اجتماعی-اقتصادی SSP ها که توسط جامعه علمی بین المللی توسعه یافته اند، چارچوبی جامع و قدرتمند برای تصویرسازی شرایط محتمل آینده تحت مسیرهای مختلف توسعه ارائه می کنند (هانگ^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف اصلی ارزیابی کمی اثرات سناریوهای مختلف تغییر اقلیم شامل SSP2-4.5، SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بر پویایی و ساختار پوشش گیاهی مراعات خشک و نیمه خشک در استان های چهارمحال و بختیاری و اصفهان طراحی و اجرا شده است.

برای دستیابی به این هدف، از داده های آینده نگر اقلیمی مدل MRI-ESM2-0 تحت پروژه CMIP6 استفاده شد. همچنین، برای مدل سازی روابط پیچیده بین متغیرهای اقلیمی کلیدی (میانگین دمای سالانه و بارش سالانه) و شاخص های پوشش گیاهی، چهار الگوریتم قدرتمند یادگیری ماشین (شامل جنگل تصادفی، مدل افزایشی تعمیم یافته، ماشین بردار پشتیبان و مدل خطی تعمیم یافته) به کار گرفته شد. شبیه سازی و پیش بینی تغییرات مکانی-زمانی پوشش گیاهی برای سه منطقه مطالعاتی با شرایط اکولوژیک متمایز (مرجن، قمیشلو و سنگ سفید) در یک بازه زمانی بلندمدت (۲۰۲۱-۲۱۰۰) انجام پذیرفت.

1. Bardgett & Wardle
2. FAO
3. Erb
4. Hoover
5. Livensperger
6. Reid

مواد و روش ها

مناطق مورد مطالعه

در این مطالعه، یک منطقه در استان چهارمحال و بختیاری (مرجن) و دو منطقه در استان اصفهان (قمیشلو، سنگ سفید) با توجه به شرایط اقلیمی و با توجه به قرارگیری آن‌ها در طول گرادیان بارش و دما جهت انجام تحقیق انتخاب شدند، که تعیین کننده وجود قابلیت های تولید گیاهی مختلف در این مناطق هستند.

مشخصه های مهم مناطق مورد بررسی در جدول (۱) آمده

است.

جدول (۱): مشخصه های مناطق مورد بررسی

Table (1): Specifications of the studied areas

منطقه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	حداقل ارتفاع (متر)	حداکثر ارتفاع (متر)	متوسط بارندگی (میلی متر)	میانگین دمای سالانه (درجه سانتی گراد)
مرجن	۵۰ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱	۳۲ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۲	۱۰۴۸	۲۳۷۳	۲۵۰	۱۰/۸
	درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی	درجه و ۰ دقیقه عرض شمالی				
سنگ سفید	۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰	۳۳ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۳	۱۶۷۸	۲۷۶۷	۱۳۰	۳۹/۴
	درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی	درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی				
قمیشلو	۵۰ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۵۱	۳۲ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۳	۱۶۸۷	۲۷۶۷	۱۳۰	۱۱/۵
	درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی	درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی				

روی نقشه ثبت شد.

در هر کوادرات نخست درصد پوشش گیاهی به صورت چشمی تخمین و درون فرم های از پیش تهیه شده ثبت شد. همچنین کل پوشش گیاهی گیاهان یکساله برای انجام کارهای آزمایشگاهی به منظور برآورد تولید گیاهی، قطع و برداشت شد.

استخراج اطلاعات اقلیمی، سناریوهای آینده و انتخاب متغیرهای زیست اقلیم

به منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر عملکردهای اصلی مناطق نمونه برداری شده، از داده های اقلیمی آینده منتشر شده در پایگاه داده WorldClim version 2.1 استفاده شد. این پایگاه داده

خروجی این تحقیق می تواند تصویر روشن، کمی و قابل اعتمادی از پیامدهای بالقوه تغییر اقلیم بر یکی از حساس ترین منابع طبیعی کشور ارائه دهد. این یافته ها به عنوان سندی علمی و پشتیبان، می تواند مبنای تدوین راهبردها و برنامه های انطباقی هوشمند، هدفمند و منطقه محور برای مدیران، برنامه ریزان و سیاست گذاران بخش منابع طبیعی در سطح استان و کشور قرار گیرد و در نهایت، گامی در جهت افزایش تاب آوری اجتماعی- اکولوژیک این اکوسیستم های حیاتی در قرن پیش رو برداشته باشد.

نمونه برداری از پوشش گیاهی در هر منطقه مطابق با زمان اوج رشد حداکثر گونه های گیاهی (اواسط اردیبهشت تا اواخر خرداد) انجام شد. در هر کدام از مناطق مطالعاتی هفت سایت در نظر گرفته شد. این هفت سایت به گونه ای انتخاب شدند که از نظر خاک، اقلیم، توپوگرافی و گیاهان بوته ای غالب، تقریباً مشابه باشند. سپس در هر سایت سه پلات 30×30 متر مربعی (طهماسبی و همکاران، ۲۰۱۷) با فاصله ۵۰ متر از یکدیگر و درون هر کدام از پلات ها، چهار کوادرات 2×2 (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۴) به صورت تصادفی منظور شد. موقعیت پلات ها و کوادرات ها با GPS دستی برای تعیین و جانمایی بر

به دلیل هم خطی زیاد حذف شدند. در نهایت، دو متغیر با کمترین میزان هم خطی، یعنی Bio1 (میانگین دمای سالانه) و Bio12 (مجموع بارش سالانه) به عنوان متغیرهای شاخص انتخاب و برای مدل سازی و پیش بینی عملکردهای اکوسیستمی در شرایط اقلیمی آینده به کار گرفته شدند. این دو متغیر به دلیل نقش تعیین کننده در کنترل فرایندهای زیست محیطی، چرخه کربن، تولید زیست توده و الگوهای پراکنش پوشش گیاهی، از اهمیت ویژه ای برخوردارند و معمولاً به عنوان پارامترهای پایه در مدل سازی اکولوژیکی مورد استفاده قرار می گیرند.

مدل سازی و پیش بینی عملکرد اکوسیستمی در شرایط اقلیمی آینده

در این مرحله، به منظور بررسی و پیش بینی تغییرات پوشش گیاهی بر اثر تغییر اقلیم، از رویکردهای مدل سازی آماری و یادگیری ماشین استفاده شد. داده های ورودی مدل ها شامل متغیرهای زیست اقلیمی منتخب (میانگین دمای سالانه و مجموع بارش سالانه) و داده های پوشش گیاهی اندازه گیری شده در مناطق نمونه برداری بودند. تمامی تحلیل ها در محیط نرم افزار R و با بهره گیری از بسته های آماری مرتبط (از جمله stats، mgcv و random forest) انجام گرفت.

