

Using new technologies to study the effects of climate change on valuable species of medicinal plants in Mazandaran Province

Fatemeh Jafari Sayadi^{1*} and Seyedeh Azamat Miri²

1- Postdoc in Water Sciences and Engineering (Irrigation and Drainage), Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU). Orcid ID 0000-0002-6167-2500

2- MSc in Horticulture Sciences and Engineering (Medicinal Plants), Zanjan University. ORCID ID: 0009-0008-6042-9526

*Corresponding author: f.sayadi@sanru.ac.ir

Abstract Extended

Introduction

Increased greenhouse gas emissions and intensified changes in climate variables can negatively affect various groups, including water resources, the environment, industry, health, and agriculture. Future climate change may alter species distribution and abundance, drive local extinctions, and cause phenological and physiological shifts. Because plants cannot move quickly or individually, they respond to environmental changes with a relatively long delay, and identifying the consequences of climate change on plant distribution is an important step in determining conservation strategies. Therefore, in the present study, an attempt has been made to initially examine the trend of climate change in Mazandaran province using two optimistic and pessimistic scenarios based on the models of the Fifth and Sixth Intergovernmental Panel on Climate Change. Then, using the time series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and long-term temperature and precipitation data in the past, the status of vegetation in the province's rangelands was evaluated using the random forest algorithm, and after determining the pattern of changes, the status of the rangelands as the main habitat of medicinal plants in the future was predicted.

Materials and Methods

The study area in the present study is Mazandaran province in northern Iran. The maximum altitude of this province is 5670 meters above sea level, and its minimum altitude is -23 meters below sea level. At 14 selected meteorological stations in the province, first, temperature and precipitation data for the base period (1985-2005) and the future period (2030-2060) of climate change models were predicted based on the fifth and sixth reports under optimistic (RCP2.6 and SSP1-2.6) and pessimistic (RCP8.5 and SSP5-8.5) scenarios. In the present study, ten bioclimatic variables introduced by Hijmans et al. (2005), along with three main altitudinal variables (elevation, slope, and direction), were used as descriptors of medicinal plant habitats. Sentinel-2 satellite images were used to investigate land use changes, especially to determine rangelands as the main habitat of medicinal plants in Mazandaran Province. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series were generated to investigate changes in rangeland area in the long term.

Results and Discussion

Zoning of the rate of change of minimum, maximum, and precipitation temperatures in 14 synoptic stations of Mazandaran Province was carried out using the CNRM-CM5 and CNRM-CM6-1 models under two optimistic and pessimistic scenarios. Alasht, Rineh, Kajur, Baladeh, and Siahbisheh are the common stations in the fifth and sixth optimistic scenario reports that have a decreasing rate of minimum temperatures. It is noteworthy that Rineh, Kajur, and Siahbisheh are known as the main habitats of medicinal plants with a great diversity of species due to their untouched and natural rangelands, and an increase in minimum temperatures in the pessimistic scenario can be a threat to these natural habitats and reduce the diversity of plant species. The study of maximum temperature changes shows that the number of stations with decreasing rates of maximum temperature changes in the CNRM-CM6-1 model is greater than in the fifth report model, and in the optimistic scenario it increases from five stations in the fifth report to seven stations in the sixth report, and in the pessimistic scenario it increases from one station to four stations. The study of precipitation changes in optimistic scenarios shows that the precipitation rate in coastal stations is increasing. Considering the rate of maximum and minimum temperature changes that have increased in all coastal stations, the increasing rate of

precipitation can be related to the increase in evaporation from the sea surface. It is also important to note that in areas such as Mazandaran province, which has a variety of elevations and in many areas the distance from the sea to the mountains is small, the probability of precipitation can increase with increasing air humidity; of course, these precipitations have a more flooding pattern and will expose coastal areas to the risk of water erosion. A notable point in the pessimistic scenarios is the increase in the number of mountain stations where precipitation will increase. It seems that the positive slope of the increase in maximum temperature in these areas will cause a significant amount of solid precipitation to change its status and change to liquid precipitation in the future, which will lead to an increase in the rate of precipitation changes in the future. Bioclimatic variables in the near future, the trend of temperature and precipitation changes, and the pattern of time series changes of the NDVI index were entered into the random forest algorithm, and the zoning of medicinal plant habitats in the near future was obtained according to the figure below.

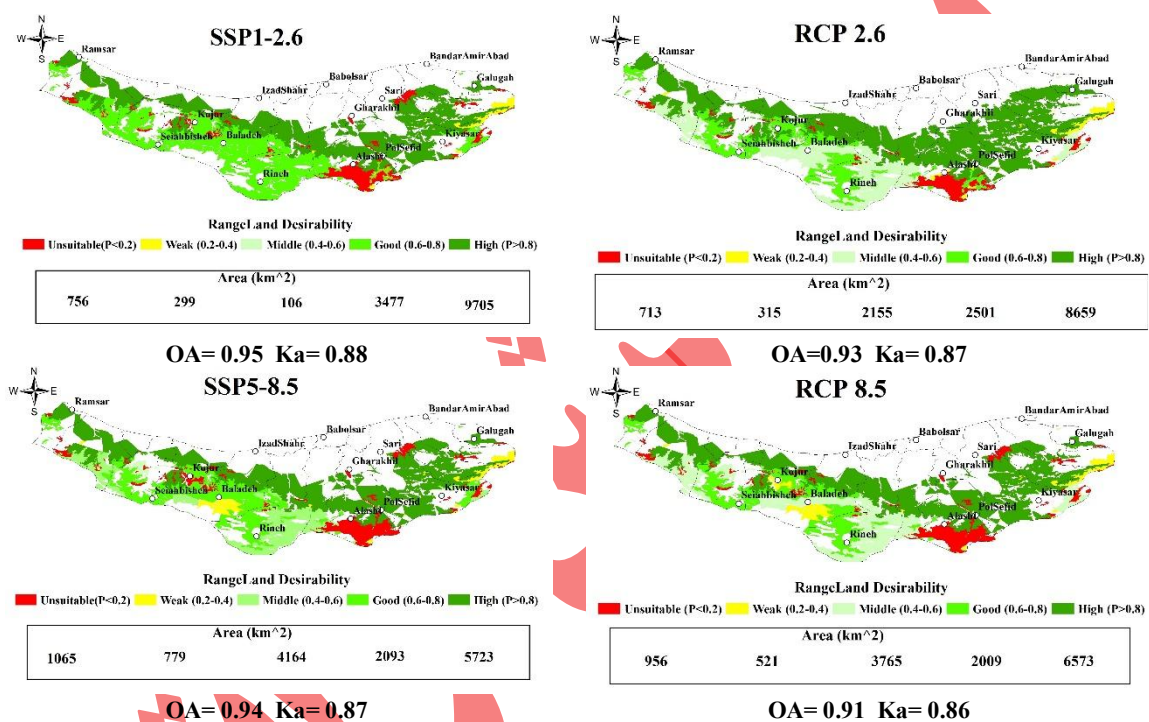


Fig 1. Rangeland Desirability in the Near Future

The habitat of medicinal plant species in the rangelands and forests of Mazandaran province will decrease by about four percent in the near future in the pessimistic scenario compared to the optimistic scenario. In the optimistic scenario, according to the fifth report, about 80 percent of the rangelands have excellent and good suitability as habitats for medicinal plants, and in the sixth report, the share of habitats with good suitability increases significantly compared to habitats with moderate suitability. In other words, many moderate habitats are included in the group of good habitats, which is due to the balanced changes in minimum temperature and improvement in precipitation rates in the optimistic scenario of the sixth report. Habitats with excellent and good suitability will decrease to about 65 percent in the pessimistic scenario, which is affected by the increase in minimum and maximum temperatures. Also, the occurrence of flooding in many mountainous areas has led to water erosion, which reduces vegetation cover, especially medicinal plants. This issue requires attention to solutions to protect rangelands from erosion and the use of appropriate strategies to control runoff and flood flows.

Conclusion

The distribution patterns of plants are highly dependent on the climatic conditions of the environment, and precipitation and temperature play an essential role in the distribution and establishment of different species. According to the results, the middle and foothill regions of Mazandaran province will face the

highest rate of minimum temperature increase in the near future (1.84 C on average), and this increase is higher in the pessimistic scenario (2.29 C on average). According to the sixth report, more stations will have a minimum temperature decrease rate. The average change rate of precipitation in the optimistic and pessimistic scenarios is 1.39 and 0.8 mm, respectively, which is in relative agreement with the spatial pattern of maximum and minimum temperature, and precipitation will increase in the areas that will become warmer in the future. Finally, today climate changes not only affect the distribution of medicinal plants, but also cause changes in all aspects of their lives and endanger their lives by affecting their phenology, reproduction and reproduction, as well as secondary metabolites. On the other hand, excessive harvesting, land use change, and recent droughts have caused these valuable species to be endangered. Therefore, the results of predicting the distribution of species and the suitability of habitats can be used to deal with potential climate changes.

Keywords: Bioclimatic variable, optimistic scenario, pessimistic scenario, rangeland desirability.

به کارگیری فناوری‌های نوین در بررسی اثر تغییر اقلیم بر گونه‌های ارزشمند گیاهان دارویی استان مازندران

فاطمه جعفری صیادی^{۱*} و سیده عظمت میری^۲

۱- پژوهشگر پسادکتری علوم و مهندسی آب (گرایش آبیاری و زهکشی)، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. شناسه ارکید: 0000-0002-6167-2500

۲- کارشناس ارشد علوم و مهندسی باغبانی (گرایش گیاهان دارویی)، دانشگاه زنجان. شناسه ارکید: 0009-0008-6042-9526
^{*}نویسنده مسئول: f.sayadi@sanru.ac.ir

چکیده

صنعتی‌شدن جوامع، منجر به افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی شده است که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش میانگین دمای جهانی و تغییرات در متغیرهای اقلیمی شده است. تغییرات اقلیمی، الگوی پراکنش و غنای گونه‌های بسیاری از گروه‌های گیاهی را تغییر می‌دهد. امروزه فناوری سنجش‌ازدور و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با فراهم نمودن پایگاه داده‌ای گسترده در پایش وضعیت گذشته و فعلی منابع طبیعی اهمیت بسیار دارد که با به کارگیری روش‌های یادگیری ماشین می‌توان الگوی تغییرات را تعیین و با استفاده از سناریوهای مختلف وضعیت آینده را پیش‌بینی نمود. در پژوهش حاضر تلاش شد تا با بهره‌گیری از این فناوری‌ها پراکنش گیاهان دارویی در سطح استان مازندران در آینده پیش‌بینی شود. به این منظور، در ابتدا روند تغییرات متغیرهای اقلیمی در سطح استان مازندران با استفاده از دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه بر مبنای مدل‌های گزارش پنجم و ششم بررسی شد. سپس با استفاده از سری زمانی شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI) حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های بلندمدت دما و بارش در گذشته وضعیت پوشش گیاهی در مراتع استان با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ارزیابی شده و پس از تعیین الگوی تغییرات، وضعیت مراتع به‌عنوان اصلی‌ترین رویشگاه گیاهان دارویی در آینده پیش‌بینی شد. مطابق با نتایج، نرخ تغییرات دمای کمینه، بیشینه و بارش در سناریو خوش‌بینانه گزارش پنجم به طور متوسط ۱/۸۴، ۰/۲۹ سانتی‌گراد و ۱/۳۹ میلی‌متر و گزارش ششم به طور متوسط ۱/۶۷، ۰/۲۳ سانتی‌گراد و ۲/۰۳ میلی‌متر و در سناریو بدبینانه گزارش پنجم ۲/۲۹، ۰/۲۸ سانتی‌گراد و ۰/۸ میلی‌متر و گزارش ششم به طور متوسط ۲/۰۷، ۰/۳۱ سانتی‌گراد و ۰/۸۹ میلی‌متر بود. با توجه به اهمیت دمای کمینه در چرخه زندگی گیاهان توجه به این متغیر هواشناسی بسیار اهمیت دارد و تغییرات اندک و جزئی در این متغیر می‌تواند فرایند زیستی گیاهان به‌ویژه گیاهان دارویی را تحت تأثیر مستقیم قرار دهد. بررسی وضعیت رویشگاه در آینده نزدیک نشان می‌دهد که بخشی از رویشگاه‌ها با مطلوبیت عالی و خوب به طبقه با مطلوبیت متوسط منتقل شد. نتیجه کلی پژوهش نشان داد، عوامل اقلیمی، به‌خصوص بارندگی و درجه حرارت، بر پراکنش، رشد و نمو گونه‌های گیاهی تأثیر می‌گذارند و با افزایش درجه حرارت، رطوبت خاک کاهش می‌یابد و این شرایط می‌تواند پراکنش، رشد و نمو گونه‌های گیاهی را محدود کند و از مطلوبیت رویشگاه‌ها بکاهد.

واژه‌های کلیدی: متغیر زیست-اقلیمی، سناریو خوش‌بینانه، سناریو بدبینانه، مطلوبیت مراتع.

مقدمه

اقلیم کره زمین حاصل برهم کنش های پیچیده موجود بین اجزای مؤثر نظیر اقیانوس ها، اتمسفر، زمین کره، قطب ها و زیست کره است. در سال های اخیر، مفهومی با عنوان تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از دانشگاهیان و سازمان های مدیریتی دنیا قرار گرفته است (Arian et al., 2025; Bista et al., 2021; Parviz et al., 2024). بر اساس تعریف ارائه شده منظور از تغییرات اقلیمی، تغییر و دگرگونی پایدار و بلندمدت در الگوهای آب و هوایی کره زمین ناشی از تغییر در اجزای اقلیمی و روابط بین آنها است که می تواند به صورت طبیعی رخ دهد یا از فعالیت های انسانی ناشی گردد (Gholami et al., 2017). ویژگی بلندمدت بودن اشاره به بازه های زمانی دهه یا قرن دارد. صنعتی شدن اخیر جوامع، منجر به افزایش مصرف سوخت های فسیلی شده است که منجر به انتشار گازهای گلخانه ای (Lal et al., 2020)، افزایش میانگین دمای جهانی و تغییرات در متغیرهای اقلیمی (Fakhri et al., 2024) شده است. افزایش انتشار گازهای گلخانه ای و تشدید تغییرات متغیرهای اقلیمی می تواند بر مجموعه های مختلف، از جمله منابع آب، محیط زیست، صنعت، بهداشت و کشاورزی تأثیر منفی بگذارد (Jalali et al., 2020; Yosefi Kebriya & Nadi, 2023; Parviz et al., 2024; Ramezani Etedali & Koochi, 2025). اگرچه کاهش گازهای گلخانه ای می تواند شدت تغییرات اقلیمی را در دوره های آینده کاهش دهد، باید توجه داشت که حتی اگر تمام انتشار گازهای گلخانه ای فوراً متوقف شود، تغییرات اقلیمی تا اواخر قرن بیست و یکم ادامه خواهد داشت (Williams & Blois, 2018). چهارمین گزارش ارزیابی هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC) افزایش میانگین دمای جهانی را تا سال ۲۰۵۰ تقریباً ۳ درجه سانتی گراد و تا سال ۲۱۰۰ ۴/۵ درجه سانتی گراد پیش بینی می کند (Descamps et al., 2020). همچنین بارش نقش حیاتی و تأثیرگذاری در چرخه هیدرولوژیکی و زیست بوم زمین ایفا می کند که با تغییر در میزان بارش، برف و یخ تأثیرات متعددی بر پراکنش گونه های گیاهی مشاهده می شود (Yosefi Kebriya & Nadi, 2023). از دهه ۱۹۸۰، مناطق پربارش در هر دو نیم کره به قطب ها نزدیک تر شده اند. طبق شبیه سازی های IPCC، با افزایش دما، میزان بارش تا سال ۲۱۰۰ در عرض های جغرافیایی بالا، بخش هایی از مناطق گرمسیری و اقیانوس آرام افزایش می یابد، اما در برخی از مناطق نیمه گرمسیری کاهش می یابد (Braunisch et al., 2013; Ghehsareh Ardestani et al., 2025a). تغییرات اقلیمی الگوی پراکنش و غنای گونه های بسیاری از گروه های گیاهی را تغییر می دهد. تغییرات اقلیمی در آینده ممکن است به تغییراتی در توزیع و فراوانی گونه ها، انقراض جمعیت های محلی گونه ها، تغییرات فنولوژیکی و فیزیولوژیکی منجر شود (Adabi Ardakani et al., 2025; Ghehsareh Ardestani et al., 2025b; Heidari Ghahfarrokhi, 2021; Pourmeidani et al., 2021; Behmanesh et al., 2019). گیاهان به دلیل این که توانایی حرکت سریع و جابه جاشدن فردی ندارند، با تأخیر زمانی نسبتاً زیاد به تغییرات محیطی پاسخ می دهند؛ با این وجود پس از تغییرات اقلیمی، برای پیدا کردن شرایط محیطی که تناسب بیشتری برای حیات آنها دارند، در محیط جغرافیایی جابه جا می شوند (Bhandari et al., 2021). مطالعات زیادی به بررسی ابعاد و جهت گیری این تغییرات اختصاص داده شده اند که در آنها به بررسی عکس العمل گونه های مختلف گیاهی و جانوری در زیست بوم های متفاوت به تغییرات اقلیمی پرداخته اند و برای این کار از روش های مختلفی استفاده کرده اند (Adabi Ardakani et al., 2025; Soltani et al., 2025; Erfanian et al., 2021; Farzadmehr & Sangoony, 2020). برخی از پژوهش ها به تأثیر مخرب تغییر اقلیم بر توانایی گونه ها برای ادامه بقا تأکید کرده اند (Ghehsareh Ardestani et al., 2025b; Khajoei Nasab et al., 2022; Gilani et al., 2020; Maghmi et al., 2019). برای دستیابی به پیش بینی های دقیق و مناسب در آینده لازم است تا با داده های گسترده وضعیت گذشته و فعلی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته و الگو و روند تغییرات تعیین شود. استفاده از فناوری های نوین همچون سنجش از دور با قابلیت پایش مکرر و گسترده دستیابی به این هدف را آسان نموده است و امروزه داده های تصاویر ماهواره به عنوان بانک داده ای برای بررسی وضعیت منابع طبیعی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است (Soltani et al., 2025; Pourmeidani et al., 2021; Descamps et al., 2020). توسعه روش های یادگیری ماشین باعث شده است تا شناسایی روندها و تعیین الگوها با سرعت و دقت بیشتری انجام شود؛ بنابراین استفاده هم زمان از این فناوری های باعث شده است تا بتوان گام های مفید و مؤثری در حفاظت از گونه های گیاهی و جانوری برداشت.