برای برآورد روابط میان عملکردهای اکوسیستم و متغیرهای اقلیمی، چهار مدل شامل مدل خطی تعمیم یافته (GLM)، مدل تعمیم یافته افزایشی (GAM)، مدل وزن دهی مکانی (SWM) و مدل جنگل تصادفی (Random Forest) مورد آزمون و مقایسه قرار گرفتند. نتایج مقایسه مدل ها نشان داد که مدل Random Forest دارای بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE در میان سایر مدل هاست و از توانایی بیشتری در بازسازی الگوهای واقعی داده ها برخوردار است. به همین دلیل، این مدل به عنوان مدل نهایی انتخاب شد و برای پیش بینی عملکرد پوشش گیاهی در شرایط اقلیمی آینده مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این مدل روابط بین متغیرهای Bio1 و Bio12 با عملکردهای اکوسیستم استخراج و پیش بینی ها برای هریک از چهار سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ میلادی تولید شدند.

مجموعه ای از داده های اقلیمی جهانی را در مقیاس مکانی بالا و با دقت زمانی مناسب در اختیار پژوهشگران قرار می دهد. داده های مزبور حاصل خروجی مدل های گردش عمومی جو (GCMs) تحت پروژه CMIP6^۱ و تصحیح خطا^۲ به صورت شبکه ای با تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه قوسی (حدود یک کیلومتر مربع) در اختیار کاربران قرار گرفته اند.

در میان مدل های اقلیمی موجود در CMIP6، مدل MRI-ESM2-0^۳ به عنوان مدل منتخب در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. این مدل یکی از مدل های به روز و معتبر است که قادر است برهم کنش میان اجزای اصلی سامانه زمین شامل جو، اقیانوس، یخ و زیست کره را با دقت بالا شبیه سازی نماید.

برای لحاظ کردن عدم قطعیت های ناشی از مسیرهای مختلف توسعه اقتصادی و سیاست های انتشار گازهای گلخانه ای، چهار سناریوی اجتماعی-اقتصادی (SSP) مورد استفاده قرار گرفتند. این سناریوها شامل SSP1-2.6 (سناریوی خوش بینانه)، SSP2-4.5 (میان)، SSP3-7.0 (بدبینانه) و SSP5-8.5 (خیلی بدبینانه) هستند که به ترتیب بیانگر وضعیت های متفاوتی از پایداری زیست محیطی تا وابستگی شدید به سوخت های فسیلی هستند. داده های اقلیمی مرتبط با این سناریوها برای دوره زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ میلادی از وبگاه رسمی WorldClim^۴ در قالب فایل های GeoTIFF بارگیری شدند.

متغیرهای اقلیمی انتخابی شامل ۱۹ متغیر زیست اقلیمی (Bio1 تا Bio19) بودند که شاخص های کلیدی اقلیم را در ارتباط با میانگین دما، نوسانات فصلی و الگوهای بارش سالانه بازتاب می دهند. داده های مذکور ابتدا در محیط ArcGIS 10.x به محدوده جغرافیایی مناطق نمونه برداری شده برش داده شدند؛ سپس، برای جلوگیری از هم پوشانی اطلاعات و کاهش اثر هم خطی بین متغیرها، تحلیل ضریب تورم واریانس (VIF^۵) در محیط نرم افزار R (نسخه ۴.۰) انجام شد.

در این تحلیل، متغیرهایی که مقدار VIF بالاتر از ۱۰ داشتند،

1. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
2. Bias Correction
3. Meteorological Research Institute Earth System Model
4. <http://www.worldclim.org>
5. Variance Inflation Factor

نتایج

RMSE=18 در رتبه دوم قرار دارد. عملکرد نسبتاً خوب این مدل احتمالاً ناشی از توانایی آن در مدل سازی روابط غیرخطی بین متغیرهاست. مدل خطی تعمیم یافته (SVM) با $R^2=0.32$ و $RMSE=5.60$ برای داده‌هایی با روابط خطی ساده مناسب‌تر به نظر می‌رسد. ماشین بردار پشتیبان (GLM) با ضعیف‌ترین عملکرد ($R^2=0.32$ و $RMSE=17.95$) احتمالاً به تنظیم پارامترهای بهینه نیاز دارد یا ممکن است برای این نوع داده‌ها مناسب نباشد (جدول ۲).

نتایج دقت چهار مدل مختلف (جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، مدل جمعی تعمیم یافته و مدل خطی تعمیم یافته) را در پیش بینی پوشش گیاهی کل مقایسه می‌کند. براساس معیارهای ارزیابی، مدل جنگل تصادفی (RF) با $RMSE=4.44$ و $R^2=0.75$ بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. مقدار R^2 نزدیک به ۱ نشان دهنده توانایی فوق العاده مدل در تبیین تغییرپذیری داده‌هاست، درحالی که RMSE پایین بیانگر خطای پیش بینی کم است. مدل جمعی تعمیم یافته (GAM) با $R^2=0.74$ و

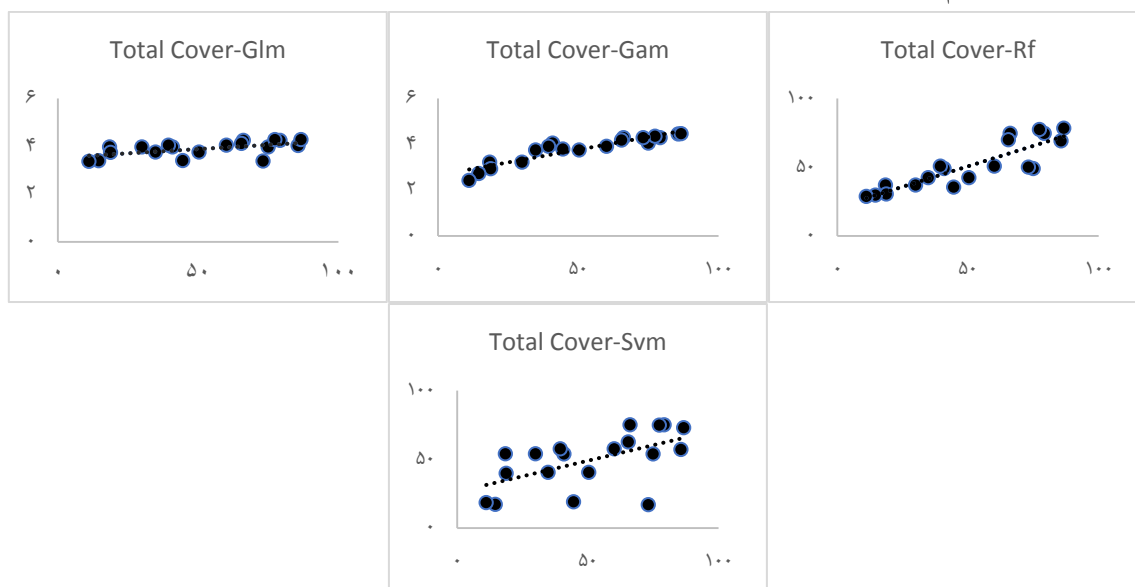
جدول (۲): مقایسه عملکرد مدل های مختلف در پیش بینی شاخص بیوماس

Table (2): Comparison of the performance of different models in predicting the biomass index

شاخص	مدل	R^2	RMSE
Total Cover	RF	۰/۷۵	۴/۴۴
	SVM	۰/۳۲	۵/۶۰
	GAM	۰/۷۴	۱۸
	GLM	۰/۳۲	۱۷/۹۵

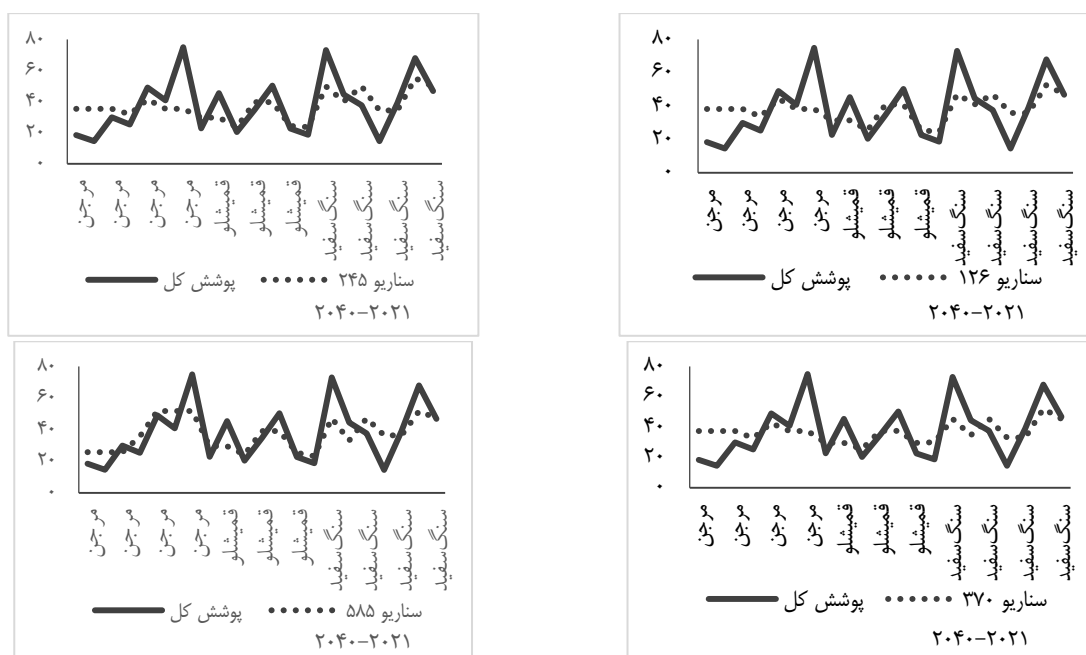
عملکرد را داشته است. مدل های SVM، GAM و GLM عموماً نتایج ضعیف تری را نشان دادند. اختلاف معنادار مدل RF و سایر مدل ها ($\Delta R^2=0.09$) گزارش شد.

در شکل (۱) همچنین نمودارهای مقایسه عملکرد چهار مدل یادگیری ماشین در پیش بینی شاخص پوشش گیاهی (Total Cover) اکوسیستم نشان داده شده، که مدل RF بهترین



شکل (۱): مقایسه عملکرد مدل های مختلف در پیش بینی شاخص پوشش گیاهی

Figure (1): Comparison of the performance of different models in predicting the vegetation index

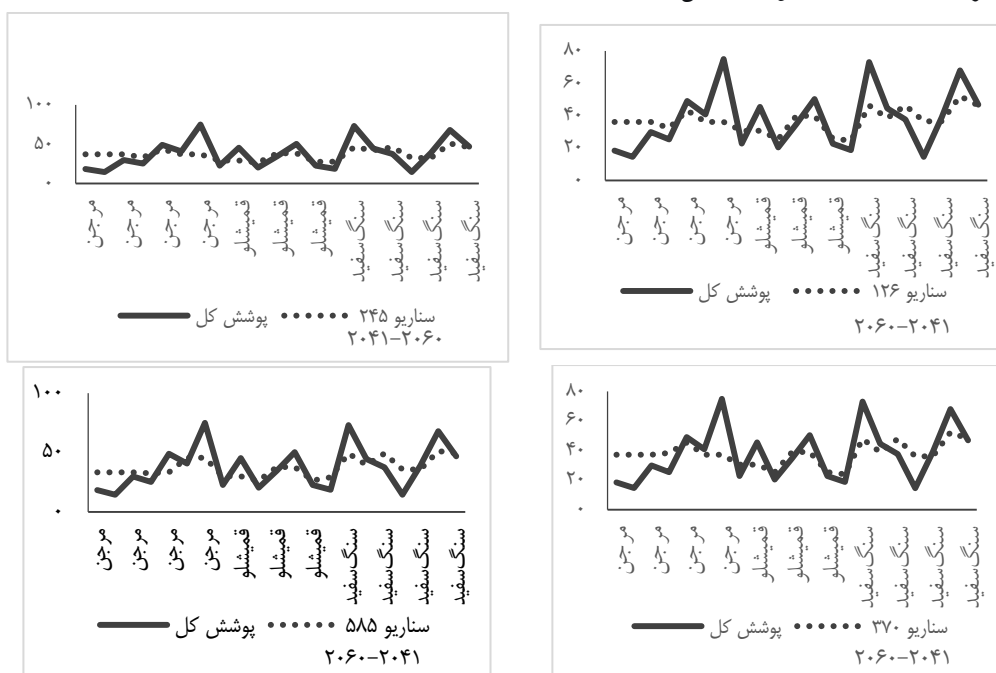


شکل (۲): تغییرات پوشش گیاهی کل تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰

Figure (2): Changes in total vegetation cover under the influence of different climate change scenarios from 2021 to 2040