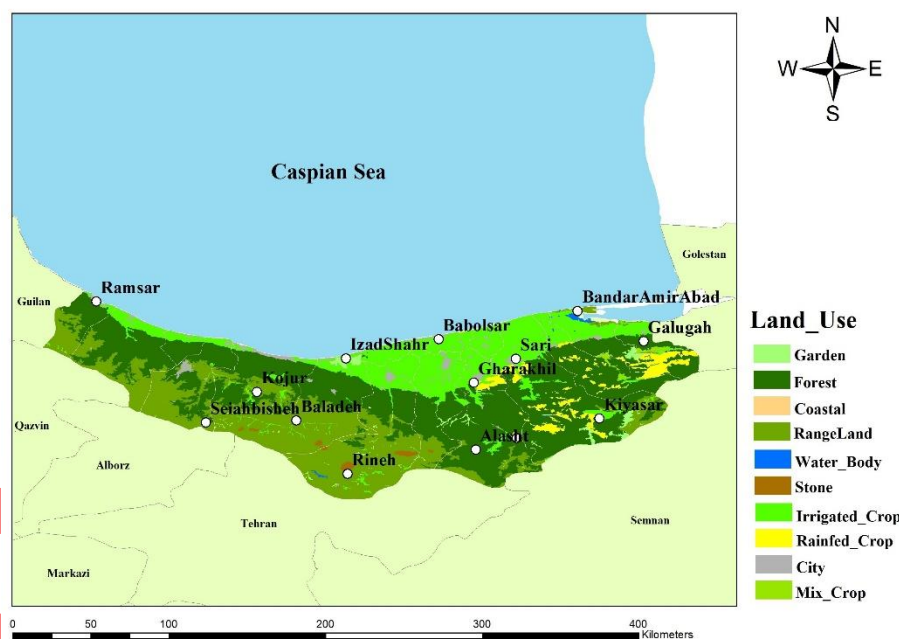
شناسایی پیامدهای تغییر اقلیم بر پراکنش گونه های گیاهی، گامی مهمی در تعیین راهبردهای حفاظتی به شمار می آید. هدف اصلی در پژوهش حاضر استفاده از فناوری های نوین همچون سنجش از دور و الگوریتم جنگل تصادفی در پیش بینی رویشگاه های

آینده گیاهان دارویی است که به دلیل اهمیت مسئله تغییر اقلیم در آینده، تأثیر عوامل اقلیمی مؤثر بر حیات و رشد گیاهان نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین در پژوهش حاضر تلاش شده است تا در ابتدا روند تغییرات اقلیمی در سطح استان مازندران با استفاده از دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه بر مبنای مدل‌های گزارش پنجم و ششم تغییر اقلیم بررسی شود. سپس با استفاده از سری زمانی شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI) و داده‌های بلندمدت دما و بارش در گذشته وضعیت پوشش گیاهی در مراتع استان با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ارزیابی شده و پس از تعیین الگوی تغییرات، وضعیت مراتع به عنوان اصلی‌ترین رویشگاه گیاهان دارویی در آینده پیش‌بینی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر استان مازندران در شمال ایران است. این استان مساحتی در حدود ۲۳ هزار کیلومتر مربع دارد که حدود ۱۸ هزار کیلومتر مربع آن شامل مناطق کوهستانی و ۵ هزار کیلومتر مربع آن شامل کوهپایه‌ها و دشت‌ها است (Yosefi Kebriya & Nadi, 2023). حداکثر ارتفاع این استان ۵۶۷۰ متر بالاتر از سطح دریای آزاد و حداقل ارتفاع آن ۲۳- متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد است. این استان از شمال به دریای کاسپین، از جنوب به بخش مرکزی رشته‌کوه البرز، از غرب به استان گیلان و از شرق به استان گلستان محدود می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Study Area

بررسی پژوهش‌های مرتبط نشان داد که گیاهان بابونه ایرانی، گل‌گاوزبان ایرانی، گلپر، خرگوشک، گون، مریم‌گلی خزری، آویشن باغی و درختان نم‌دار، زیرفون و سرخدار گونه‌های پرجمعیت گیاهان دارویی در مراتع و جنگل‌های استان مازندران هستند (Keikha et al., 2021; Avand et al., 2021).

تعیین متغیرهای اقلیمی در استان مازندران در آینده نزدیک

در ایستگاه‌های منتخب استان مازندران، ابتدا داده‌های دما و بارش دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) و دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۶۰) مدل‌های مذکور در جدول شماره ۱ بر مبنای گزارش پنجم و ششم تغییر اقلیم تحت سناریوهای خوش‌بینانه (RCP2.6) و (SSP1-2.6) و بدبینانه (RCP8.5 و SSP5-8.5) انتشار انتخاب شد. در گزارش پنجم مطابق سناریو خوش‌بینانه (RCP2.6) واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر متر مربع رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر متر مربع در سال

۲۱۰۰ می‌رسد و مقدار دی اکسید کربن اتمسفر ۴۹۰ppm خواهد بود (Nazari et al., 2021). برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی باید حجم گازهای گلخانه‌ای در جو به میزان قابل توجهی کاهش یابند. در این سناریو رشد فناوری‌های جدید نسبت به دیگر سناریوها بیشتر و به دلیل پایین بودن نرخ رشد جمعیت و استفاده از انرژی‌های نو، میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای پایین‌تر از دیگر سناریوها است. بدون اتخاذ هیچ گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP 8.5 پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. در این هنگام غلظت دی اکسید کربن به ۱۳۷۰ppm رسیده و همچنان روند افزایشی خواهد داشت (Farzadmehr & Sangoony, 2020). میزان تولید ناخالص داخلی در کشورهای توسعه یافته به دلیل افزایش جمعیت و محدود بودن توسعه فناوری‌های نوین، پایین است. در این سناریو، با توجه به میزان جمعیت و نیاز آنها به تأمین انرژی، استفاده از انواع انرژی (به جز انرژی زیستی) در این سناریو بیش از دیگر سناریوها در نظر گرفته شده است. سناریوهای گزارش ششم به صورت ترکیبی از خط سیرهای اقتصادی-اجتماعی (SSP) و خط سیرهای غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) تولید می‌شوند، به طوری که امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری را فراهم می‌آورند. خط سیرهای اقتصادی-اجتماعی شامل SSP1 توسعه پایدار، SSP2 توسعه بر اساس سیاست‌های میانی، SSP3 رقابت منطقه‌ای، SSP4 نابرابری و SSP5 توسعه سوخت‌های فسیلی بوده و میزان واداشت انرژی تابشی خورشیدی سناریوهای SSP در سطوح ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر متر مربع است (Haghighi et al., 2025). سناریوهای جدید پایه SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب سناریوهای به روزرسانی شده سطوح واداشت RCP2.6 و RCP8.5 گزارش پنجم هستند. سناریوی SSP1-2.6 پایین‌ترین میزان واداشت تابشی را نشان می‌دهد و پایداری کاربری زمین در زمان آینده یکی از خصوصیات اصلی این سناریو است. سناریو SSP5-8.5 نیز حد بالای واداشت تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های منتخب مورد استفاده در این تحقیق

Table 1. Characteristics of the selected models used in this research

مرکز تحقیقات	تفکیک مکانی	مدل	گزارش
Research Center	Spatial Resolution (Lon×Lat)	Model	Report
National Meteorological Research Centre -France	362×292	CNRM-CM5	CMIP 5
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	128×64	CanESM2	
Max Planck Institute for Meteorology- Germany	256×220	MPI-ESM-LR	
National Meteorological Research Centre -France	256×128	CNRM-CM6-1	CMIP6
Canadian Earth System Model Ver.5, Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	128×64	CanESM5	
Max Planck Institute for Meteorology- Germany	256×220	MPI-ESM1-2LR	

در حال حاضر خروجی مدل‌های جهانی اقلیم (GCM) دقت مکانی و زمانی کمی دارند. عمل ریزمقیاس‌نمایی آماری به منظور تبدیل شبکه‌بندی‌های بزرگ مدل‌های اقلیمی به سطوح کوچک‌تر در حد محلی و ناحیه‌ای توسعه و کاربرد یافته‌اند. در روش‌های آماری، روابط تجربی بین متغیرهای مستقل (پیشگوها) و متغیرهای وابسته (پیش‌بینی‌شونده) مشخص می‌گردند. از مهم‌ترین روش آماری موجود برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم می‌توان به مدل‌های مولد داده‌های هواشناسی (Weather Generator-WG) اشاره کرد. با داشتن داده‌های روزانه می‌توان مطالعات مفیدی روی میزان و دوره‌های بازگشت بارش‌های سیل‌آسا و شاخص‌های حدی دما انجام داد. در این پروژه از مدل آماری LARS-WG (نسخه شش و هشت) استفاده شد. در این مدل فرایند تولید داده‌های مصنوعی آب‌وهوایی در سه بخش انجام می‌گیرد:

واسنجی مدل: در این بخش داده‌های آب‌وهوایی دیدبانی شده برای تعیین خصوصیات آماری‌شان تحلیل می‌شوند. صحت‌سنجی مدل: در این قسمت خصوصیات آماری داده‌های دیده‌بانی و مصنوعی تولید شده توسط مدل برای تعیین اینکه آیا تفاوت‌های

آماري قابل توجهي بين اين دو گروه از داده‌ها وجود دارد يا نه مورد تحليل قرار مي‌گيرد. توليد داده‌هاي آب‌وهوايي: داده‌هاي آب‌وهوايي مصنوعي با استفاده از فايل‌هاي به‌دست‌آمده از داده‌هاي آب‌وهوايي دوره ديدباني‌شده توليد مي‌شوند که دارای خصوصيات آماری مشابه با دوره ديدباني است.