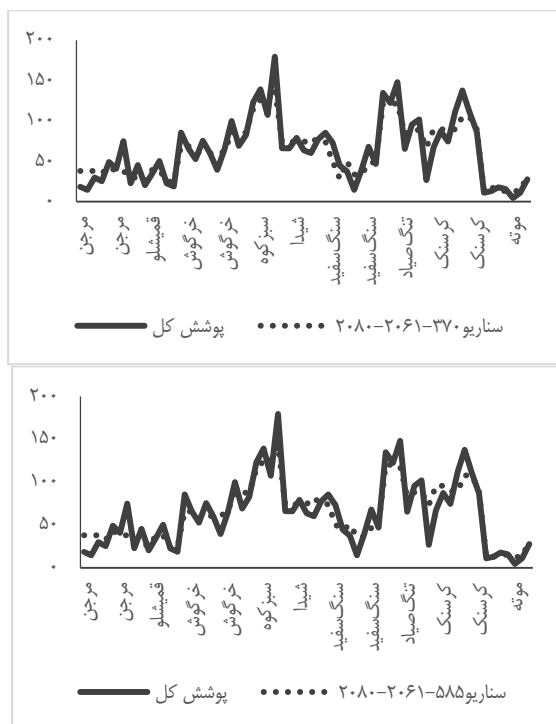
تغییرات محسوسی را تجربه نکرده و پوشش گیاهی آن در سناریوهای مختلف بین ۲۹/۸۸ درصد تا ۳۱/۴۰ درصد در نوسان است که حاکی از تاب‌آوری نسبی در کوتاه‌مدت است. در مقابل، منطقه سنگ سفید با بیشترین پوشش کنونی (۴۶/۱۵ درصد) آسیب‌پذیرترین منطقه شناسایی شد و پوشش آن در سه سناریوی SSP126، SSP370 و SSP585 به ترتیب به ۴۳/۴۴، ۴۱/۰۸ و ۴۲/۲۲ درصد کاهش یافت (شکل ۲).

براساس تحلیل تغییرات پوشش گیاهی تحت سناریوهای اقلیمی (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، واکنش سه منطقه مرجن، قمیشلو و سنگ سفید متفاوت است. منطقه مرجن با میانگین کنونی ۳۶/۱۸ درصد، مقاوم‌ترین منطقه نشان داده و در تمام سناریوها روندی با ثبات یا افزایشی دارد. در سناریوی SSP126 به ۳۸/۷۴ درصد رسیده و حتی در سناریوی بدبینانه SSP585 به ۳۸/۵۱ درصد افزایش می‌یابد که احتمالاً نشان‌دهنده سازگاری یا شرایط اقلیمی مساعدتر است. منطقه قمیشلو با میانگین ۳۱/۰۷ درصد



شکل (۳): تغییرات پوشش گیاهی کل تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی از سال ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰

Figure (3): Changes in total vegetation cover under the influence of different climate change scenarios from 2041 to 2060

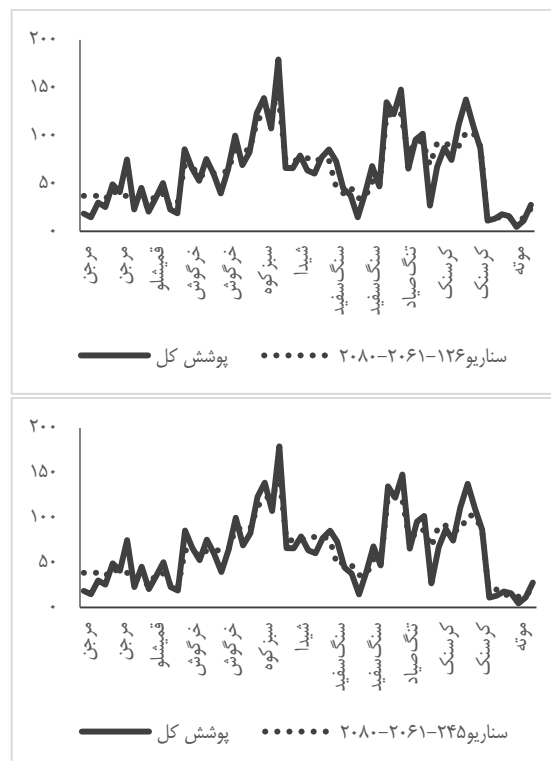


شکل (۴): تغییرات پوشش گیاهی کل تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی از سال ۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰

Figure (4): Changes in total vegetation cover under the influence of different climate change scenarios from 2061 to 2080

تحلیل پوشش گیاهی سه منطقه در بازه ۲۰۶۱-۲۰۸۰ نشان دهنده تکامل الگوهای قبلی و ظهور دینامیک‌های اکولوژیک جدید است. در منطقه مرجن، روند سازگاری مثبت ادامه یافته و بالاترین پوشش در سناریوی SSP245 ۳۸/۶۲ درصد مشاهده می‌شود که تغییر در الگوی پاسخ‌دهی را نشان می‌دهد. منطقه قمیشلو برای نخستین بار کاهش عمومی را در همه سناریوها تجربه می‌کند، با کمترین مقدار در SSP585 ۲۹/۰۱ درصد که حاکی از تأثیر منفی بلندمدت سناریوهای انتشار بالا بر این منطقه است. در مقابل، منطقه سنگ سفید واکنشی پیچیده و غیرمنتظره نشان می‌دهد و در سه سناریو SSP126 ۴۶/۲۹ درصد، SSP245 ۴۷/۰۲ درصد، SSP585 ۵۰/۳۴ درصد با افزایش پوشش گیاهی مواجه می‌شود. این تغییر چشمگیر ممکن است نشان‌دهنده یک نقطه عطف اکولوژیک ناشی از سازگاری یا تغییر ترکیب گونه‌ای باشد (شکل ۴).