تعيين متغيرهاي محيطي مؤثر بر رويشگاه گياهان دارويي

در پژوهش حاضر، ده متغير زيست-اقليمي که توسط هيجمانز و همکاران (Hijmans et al., 2005) معرفي شده‌اند (<http://chelsa-climate.org>)، به همراه سه متغير اصلي پستي‌وبلندي (ارتفاع، شيب و جهت)، به‌عنوان توصيف‌کننده رويشگاه گياهان دارويي مورد استفاده قرار گرفتند که در مطالعات زيادي به‌عنوان مبنای پايش تأثيرات تغيير اقليم بر موجودات زنده (به‌خصوص گياهان) به کار رفته‌اند (جدول ۲) و لايه‌هاي اطلاعاتي آنها در وبگاه‌ها و مراکز معتبر علمي تهيه شده است. در مطالعه حاضر از داده‌هاي راداري تصاوير ماهواره‌اي سنتينل براي تهيه متغيرهاي پستي‌وبلندي استفاده شد.

جدول ۲. توصيف متغيرهاي زيست-اقليمي مورد استفاده در پيش‌بيني زيستگاه‌هاي آينده گياهان دارويي
Table 2. Description of bioclimatic variables used in predicting future habitats of medicinal plants

متغير	توصيف اقليمي	متغير	توصيف اقليمي
Variable	Climatic description	Variable	Climatic description
BIO1	میانگین دمای سالانه	BIO7(BIO5-BIO6)	دامنه سالانه دما
BIO2	میانگین دامنه دمای روزانه	BIO12	مجموع بارندگی سالانه
BIO4	تغییرات فصلی دما	BIO13	مجموع بارندگی پربارش‌ترین ماه
BIO5	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	BIO14	مجموع بارندگی کم‌بارش‌ترین ماه
	Maximum temperature of the warmest month		Total rainfall of the driest month
BIO6	حداقل دمای سردترین ماه	BIO15	تغییرات فصلی بارندگی (ضریب تغییرات)
	Minimum temperature of the coldest month		Seasonal changes in precipitation (CV)

تعيين رويشگاه گياهان دارويي

با ايجاد بانک داده‌هاي اقليمي و محيطي در منطقه مورد مطالعه، استفاده از الگوريتم جنگل تصادفي در چند مرحله آغاز شد. ابتدا، به‌منظور بررسي تغييرات کاربري زمين به‌ويژه تعيين محدوده مراتع به‌عنوان رويشگاه اصلي گياهان دارويي در استان مازندران از تصاوير ماهواره سنتينل-۲ استفاده شد. توليد سري زماني شاخص تفاضل نرمال‌شده گياهي (NDVI) براي بررسي تغييرات سطح مراتع در دوره بلندمدت انجام گرفت. شاخص تفاضل نرمال‌شده گياهي بيشتري استفاده را به‌عنوان شاخص دورسنگي دارد (Amiri, 2023). اين شاخص توسط روس و همکاران (Rouse et al. (1974 ارائه شده و براساس رابطه ۱ محاسبه مي‌شود. بررسي سري زماني نشان داد که در اواسط فصل بهار تا اوایل فصل تابستان به‌ترين زمان بررسي وضعيت مراتع بوده؛ بنابر اين تصاوير ماهواره‌اي در اين بازه زماني براي تعيين الگو و روند تغييرات سطح و وضعيت سلامت مراتع در الگوريتم جنگل تصادفي مورد استفاده قرار گرفت. ۷۰ درصد از تصاوير سري زماني به‌منظور آموزش، ۲۰ درصد آن براي آزمون و ۱۰ درصد آن براي صحت‌سنجی در الگوريتم مذکور استفاده شد.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

مطابق با رابطه ۱، شاخص تفاضل نرمال‌شده گياهي (NDVI) با استفاده از بازتاب در طول موج قرمز مرئي (ρ_R) و فروسرخ نزديک (ρ_{NIR}) محاسبه شد. پس از الگوسازی روند تغييرات کاربري زمين در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوريتم جنگل تصادفي، به‌منظور تعيين رويشگاه آينده گياهان دارويي و پيش‌بيني پراکنش گونه‌هاي گياهان دارويي در مراتع استان مازندران

روند تغییرات دما و بارش به همراه شاخص‌های زیست-اقلیمی در آینده و چگونگی تغییرات کاربری اراضی به الگوریتم جنگل تصادفی وارد شد و احتمال وقوع رویشگاه‌های مطلوب گونه‌های گیاهان دارویی در پنج گروه دسته‌بندی گردید. طبقه‌بندی نقشه نهایی شامل مطلوبیت رویشگاه عالی ($P > 0.8$)، مطلوبیت رویشگاه خوب ($0.6/0.8$)، مطلوبیت رویشگاه متوسط ($0.4/0.6$)، مطلوبیت رویشگاه ضعیف ($0.2/0.4$) و مطلوبیت رویشگاه نامناسب ($P < 0.2$) بود.

آماره‌های ارزیابی

به منظور ارزیابی دقت مدل‌های تغییر اقلیمی و بررسی عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب تبیین در مرحله واسنجی، آموزش و آزمون استفاده شد (روابط ۲ تا ۴). همچنین نرخ تغییرات دما و بارش در آینده نزدیک نسبت به دوره پایه با استفاده از رابطه ۵ مورد بررسی قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} / \bar{O} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(\bar{O} - O_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$Change\ rate = \frac{X_{future} - X_{baseline}}{X_{baseline}} \quad (5)$$

در روابط مذکور، n تعداد مشاهدات، O_i مقدار متغیر اقلیمی در دوره پایه، P_i مقدار متغیر اقلیمی در آینده نزدیک، $\bar{O}$ میانگین مقادیر متغیر اقلیمی در دوره پایه (متوسط O_i ها)، $\bar{P}$ میانگین مقادیر متغیر اقلیمی در آینده نزدیک (متوسط P_i ها)، X_{future} مقدار متوسط متغیر اقلیمی در آینده نزدیک و $X_{baseline}$ مقدار متوسط متغیر اقلیمی در دوره پایه است. به منظور بررسی دقت نقشه‌های پراکنش گونه‌های گیاهی، از ماتریس خطا و ضریب کاپا استفاده شد. با کمک ماتریس خطا، صحت کل مطابق با رابطه ۶ محاسبه و از رابطه ۷ برای محاسبه ضریب کاپا استفاده شد.

$$OA = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{kk} \quad (6)$$

$$K_a = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \times 100 \quad (7)$$

نمادهای به کاررفته در روابط ۶ و ۷، OA صحت کل، n تعداد کل پیکسل‌های ارزیابی شده و $\sum_{k=1}^n a_{kk}$ مجموع پیکسل‌های قطر اصلی ماتریس خطا (تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده) است. K_a مقدار ضریب کاپا و P_o نشان‌دهنده درستی مشاهده و P_c توافق مورد انتظار است.

نتایج و بحث

وضعیت اقلیمی استان مازندران در آینده نزدیک

در مدل LARS-WG پس از دریافت داده‌های مشاهداتی روزانه (بارش، دمای بیشینه و کمینه) مشخصه‌های آماری داده‌ها استخراج شد. سپس به منظور اطمینان از توانایی مدل، یک سری داده مصنوعی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) تولید و با داده‌های مشاهداتی با استفاده از آماره‌های RMSE، NRMSE و R^2 مقایسه شد (جدول ۳).

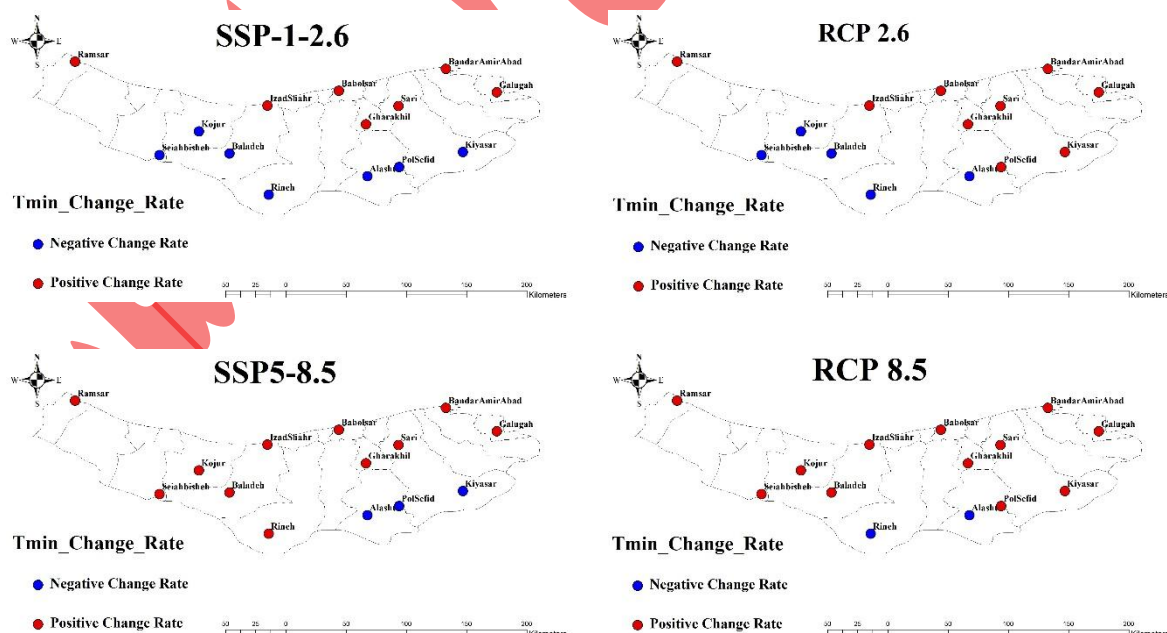
جدول ۳. ارزیابی مدل‌های تغییر اقلیمی در آینده نزدیک

Table 3. Evaluation of Climate Change Models in the Near Future

MPI-ESM1-2LR	CanESM5	CNRM-CM6-1	MPI-ESM-LR	CanESM2	CNRM-CM5	آماره ارزیابی Statistical Index	شاخص Parameter
3.36	3.02	2.94	3.39	3.21	2.87	RMSE	بارش Precipitation
6.92	5.98	5.96	6.98	6.54	5.34	NRMSE	
0.92	0.93	0.93	0.91	0.89	0.92	R^2	
0.18	0.11	0.16	0.19	0.18	0.14	RMSE	دما Temperature
0.92	0.52	0.83	0.91	0.88	0.76	NRMSE	
0.93	0.95	0.92	0.92	0.91	0.95	R^2	

با توجه به جدول ۲، مدل CNRM در گزارش پنجم عملکرد بهتری نسبت به گزارش ششم داشت درحالی که مدل CanESM در گزارش ششم عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داد. مدل MPI-ESM در دو گزارش عملکرد تقریباً یکسانی داشته است. در پژوهش Haghghi et al., 2025 گزارش شده است که به‌روزرسانی و ارتقای برخی مدل‌ها در گزارش ششم باعث بهبود عملکرد آنها شده است درحالی که عملکرد تعدادی از مدل‌ها بدون تغییر باقی‌مانده است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مدل CNRM به دلیل کمترین خطا و بیشترین ضریب تبیین برای مدل‌سازی شرایط آینده مناسب بوده و در ادامه برای دستیابی به نتایج دقیق مورد استفاده قرار گرفت.

پهنه‌بندی نرخ تغییرات دمای کمینه، بیشینه و بارش در ۱۴ ایستگاه همدید استان مازندران با استفاده از مدل CNRM-CM5 و CNRM-CM6-1 تحت دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه انجام و در شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش داده شد.

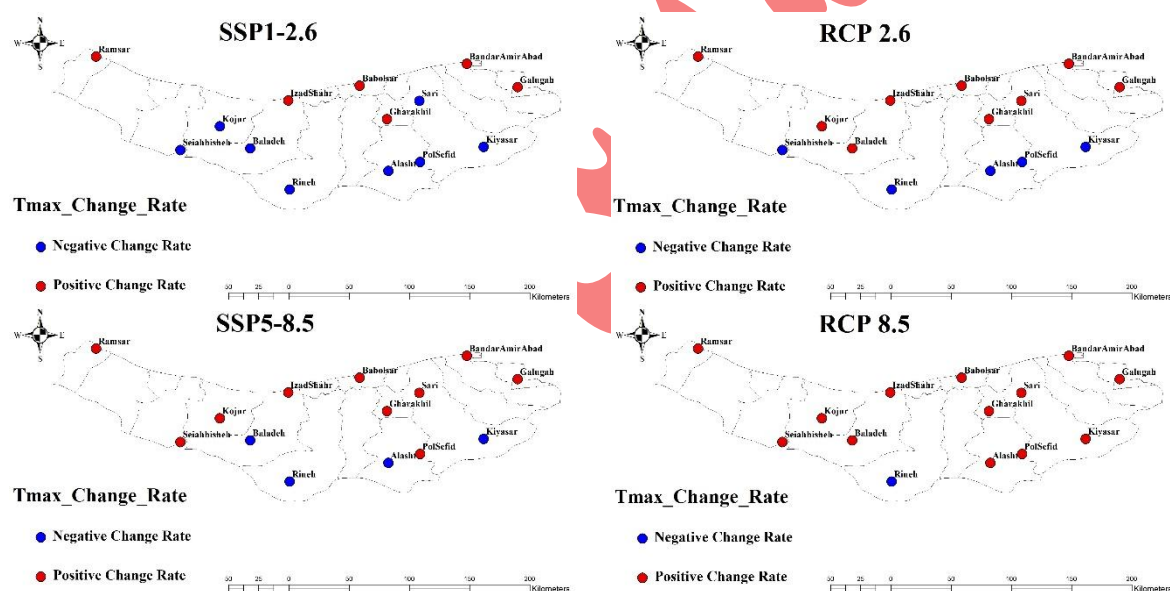


شکل ۲. نرخ تغییرات سالانه دمای کمینه با مدل‌های CNRM-CM5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای مختلف در آینده

نزدیک

Fig 2. Change rate of annual minimum temperatures with CNRM-CM5 and CNRM-CM6-1 by various scenarios in the near future

مطابق با شکل ۲، آلاشت، رینه کجور، بلده و سیاه‌بیشه ایستگاه‌های مشترک در گزارش پنجم و ششم سناریو خوش‌بینانه هستند که نرخ کاهشی دمای کمینه دارند و در گزارش ششم کیاسر و پل سفید نیز در این گروه قرار می‌گیرند. در سناریوی بدبینانه اغلب ایستگاه‌ها حتی ایستگاه‌های کوهپایه‌ای نیز نرخ افزایشی دمای کمینه خواهند داشت و فقط ایستگاه آلاشت در دو گزارش نرخ کاهشی دارد. نکته قابل توجه این است که رینه، کجور و سیاه‌بیشه به دلیل داشتن مراتع دست‌نخورده و طبیعی به عنوان رویشگاه‌های اصلی گیاهان دارویی با تنوع فراوان گونه‌ای شناخته می‌شوند و افزایش دمای کمینه در سناریوی بدبینانه می‌تواند تهدیدی برای این رویشگاه‌های طبیعی و کاهش تنوع گونه‌های گیاهی باشد. با توجه به اهمیت دمای کمینه در چرخه زندگی گیاهان توجه به این متغیر هواشناسی بسیار اهمیت دارد و مطابق با بررسی‌های پژوهشی انجام گرفته تغییرات اندک و جزئی در این متغیر می‌تواند فرآیند زیستی گیاهان به‌ویژه گیاهان دارویی را تحت تاثیر مستقیم قرار دهد (Amiri et al., 2019; Bhandari et al., 2021). از آنجایی که کمینه دمای شبانه‌روزی، معمولاً در طی شب اتفاق می‌افتد، افزایش این متغیر منجر به افزایش تنفس گیاهی در طی شب و مصرف فرآورده‌های فتوسنتزی توسط گیاه می‌شود. این اتفاق با کاهش عملکرد گیاهی همراه است و در گیاهان دارویی به دلیل نقش آفرینی در تولید متابولیت‌های ثانویه، لازم است تا سهم بالایی از متابولیت‌های اولیه وارد چرخه تولیدی متابولیت‌های ثانویه قرار گیرد و در صورت افزایش میزان مصرف متابولیت‌های فتوسنتزی در فرآیند تنفس شبانه گیاهی، انرژی و ماده اولیه برای ساخت متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی کاهش یافته و این گیاهان با کاهش عملکرد مواجه شده و در طولانی مدت کارکرد دارویی خود را از دست خواهند داد.