براساس تحلیل پوشش گیاهی در بازه ۲۰۴۱-۲۰۶۰، روندهای مشاهده شده در دوره قبلی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) برای سه منطقه مرجن، قمیشلو و سنگ سفید تداوم و در برخی موارد تشدید یافته است. منطقه مرجن با میانگین کنونی ۳۶/۱۸ درصد، سازگاری و مقاومت بالایی نشان داده و در تمام سناریوها افزایش پوشش گیاهی را تجربه می‌کند؛ به طوری که در سناریوهای SSP126، SSP245، SSP370 و SSP585 به ترتیب به ۳۷/۲۳ درصد، ۳۷/۷۸ درصد، ۳۸/۵۱ درصد و ۳۶/۶۲ درصد می‌رسد. در مقابل، منطقه قمیشلو با میانگین ۳۱/۰۷ درصد ثبات نسبی خود را حفظ کرده، اما با نوسانات جزئی مواجه است و در سناریوهای مذکور به ترتیب به ۳۱/۰۲ درصد، ۳۱/۰۴ درصد، ۳۰/۶۶ درصد و ۳۱/۱۳ درصد می‌رسد. منطقه سنگ سفید، که با میانگین ۴۶/۱۵ درصد دارای بالاترین پوشش کنونی است، آسیب‌پذیرترین منطقه باقی می‌ماند و کاهش مداومی در تمام سناریوها نشان می‌دهد SSP126 ۴۳/۷۴ درصد، SSP245 ۴۲/۳۷ درصد، SSP370 ۴۴/۳۲ درصد و SSP585 ۴۴/۵۵ درصد. در مقایسه با دوره قبل، منطقه مرجن روند بهبودی داشته، قمیشلو با ثبات همراه کاهش جزئی روبه‌رو شده و کاهش پوشش گیاهی در سنگ سفید تشدید یافته است (شکل ۳).

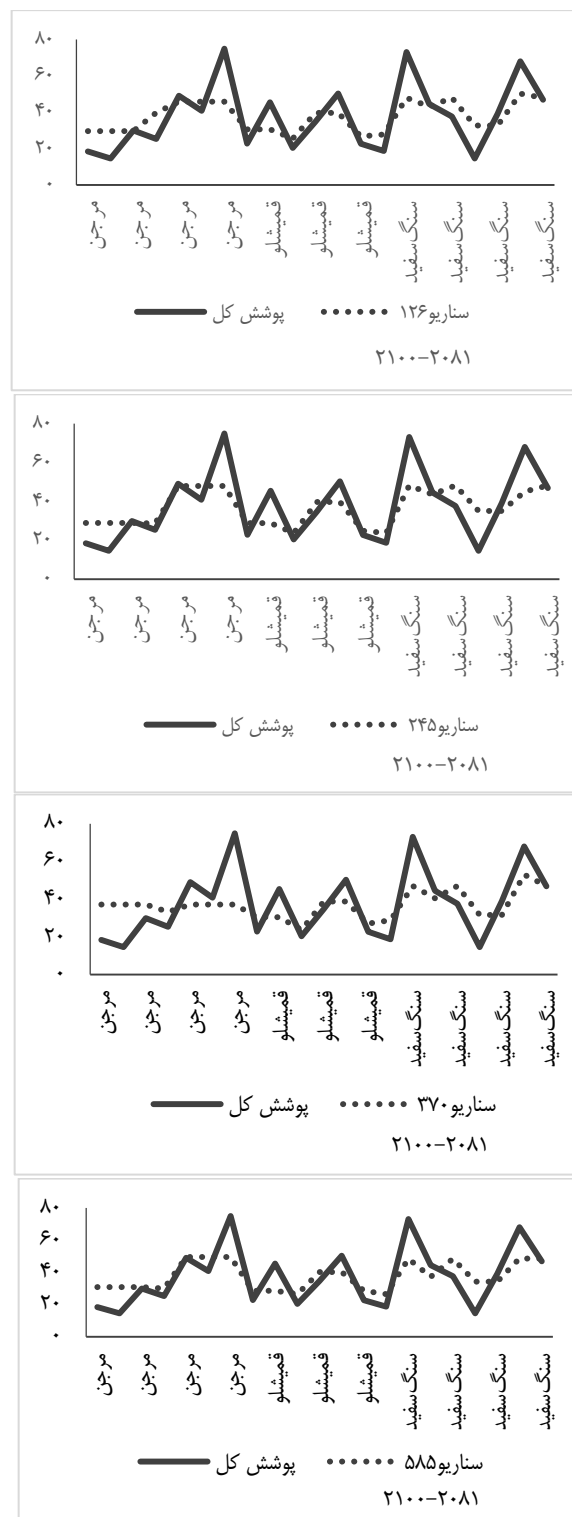


مثبت و افزایش تاب‌آوری را نشان داد، به‌طوری‌که روند از افزایش عمومی در دوره‌های اولیه، به الگوی تکامل یافت که حتی در بدینانه‌ترین سناریو (SSP585) در دوره پایانی (۲۰۸۱-۲۱۰۰) با رسیدن پوشش به ۳۹/۰۴ درصد بالاترین مقدار را ثبت کرد، که نشان‌دهنده تبدیل تدریجی این اکوسیستم به سیستمی مقاوم و حتی بهره‌بر از شرایط جدید است. درمقابل، منطقه قمیشلو با حفظ ثبات نسبی در محدوده ۳۱/۱۳ درصد تا ۳۱/۴۰ درصد در سناریوهای مختلف، به یک آستانه تحمل مشخص رسیده که نشان از مقاومت اکولوژیکی ذاتی آن دارد. منطقه سنگ‌سفید نیز بهبود نسبی را تجربه کرده و در یک سطح پایدار جدید (بین ۴۲/۶۵ تا ۴۴/۲۲ درصد) تثبیت شده که بیانگر توانایی بازیابی و یافتن تعادل در بلندمدت است. درمجموع، این دوره پایانی، تکمیل روند تحول اکوسیستم‌ها و تثبیت تعادل‌های جدید منطبق با ظرفیت سازگاری ذاتی هریک را نشان می‌دهد (شکل ۵).

به‌طور کلی مقایسه روند تغییرات پوشش گیاهی کل در چهار بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۰-۲۱۰۰ نشان داد که منطقه مرجن در طول زمان سازگاری مثبتی از خود نشان داده و در بیشتر سناریوها، به‌ویژه در سناریوی SSP585 در بازه پایانی، با افزایش پوشش گیاهی به حدود ۳۹ درصد مواجه شده است. منطقه قمیشلو با وجود کاهش خفیف در میانه دوره، در بلندمدت ثبات نسبی خود را حفظ کرده و در بازه آخر در محدوده ۳۱ درصد تثبیت شده که نشان از مقاومت اکولوژیکی آن دارد. درمقابل، منطقه سنگ‌سفید که در دوره‌های میانی کاهش چشمگیری را تجربه کرد، در بازه نهایی با بهبود نسبی به سطوح حدود ۴۳-۴۴ درصد رسید که حاکی از سازگاری تدریجی و بازیابی اکوسیستم در پاسخ به تغییرات اقلیمی طولانی‌مدت است. درکل، اگرچه هر منطقه واکنش متفاوتی به سناریوها نشان داد، همه آن‌ها در بلندمدت به تعادل جدیدی دست یافتند که نشان‌دهنده ظرفیت ذاتی اکوسیستم‌ها برای انطباق با شرایط در حال تغییر است.

بحث

نتایج این پژوهش، تصویر پیچیده اما روشنی از پاسخ‌های اکولوژیک به محرک‌های اقلیمی ارائه می‌دهد. الگوی مقاومت و افزایش پوشش گیاهی مشاهده‌شده در منطقه مرجن در



شکل (۵): تغییرات پوشش کل تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی از سال ۲۰۸۱ تا ۲۱۰۰

Figure (5): Changes in total vegetation cover under the influence of different climate change scenarios from 2081 to 2100

تغییرات پوشش گیاهی (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نشان می‌دهد هر سه منطقه به یک «حالت تعادل جدید» پایدار دست یافته‌اند. منطقه مرجن در طول چهار دوره یک الگوی پایدار از سازگاری

شناسایی کرده است.

رفتار پویا و غیرخطی منطقه قمیشلو، که در دوره‌های میانی کاهش و در دوره پایانی بهبود نسبی را نشان داد، مفهوم «تاب‌آوری اکولوژیکی» را به‌خوبی نمایان می‌سازد. به نظر می‌رسد این منطقه دارای «ذخیره تاب‌آوری» قابل توجهی است که به آن اجازه می‌دهد در برابر شوک‌های اولیه مقاومت کند (هودگسون^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). بهبود نسبی در انتهای قرن ممکن است ناشی از «سازگاری اکولوژیکی» باشد؛ فرایندی که در آن انتخاب طبیعی به نفع ژنوتیپ‌های سازگار با شرایط جدید عمل می‌کند و ترکیب جامعه گیاهی را به تدریج تغییر می‌دهد (لئو و لنون^۷، ۲۰۲۲). همچنین، امکان «مهاجرت کمک‌کننده» از جوامع گیاهی مجاور که منابع ژنتیکی مقاوم را فراهم می‌کنند، نمی‌تواند نادیده گرفته شود (آیتکن و ویتلاک^۸، ۲۰۲۳). این پویایی نشان می‌دهد که پاسخ اکوسیستم‌ها به تغییر اقلیم ایستا نبوده و توانایی ذاتی برای بازسازی و یافتن تعادل جدید را دارا هستند، مشروط بر آنکه فشارهای وارده از حد ظرفیت تحمل آن‌ها فراتر نرود.

پیامدهای مدیریتی این یافته‌ها عمیق و فوری است. برای مناطق مقاوم مانند مرجن، راهبرد اصلی باید «مدیریت محافظه‌کارانه» باشد که بر پایش مستمر و جلوگیری از فشارهای اضافی مانند چرای مفرط متمرکز است. درمقابل، برای مناطق بحرانی مانند سنگ‌سفید، نیاز به «مدیریت فعال و مداخله‌گر» است. این راهبرد می‌تواند شامل روش‌های «احیای بوم‌سازگار» مانند کشت گونه‌های مقاوم به خشکی و شوری، جمع‌آوری و ذخیره‌سازی رواناب، و مدیریت بسیار دقیق چرا باشد (یوان سی سی دی^۹، ۲۰۲۲). برای مناطق با رفتار پویا مانند قمیشلو، «مدیریت انعطاف‌پذیر» که توانایی تطبیق با شرایط غیرقطعی را داشته باشد، کلیدی است. این رویکرد شامل توسعه «سیستم‌های هشدار اولیه» برای شناسایی علائم کاهش تاب‌آوری و انجام اقدامات پیشگیرانه قبل از رسیدن به آستانه‌های بحرانی است (بیگز^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳).

بلندمدت، با فرضیه «تسریع رشد اولیه ناشی از گرمایش» در برخی اکوسیستم‌های خشک هم‌خوانی دارد (لیو^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). به نظر می‌رسد این منطقه در حال حاضر در زیر حد بهینه دمایی خود عمل می‌کند و افزایش جزئی دما می‌تواند با طولانی‌تر کردن فصل رشد، فرایندهای فیزیولوژیک مانند فتوسنتز را به‌طور موقت بهبود بخشد. علاوه‌بر این، ترکیب گونه‌ای این منطقه احتمالاً از «اثر بیمه‌ای تنوع زیستی» بهره می‌برد، به‌طوری‌که وجود گونه‌های با دامنه تحمل اکولوژیک گسترده، امکان جایگزینی و حفظ عملکرد کل اکوسیستم را در مواجهه با تنش‌ها فراهم می‌سازد (لورا و مازانکورت^۲، ۲۰۲۱). این یافته با مطالعه مورگان^۳ و همکاران (۲۰۲۲) همسوست که گزارش کردند افزایش CO₂ می‌تواند به‌طور مستقیم با افزایش کارایی مصرف آب، تولید اولیه برخی از گیاهان مرتعی را در کوتاه‌مدت افزایش دهد. بااین‌حال، این پایداری ممکن است شکننده باشد. مطالعات اخیر هشدار می‌دهند که چنین بهبودهای اولیه‌ای می‌تواند منجر به «رخوت اکولوژیک» شود، جایی که مدیران با مشاهده ثابت ظاهری، از سرمایه‌گذاری در راهبردهای انطباقی بلندمدت غفلت می‌ورزند (بیریسک^۴ و همکاران، ۲۰۲۳).

درمقابل، کاهش فاجعه‌بار پوشش گیاهی در منطقه سنگ‌سفید، نمونه‌ای کلاسیک از «نقاط اوج» و «تغییرات حالت برگشت‌ناپذیر» در اکوسیستم‌ها را به نمایش می‌گذارد. این منطقه به دلیل وابستگی شدید به رطوبت ذخیره‌شده از بارش برف، به‌طور ویژه‌ای در برابر تغییر الگوی بارش و ذوب زودرس برف‌ها آسیب‌پذیر است (صفری و همکاران، ۲۰۲۳). کاهش پوشش گیاهی در اینجا یک چرخه معیوب تخریب را به راه می‌اندازد: کاهش پوشش منجر به کاهش مواد آلی خاک و ظرفیت نگهداری آب می‌شود، که این خود استرس آبی بیشتر و کاهش بیشتر پوشش را به دنبال دارد (بردوگو^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). این پدیده دقیقاً همان چیزی است که IPCC (2023) آن را «تقویت حلقه بازخورد مثبت خشکی» می‌نامد و به‌عنوان یکی از جدی‌ترین خطرات برای اکوسیستم‌های خشک جهان

6. Hodgson
7. Lau
8. Aitken & Whitlock
9. UNCCD
10. Biggs

1. Liu
2. Loreau & Mazancourt
3. Morgan
4. Briske
5. Berdugo

نتیجه گیری

این منطقه به منابع رطوبتی خاص و حساسیت بالای آن به تغییرات الگوی بارش و دماست.