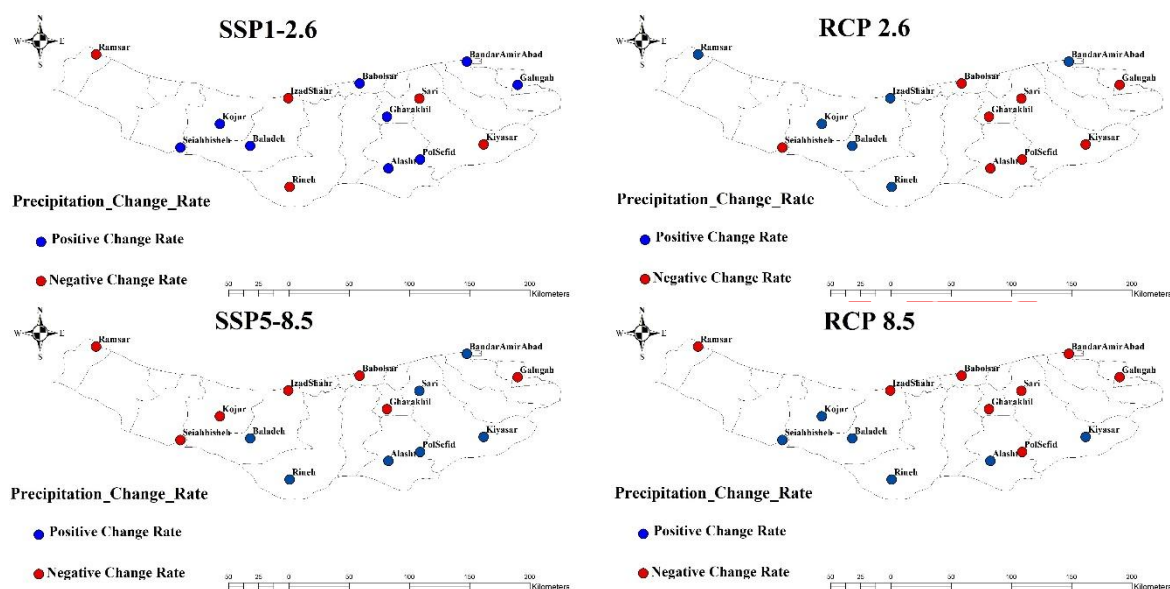


شکل ۳. نرخ تغییرات سالانه دمای بیشینه با مدل‌های CNRM-CM5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای مختلف در آینده نزدیک

Fig 3. Change rate of annual maximum temperatures with CNRM-CM5 and CNRM-CM6-1 by various scenarios in the near future

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تعداد ایستگاه‌ها با نرخ کاهشی تغییرات دمای بیشینه در مدل CNRM-CM6-1 نسبت به مدل گزارش پنجم بیشتر است و در سناریوی خوش‌بینانه از پنج ایستگاه در گزارش پنجم به هفت ایستگاه در گزارش ششم افزایش می‌یابد و در سناریو بدبینانه از یک ایستگاه به چهار ایستگاه افزایش یافته است. لازم است به این نکته توجه شود که نرخ تغییرات مقادیر بیشینه دما متأثر از دمای هوا در همه ایام سال و فصول چهارگانه است و قرار گرفتن داده‌های فصول سرد سال در تعیین متوسط سالانه باعث تعدیل مقادیر عددی حد بالا در دمای بیشینه شده است. با توجه به متوسط بیشینه دمای هوا در بهار و تابستان در شرایط فعلی افزایش جزئی در دمای بیشینه در فصول مذکور که به عنوان فصل‌های فعالیت گیاهان شناخته شده و گیاهان دارویی هم بیشترین فعالیت زیستی خود را انجام می‌دهند، در بسیاری از بازه‌های زمانی از حد آستانه تحمل گیاه بالاتر بوده و گیاه را با تنش گرمایی مواجه می‌کند (Bararkhanpour Ahmadi et al., 2024). هرچند

تأثیر تنش‌های محیطی بر گیاهان دارویی تا حدی می‌تواند مثبت بوده و منجر به تولید متابولیت‌های ثانویه بیشتر شود اما افزایش دوره زمانی تنش و قرار گرفتن گیاه در دماهای بیش از حد آستانه منجر به تخریب چرخه‌های زیستی درونی گیاه شده و فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها مختل شده و علاوه بر کاهش عملکرد متابولیت ثانویه، گیاه با بحران حیاتی مواجه شده و احتمال نابودی بسیاری از گونه‌های گیاهان دارویی وجود دارد (Das et al., 2016).



شکل ۴. نرخ تغییرات سالانه بارش با مدل‌های CNRM-CM5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای مختلف در آینده نزدیک
Fig 4. Change rate of precipitation with CNRM-CM5 and CNRM-CM6-1 under various scenarios in the near future

مطابق با شکل ۴، بررسی وضعیت تغییرات بارش در سناریوهای خوش‌بینانه نشان می‌دهد که نرخ بارش در ایستگاه‌های ساحلی افزایشی است. با توجه به نرخ تغییرات دمای بیشینه و کمینه که در تمامی ایستگاه‌های ساحلی افزایشی بوده است می‌توان نرخ افزایشی بارش را به افزایش میزان تبخیر از سطح دریا مرتبط نمود و با نظر برخی پژوهش‌گران افزایش رطوبت نسبی هوا به‌ویژه در فصول سرد سال مقدار بارش را افزایش می‌دهد (Gholami et al., 2017; Khajoei Nasab et al., 2020; Mehrabian et al., 2021). همچنین توجه به این نکته ضروری است که در مناطقی همچون استان مازندران که دارای تنوع پستی و بلندی بوده و در بسیاری از مناطق فاصله دریا تا کوهستان اندک است احتمال رخداد بارندگی می‌تواند با افزایش میزان رطوبت هوا افزایش یابد، البته این بارش‌ها بیشتر الگوی سیلابی داشته و مناطق ساحلی را با خطر فرسایش آبی مواجه خواهد نمود. نکته قابل توجه در سناریوهای بدبینانه، افزایش تعداد ایستگاه‌های کوهستانی است که در آنها میزان بارش افزایش خواهد یافت. به نظر می‌رسد شیب مثبت افزایش دمای بیشینه در این مناطق باعث خواهد شد تا در آینده مقدار قابل توجهی از بارش‌های جامد تغییر وضعیت داده و به‌صورت بارش‌های مایع تغییر یابند (Haghighi et al., 2025) که منجر به افزایش نرخ تغییرات بارش در آینده خواهد شد. رخداد چنین واقعه‌ای باعث کاهش ذخایر یخچال‌های کوهستانی شده و در فصول گرم سال تنش آبی را افزایش می‌دهد و لازم است راهکارهایی به‌منظور مدیریت بارش‌های پاییزه و زمستانه انجام داد و با توسعه راهکارهای آبخیزداری، بسیاری از جریانات سطحی را به ذخیره آب زیرزمینی منتقل نمود. همچنین استفاده از آب‌بندان‌ها نیز به عنوان مهارکننده و ذخیره‌ساز آب‌های سطحی می‌تواند راهگشا باشد.

بررسی تغییرات وضعیت مراتع در استان مازندران

با استفاده از سری زمانی شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی حاصل از ماهواره سنتینل-۲، سطح مراتع در استان مازندران در شرایط فعلی بررسی و با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، وضعیت آینده نیز پیش‌بینی شد تا علاوه بر بررسی تأثیر شاخص‌های زیست-اقلیمی بر رویشگاه‌های گیاهان دارویی، تغییرات سطح مراتع به‌عنوان اصلی‌ترین رویشگاه‌های این گیاهان ارزشمند نیز

بررسی شود و تاثیر تغییرات کاربری نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. در جدول ۳، محدوده مراتع و تغییرات مساحت آن در بازه زمانی فعلی و آینده بررسی شده است.

جدول ۳. درصد تغییرات محدوده مراتع در استان مازندران

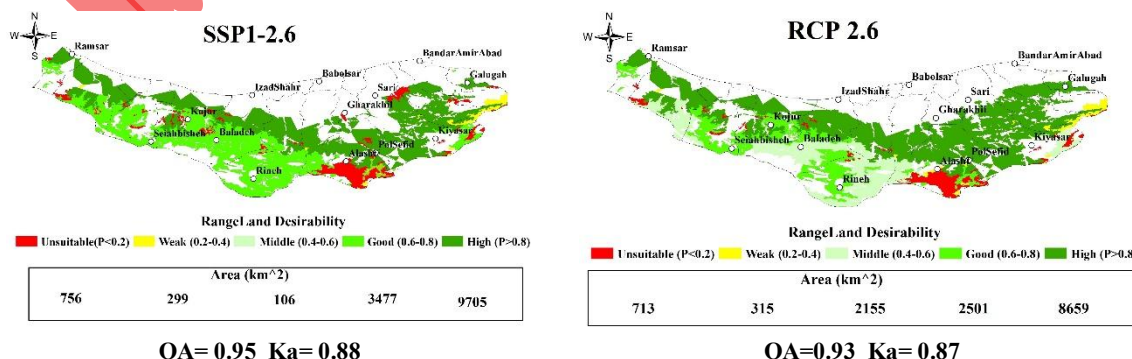
Table 3. Rangelands changes percentage in Mazanadarn Province