منطقه قمیشلو نیز الگوی رفتاری پیچیده‌ای را نشان داد که در آن ثبات نسبی در کوتاه مدت به تدریج به کاهش محسوس در بلندمدت تبدیل می‌شود، به‌ویژه تحت سناریوهای شدید اقلیمی. این یافته‌ها به‌طور کلی بر این واقعیت تأکید دارند که اثرات تغییرات اقلیمی بر مراتع یکسان نبوده و هر منطقه با توجه به ویژگی‌های اکولوژیک منحصر به فرد خود، پاسخ متفاوتی به این تغییرات نشان می‌دهد.

این پژوهش به‌طور کلی نشان می‌دهد که اگرچه تغییرات اقلیمی تهدیدی جدی برای مراتع به شمار می‌رود، با درک صحیح از پاسخ‌های اکولوژیک هر منطقه و اجرای راهبردهای مدیریتی مناسب، می‌توان تاب‌آوری این اکوسیستم‌های حیاتی را افزایش داد و خدمات اکوسیستمی آن‌ها را برای نسل‌های آینده حفظ نمود.

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی اثرات متفاوت و پیچیده‌ای بر پوشش گیاهی مراتع خشک و نیمه‌خشک استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان خواهد داشت. براساس یافته‌های این مطالعه، در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰، مناطق مختلف واکنش‌های کاملاً متمایزی به سناریوهای مختلف اقلیمی نشان خواهند داد. منطقه مرجن به‌عنوان یک کانون مقاوم شناسایی شد که در بلندمدت نه تنها با شرایط جدید سازگار می‌شود، بلکه در برخی سناریوها حتی شاهد افزایش پوشش گیاهی نیز خواهد بود. این سازگاری قابل توجه را می‌توان به ترکیب گونه‌ای مناسب، ویژگی‌های خاک و موقعیت توپوگرافی خاص این منطقه نسبت داد. درمقابل، منطقه سنگ سفید به‌عنوان آسیب‌پذیرترین منطقه شناسایی شد که در تمامی سناریوها با کاهش تدریجی و قابل توجه پوشش گیاهی مواجه خواهد شد. این کاهش عمدتاً ناشی از وابستگی شدید

منابع

- Aitken, S. N., & Whitlock, M. C. (2023). Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 54, 367-389.
- Azad, B. & S.F. Afzali, 2022. Modeling the effect of climate change on CO₂ emissions from soil in dry rangelands (south Iran). *Desert Ecosystem Engineering*, 7(20), 71-87
- Bardgett, R. D., & Wardle, D. A. (2023). *Grassland ecosystem functioning and global change*. Cambridge University Press.
- Berdugo, M., Vidiella, B., Solé, R. V., & Maestre, F. T. (2020). Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 367(6479), 787-790.
- Biggs, R., de Vos, A., Preiser, R., Clements, H., Maciejewski, K., & Schlüter, M. (Eds.). (2023). *The Routledge Handbook of Research Methods for Social-Ecological Systems*. Routledge.
- Briske, D. D., Joyce, L. A., Polley, H. W., Brown, J. R., Wolter, K., Morgan, J. A., & McCarl, B. A. (2023). Climate change adaptation in US federal natural resource science and management agencies: A review. *BioScience*, 73(5), 365-382.
- Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Carvalhai, L., & Haberl, H. (2022). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553(7686), 73-76.
- FAO. (2023). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gholami, V., Booi, M. J., & Tehrani, E. N. (2024). Assessment of the impact of climate change and human activities on river flow regimes in Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101075.
- Hodgson, E. E., Halpern, B. S., & Essington, T. E. (2021). Ecological resilience: Science, policy, and practice. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 481-509.
- Hoover, D. L., Knapp, A. K., & Smith, M. D. (2014). Resistance and resilience of a grassland ecosystem to an extreme drought. *Ecology*, 105(3), e4245.
- Hosseini, M., Ghaffari, M., & Kiani, S. (2023). Long-term meteorological drought monitoring in Iran using the SPEI index. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1-2), 385-401.
- Huang, J., Zhang, G., & Zhang, Y. (2023). Projected changes in precipitation and temperature over the Yangtze River Basin using multiple CMIP6 models. *Journal of Hydrology*, 617, 128-145.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

15. Lau, J. A., & Lennon, J. T. (2022). Rapid evolutionary responses to climate change. *Nature Reviews Genetics*, 23(5), 270-283.
16. Livensperger, C., Steltzer, H., Darrouzet-Nardi, A., Sullivan, P. F., Wallenstein, M. D., & Weintraub, M. N. (2023). Earlier snowmelt and warming lead to earlier but not necessarily more plant growth. *Nature Climate Change*, 13(3), 235-240.
17. Liu, Y., Li, Y., & Wang, J. (2024). Spatial heterogeneity of vegetation response to climate change in a dryland region. *Science of The Total Environment*, 806, 150-162.
18. Loreau, M., & de Mazancourt, C. (2021). Biodiversity and ecosystem stability: A synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 24 (6), 1342-1356.
19. Morgan, J. A., LeCain, D. R., & Pendall, E. (2022). Elevated CO₂ and warming effects on grassland plant production and soil carbon. *Global Change Biology*, 28(5), 123-145.
20. Reid, R. S., Thornton, P. K., & McCrabb, G. J. (2023). The impact of climate change on pastoral economies in the tropics. *Nature Climate Change*, 13(9), 812-816.
21. Safari, A., Kiani, M., & Pourhashemi, M. (2023). Assessing the impact of climate change on snow cover and water resources in the Zagros Mountains, Iran. *Journal of Mountain Science*, 20(4), 789-801.
22. Tahmasebi, P., Kamali, R., & Ahmadi, M. (2017). A new method for estimating vegetation cover in arid and semi-arid regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8), 412.
23. UNCCD. (2022). The Global Land Outlook, second edition. United Nations Convention to Combat Desertification.
24. Zhang, Y., Liu, H., & Wang, Z. (2014). A comparison of different sampling methods for estimating grassland aboveground biomass. *Grassland Science*, 60(3), 145-152.

Evaluation of Climate Change Scenarios' Effects on Vegetation Cover in Arid and Semi-Arid Rangelands

Maryam Pirmohammadi Bardeh,¹ Pejman Tahmasebi Kohyani,^{2*} Esmail Asadi Borojeni,³
Mohsen Faal Feizabadi⁴

Received: 01/12/2025

Accepted: 24/01/2026

Extended Abstract

Introduction : Dry and semi-arid rangelands are vital ecosystems, encompassing approximately 40–50% of the Earth's terrestrial surface. These regions provide essential ecological services, such as forage production, soil conservation, carbon sequestration, and biodiversity maintenance. However, climate change poses a significant threat to these fragile environments through altered temperature regimes, modified precipitation patterns, and an increased frequency of extreme weather events. In Iran—particularly in the provinces of Chaharmahal and Bakhtiari and Isfahan—these challenges are further exacerbated by prevailing overgrazing and unsustainable land management practices. This study aims to quantitatively evaluate the impacts of different climate change scenarios on vegetation dynamics within these critical rangeland ecosystems.

Materials and Methods: This study was conducted across three key regions—Marjan, Qomishlu, and Sangsefid—selected to represent a gradient of ecological conditions based on precipitation and temperature. Field sampling was carried out during the peak vegetation growth period (mid-May to late June). In each region, seven study sites were established. Within each site, three 30 m × 30 m plots were delineated, and four 2 m × 2 m quadrats were randomly placed inside each plot for detailed assessment. Vegetation cover percentage was estimated visually, and annual plant biomass was harvested, cut 1 cm above the soil surface, and weighed.

1. Ph.D. Student of Rangeland Science, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord, Iran, Email: maryampirmohamadi6@yahoo.com

2. Corresponding Author, Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord, Iran, Email: pejman.tahmasebi@sku.ac.ir

3. Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord, Iran, Email: asadi-es@sku.ac.ir

4. Ph.D., Department of Natural Resources and Watershed Management of Kashmar County, Iran, Email: mo.faal65@gmail.com

Future climate projections were obtained from the MRI-ESM2-0 model within the CMIP6 database, considering four Shared Socioeconomic Pathway scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) for the period 2021–2100. From an initial set of 19 bioclimatic variables, mean annual temperature (Bio1) and annual precipitation (Bio12) were selected for modeling after applying Variance Inflation Factor (VIF) analysis to mitigate multicollinearity. Four distinct modeling techniques were evaluated: Generalized Linear Model (GLM), Generalized Additive Model (GAM), Support Vector Machine (SVM), and Random Forest (RF). Model performance was quantified using the coefficient of determination (R^2) and the Root Mean Square Error (RMSE).

Results and Discussion: The Random Forest (RF) algorithm demonstrated superior performance in simulating vegetation parameters compared to other modeling approaches. Spatiotemporal analysis of vegetation dynamics across the three study regions revealed distinct responses to the projected climate scenarios over four future periods (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100).

Marjan Region (Resilient Profile): This region exhibited significant resilience and adaptive capacity. The current vegetation cover (36.18%) showed consistent increases under most scenarios, particularly under the high-emission SSP5-8.5 scenario in the 2081–2100 period, reaching 39.04%. This positive trend suggests the Marjan ecosystem currently operates below its temperature optimum, where moderate warming may enhance physiological processes and extend the growing season. The region likely benefits from "biodiversity insurance effects," where functional redundancy within species pools enables compensation and maintains ecosystem stability under climatic stress.

Sangsefid Region (Vulnerable Profile): Identified as the most vulnerable area despite having the highest initial vegetation cover (46.15%), this region experienced substantial declines across most scenarios. The most pronounced reduction occurred during the 2041–2060 period under SSP2-4.5, decreasing to 42.37%. This high sensitivity originates from a strong dependence on snowmelt-derived moisture, making it particularly susceptible to shifts in precipitation patterns and earlier spring melt. Vegetation loss initiates a destructive feedback loop: reduced cover diminishes soil organic matter and water retention capacity, which intensifies water stress and leads to further degradation—a manifestation of the "dryland amplification feedback" mechanism recognized by the IPCC.

Qomishlu Region (Dynamic/Adaptive Profile): This region displayed complex, non-linear dynamics with intermediate vulnerability. An initial stable cover (31.07%) gradually transitioned to moderate declines, particularly under high-emission scenarios in mid-century periods. However, it demonstrated notable ecological resilience, with partial recovery observed in the final period (reaching 31.29% under SSP5-8.5). This pattern illustrates the concept of "ecological memory" and potential adaptation, where natural selection may favor genotypes better suited to new conditions, leading to a gradual shift in community composition.

For resistant regions (e.g., Marjan), a conservative management strategy is recommended, focusing on continuous monitoring and preventing additional anthropogenic pressures, particularly overgrazing. Managers must avoid "ecological complacency"—a false sense of security derived from apparent short-term stability that could lead to the neglect of essential long-term adaptation investments.

For vulnerable regions (e.g., Sangsefid), active, interventionist management is urgently required. Strategies should prioritize climate-resilient restoration using drought-tolerant native species, implementation of runoff harvesting systems, and precise, controlled grazing regimes. The overarching goal should be "threshold-based management" to prevent the ecosystem from crossing irreversible tipping points.

For dynamic regions (e.g., Qomishlu), an adaptive and flexible management framework is essential. This approach necessitates developing early-warning systems to detect indicators of declining resilience and implementing preventive measures proactively, before critical thresholds are reached.

At a macro level, integrating these ecological forecasts into national and regional land-use planning is crucial. Aligning rangeland management strategies with international commitments, such as the UN Decade on Ecosystem Restoration and the Paris Agreement, can facilitate access to necessary financial mechanisms and technical resources for large-scale implementation.

General Conclusion: This research demonstrates that climate change will exert diverse and complex impacts on vegetation cover across dry and semi-arid rangelands. The findings confirm that ecosystem responses are not uniform but are instead mediated by site-specific ecological characteristics. The Marjan region exhibited patterns of ecological resistance, with positive adaptation and increased vegetation cover under future scenarios. In contrast, the Sangsefid region showed high vulnerability, marked by a gradual decline in cover. The Qomishlu region demonstrated ecological resilience through dynamic, non-linear behavior and partial recovery.

From a management perspective, the study underscores the critical need for region-specific, adaptive strategies. Conservative management is recommended for resistant areas, focused on monitoring and preventing additional stressors. For vulnerable areas, active and interventionist management is imperative to mitigate degradation and avoid tipping points. For dynamic areas, flexible and adaptive management is essential to navigate non-linear changes and support natural resilience processes.

Keywords: Climate change, Ecological modeling, Rangelands, SSP scenarios, Vegetation.