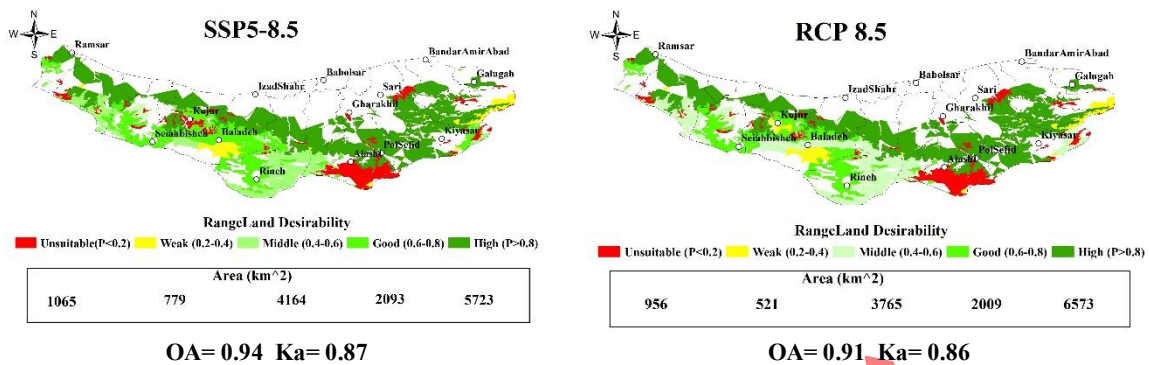
محدوده مراتع	درصد تغییرات در دوره فعلی	درصد تغییرات در آینده نزدیک
Rangelands Area	Percentage change in the current period	Percentage change in the near future
آلاشت	+23.5	+12.3
Alasht		
بلده	+13.6	-2.8
Baladeh		
رینه	-8.4	+4.3
Rineh		
سیاهبیشه	-3.8	+6.2
Seiahbisheh		
کجور	-10.7	-15.8
Kajur		
کیاسر	+4.6	+3.2
Kiyasar		

بر اساس جدول ۳، مراتع در منطقه آلاشت و کیاسر با افزایش سطح در دوره فعلی و آینده نزدیک همراه هستند در حالی که مراتع بلده در دوره آینده دچار کاهش سطح خواهند شد. بهبود وضعیت مراتع در آینده نزدیک و افزایش سطح آنها نکته قابل توجهی است که در پژوهش‌های دیگر نیز به آن اشاره شده است (Arian et al., 2025; Avand et al., 2021) و در پژوهش حاضر نیز بهبود وضعیت مراتع در رینه و سیاهبیشه پیش‌بینی شد. از آنجایی که در الگوریتم جنگل تصادفی علاوه بر روندیابی سری زمانی شاخص NDVI، الگوی تغییرات دما و بارش و شاخص‌های زیست-اقلیمی در آینده نیز به الگوریتم وارد شده است تاثیر افزایش بارش در مراتع مذکور با تغییرات مثبت همراه خواهد بود. اما مراتع کجور در بازه زمانی فعلی و آینده نزدیک با روند کاهشی سطح همراه بوده که این کاهش در دوره آینده با شدت بیشتری ادامه خواهد داشت. دارا بودن بالاترین نرخ تغییرات کمینه دما در این ایستگاه می‌تواند یکی از اصلی‌ترین دلایل این کاهش سطح باشد و همانطور که اشاره شد تاثیر کمینه دما بر فرآیندهای زیستی گیاه می‌تواند منجر به توقف توسعه گیاهان شده و سطح مراتع را کاهش دهد.

پهنه‌بندی رویشگاه‌های گیاهان دارویی استان مازندران در اقلیم آینده

متغیرهای زیست-اقلیمی در آینده نزدیک، روند تغییرات دما و بارش و الگوی تغییرات سری زمانی شاخص NDVI به الگوریتم جنگل تصادفی وارد و پهنه‌بندی رویشگاه‌های گیاهان دارویی در آینده نزدیک مطابق با شکل ۵ به دست آمد.





شکل ۵. مطلوبیت مراتع در آینده نزدیک
Fig 5. Rangeland Desirability in Near Future

مطابق با شکل ۵، رویشگاه گونه‌های گیاهان دارویی در مراتع و جنگل‌های استان مازندران در سناریو بدبینانه نسبت به سناریو خوش‌بینانه در حدود چهار درصد در آینده نزدیک کاهش خواهد داشت و شرایط اقلیمی و روند تغییرات کاربری زمین رویشگاه‌های گیاهان دارویی را با محدودیت مواجه خواهد کرد. در سناریو خوش‌بینانه مطابق گزارش پنجم حدود ۸۰ درصد مراتع مطلوبیت عالی و خوب به‌عنوان رویشگاه گیاهان دارویی دارند و در گزارش ششم سهم رویشگاه‌ها با مطلوبیت خوب نسبت به رویشگاه‌ها با مطلوبیت متوسط افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. به‌بیان دیگر بسیاری از رویشگاه‌های متوسط در گروه رویشگاه‌های خوب قرار می‌گیرند که علت آن تغییرات متعادل دمای کمینه و بهبود نرخ بارش در سناریوی خوش‌بینانه گزارش ششم است. رویشگاه‌ها با مطلوبیت عالی و خوب در سناریو بدبینانه به حدود ۶۵ درصد کاهش می‌یابد که متأثر از افزایش دمای کمینه و بیشینه است. همچنین رخداد بارش‌های سیلابی در بسیاری از مناطق کوهستانی منجر به فرسایش آبی شده که باعث کاهش پوشش گیاهی به‌ویژه گیاهان دارویی می‌شود که این مسئله نیازمند توجه به راهکارهای حفاظتی از مراتع در مقابل فرسایش و استفاده از راهبردهای مناسب در کنترل رواناب‌ها و جریانات سیلابی است. در پژوهش‌های مرتبط اشاره شده است که عوامل اقلیمی، به‌خصوص بارندگی و درجه حرارت، بر پراکنش، رشد و نمو گونه‌های گیاهی تأثیر می‌گذارند و با افزایش درجه حرارت، رطوبت خاک کاهش می‌یابد و این شرایط می‌تواند پراکنش، رشد و نمو گونه‌های گیاهی را محدود کند و از مطلوبیت رویشگاه‌ها بکاهد (Mohapatra et al., 2019). در گزارش پنجم، رویشگاه با مطلوبیت متوسط با افزایش مساحت در سناریو بدبینانه نسبت به سناریو خوش‌بینانه همراه بوده است و بخشی از رویشگاه‌ها با مطلوبیت عالی و خوب به این طبقه مطلوبیت منتقل شدند که این تغییر در طبقه‌بندی بیشتر در مناطق کوهپایه‌ای و مرتفع مشاهده شده است. در پژوهشی هم‌راستا با پژوهش حاضر اشاره شده است که درجه حرارت به‌عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر پراکنش گونه‌های گیاهی در ارتفاعات بالا و مناطق کوهستانی است. در گونه‌های گیاهی با افزایش درجه حرارت و کاهش بارش، سازگاری تکاملی با اقلیم سرد کاهش می‌یابد و بسیاری از گیاهان توانایی رشد و توسعه خود را در این مناطق از دست داده که منجر به کاهش مطلوبیت رویشگاهی می‌شود (Bista et al., 2021). مطالعات دیگری نیز بیان داشتند که تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌های دارویی مریم نخودی شرقی (*Teucrium orientale*) و لاله واژگون (*Fritillaria imperialis* L.) در مناطق کوهستانی تأثیر واضحی داشتند که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد (Heydari et al., 2015; Naghipour Borji et al., 2019). بنابراین با متغیرهای زیست‌اقلیمی می‌توان محدود پراکنش گونه‌های گیاهی را پیش‌بینی نمود (Lal et al., 2020).

نتیجه‌گیری

الگوهای پراکنش گیاهان به‌شدت وابسته به شرایط اقلیمی محیط است و بارش و دما نقش اساسی در پراکنش و استقرار گونه‌های مختلف ایفا می‌کنند. مطابق با نتایج، مناطق میانی و کوهپایه‌ای استان مازندران، با بیشترین نرخ افزایش دمای کمینه در آینده نزدیک (به‌طور متوسط ۱/۸۴ سانتی‌گراد) مواجه خواهند بود و این افزایش در سناریوی بدبینانه (به‌طور متوسط ۲/۲۹ سانتی‌گراد) بیشتر است. مطابق با گزارش ششم تعداد ایستگاه‌های بیشتری نرخ کاهشی دمای کمینه خواهند داشت. الگوی نرخ تغییرات مکانی بیشینه دمای هوا در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه (به‌طور متوسط ۰/۲۹ سانتی‌گراد) تا حد زیادی با یکدیگر

مطابقت دارد و همچنین مناطقی که با الگوی افزایشی کمینه دما مواجه هستند، افزایش بیشینه دمای روزانه را نیز تجربه خواهند کرد. بنابراین، تغییرات اقلیمی سبب تسریع گلدهی، کاهش اندازه گل و کاهش شهد شده و در نتیجه منجر به اختلال در گرده افشانی و عدم تولید مثل موفق این گونه‌های می‌شود. نرخ تغییرات متوسط بارش در سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱/۳۹ و ۰/۸ میلی‌متر بوده که با الگوی مکانی دمای بیشینه و کمینه تطابق نسبی دارد و بارش در مناطقی که در آینده گرم‌تر خواهند شد، افزایش می‌یابد. به‌طور کل، الگوی بارش از وضعیت منظم با شدت مناسب به بارش‌های نابه‌هنگام و سیلابی تغییر خواهد نمود و این مسئله در مراتع به دلیل افزایش احتمال فرسایش آبی از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین در سناریوی بدبینانه در هر دو گزارش، تغییر بارش از حالت جامد به مایع باعث افزایش مقدار بارش خواهد شد اما با کاهش ذخیره یخچال‌های کوهستانی احتمال مواجه شدن با تنش آبی افزایش خواهد یافت. در نهایت اینکه امروزه تغییرات اقلیمی نه‌تنها با تاثیر بر پراکنش گیاهان دارویی باعث در معرض خطر انقراض قرار گرفتن این گونه‌ها می‌شوند بلکه با تاثیر بر فنولوژی، تولیدمثل و زادآوری و همچنین تاثیر بر متابولیت‌های ثانویه سبب ایجاد تغییر در همه ابعاد زندگی آنها شده و حیات‌شان را به خطر می‌اندازد. از سوی دیگر برداشت بی‌رویه، تغییر کاربری اراضی و خشکسالی‌های اخیر سبب در معرض خطر انقراض قرار گرفتن این گونه‌های بارزش شده است. بنابراین نتایج حاصل از پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها و مطلوبیت رویشگاه‌ها می‌تواند برای مقابله با تغییرات اقلیمی بالقوه استفاده شوند.

منابع

- Adabi Ardakani, M., Morovati, M., Karami, P. & Sadeghinia, M. (2025). Analysis of the distribution of potential habitats of *Thymus vulgaris* L. and *Ferula assafoetida* L. medicinal plants in Ardakan city. *Plant Research (Iranian Biology Journal)*, 38 (1). 82-97.
- Amiri, F. (2023). A Review of Remote sensing vegetation indices in the land cover assessment. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2).
- Amiri, M., M. Tarkesh & R. Jafari. (2019). Predicting the climatic ecological niche of *Artemisia aucheri* Boiss. in Central Iran using species distribution modeling. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 8 (2). 61-79. <https://doi.org/20.1001.1.24763128.1398.8.2.1.4>
- Arian, M; Seghataleslam, M; Baradaran, R & Ebrahimi, M. (2025). Climate Change and Vegetation Cover in the Kahneh Watershed, Khorasan Razavi, Using Remote Sensing in the GEE Environment. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 3(11), 47-62. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8922.1118>
- Avand, M., Moradi, H.R. & Ramazanzadeh Lasbue, M. (2021). The Consequences of Following Two Different Land Use Change Scenarios in 2040 in the Tajan Watershed. *Watershed Management Research*, 34 (2). 91-107. <https://doi.org/10.22092/wmej.2020.341479.1303>
- Bararkhanpour Ahmadi, S., Nadi, M., Mazloom Babanari, S., & Jedariforoughi, A. (2024). Analyzing the effect of climate change on the trend of extreme temperatures along the coast of Mazandaran province based on CMIP6 models. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (4), 1-27. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.21185.3635>
- Behmanesh, B., E. Tabasi, A. Fakhireh & L. Khalasi Ahvazi. (2019). Modeling the distribution of medicinal plant species of *Thymus kotschyianus* and *Achillea millefolium* using ENFA and Logistic Regression. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 6 (13). 91-120. <https://doi.org/article-1-395-en>
- Bhandari, M.S., R. Shankhwar, R.K. Meena, R., Pandey, S., Kant, R., Barthwal, S., Ginwal, H.S. & Chauhan, J.S. (2021). Past and future distribution pattern of *Myrica esculenta* in response to climate change scenario. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7. 1831–1846. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00902-x>
- Bista, R., Chhetri, P.K., Johnson, J.S., Sinha, A. & Shrestha, K.B. (2021). Climate-driven differences in growth performance of cohabitant fir and birch in a subalpine forest in Dhorpatan, Nepal. *Forests*, 12(9). 1137. <https://doi.org/10.3390/f12091137>
- Braunisch, V., Coppes, J., Arlettaz, R., Suchant, R., Schmid, H., & Bollmann, K. (2013). Selecting from correlated climate variables: a major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecology*, 36. 971-83. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00138.x>
- Das, M., Jain, V. & Makhotra, S.K. (2016). Impact of climate change on medicinal and aromatic plants: Review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86(11). 1375-1382. <https://doi.org/10.56093/ijas.v86i11.62865>
- Descamps, C., Marée, S., Hugon, S., Quinet, M. & Jacquemart, A.L. (2020). Species-specific responses to combined water stress and increasing temperatures in two bee-pollinated congeners (*Echium*, Boraginaceae). *Ecology and Evolution*, 10. 6549-6561. <https://doi.org/10.1002/ece3.6389>
- Erfanian, M. B., Sagharyan, M., Memariani, F. & Ejtehadi, H. (2021). Predicting range shifts of three endangered endemic plants of the Khorassan-Kopet Dagh floristic province under global change. *Scientific Reports* 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88577-x>

Fakhri, M. (2024). Investigation of Iran's Temperature Changes Compared to the Past Long-Term Climatic Standard Period. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(3), 17-32. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062>

Farzadmehr, J. & Sangoony, H. (2020). The effect of climate change on the geographical distribution of wild borage in Khorasan Razavi. *Water and Soil Conservation*, 27(3), 145-162. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16868.3221>

Ghehsareh Ardestani, E., Yadegari, H., Asadi, E., & Bahmani, M. (2025a). The Impact of Climate Change on Suitable Habitats of *Dracocephalum kotschy* in Central Iran. *Advanced Environmental Sciences*, 23(2), 477-490. <https://doi.org/10.48308/envs.2024.1422>

Ghehsareh Ardestani, E., Tahmasebi, F., Asadi, E., Gharahi, N., & Bahmani, M. (2025b). Identifying potential priority habitats for the conservation of *Hypericum scabrum* under climate change. *Management of Natural Ecosystems*, 4(4), 60-71. <https://doi.org/10.22034/emj.2025.731847>

Ghehsareh Ardestani, E., & Heidari Ghahfarrokhi, Z. (2021). Ensemble species distribution modeling of *Salvia hydrangea* under future climate change scenarios in Central Zagros Mountains, Iran. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01488. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01488>

Gholami, A., Shahedi, K., Habibneghad, M., Vafakhah, M. & Solymani, K. (2017). Forecasting and comparison of future climate change using GCM models under different scenarios in the Talar watershed of Mazandaran Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(1), 181-196. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.61975>

Gilani, H., Arif Goheer, M., Ahmad, H. & Hussain, K. (2020). Under predicted climate change: Distribution and ecological niche modelling of six native tree species in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Ecological Indicators*, 111, 106049. <https://doi.org/j.ecolind.2019.106049>

Haghighi, P., Soleimanpour, S. M., & Moradi, A. (2025). The effects of climate change on precipitation and temperature using SSP scenarios (case study: Fars province). *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2), 199-218. <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14691.1425>

Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., & Jarvis, A. (2005). Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatol.* 25: 1965-78. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

Heydari, R., Khodahholi, M. & Zarean, M. (2015). Bioclimatic zoning of *Teucrium orientale* in Isfahan province using multivariable statistical methods and GIS (Geographical Information System). *Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 31(4), 637-650. <https://doi.org/ijmapr.2015.102681>

Jalali, A., Raesi Vanani, A., & Shirani, M. (2020). Ethnobotanical Approaches of Traditional Medicinal Plants Used in the Management of Asthma in Iran. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 15(1): e62269. <https://doi.org/10.5812/jjnpp.62269>

Khajoei Nasab, F., Nemati Parshokouh, A. & Mehrabian, A.R. (2022). Predicting the Effect of Climate Change on the Distribution of *Echium amoenum* and *Echium italicum* in Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 10 (4), 1-21. <https://doi.org/10.47176/ijae.10.4.12555>

Keikha, A., Khanlary, A., Keikha, A.A., & Sabouhi, M. (2021). The effect of climate change on land usage and agricultural sector performance in Mazandaran province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22 (10), 93-104. <https://doi.org/10.22034/jest.2019.7770.1642>

Khajoei Nasab, F., Mehrabian, A.R. & Mostafavi, H. (2020). Mapping the current and future distributions of *Onosma* species endemic to Iran. *Journal of Arid Land* 12: 1031-1045. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0080-Z>

Lal, M., Samant, S.S., Kumar, R., Sharma, L., Paul, S., Dutt, S., Negi, D. & Devi, K. (2020). Population ecology and niche modelling of endangered *Arnebia euchroma* in Himachal Pradesh, India: An approach for conservation. *Medicinal Plants-International Journal of Phytomedicines and Related Industries*, 12(1), 90-104, <https://doi.org/10.5958/0975-6892.2020.00013.1>

Maghmi Moghim, G., Hosseini, S., Asadi, S.M., Khani, R. & Tamlihi, S. (2019). Agro-climate zonation of saffron cultivation in North Khorasan province: An approach to changing the cultivation pattern. *Semi-Annually Geography and Development*, 17(56): 119-138. <https://doi.org/10.22111/gdij.2019.4899>

Mehrabian, A.R., Khajoei Nasab, F., & Amini Rad, M. (2021). Distribution patterns and priorities for conservation of Iranian Endemic Monocots: determining the Areas of Endemism (AOEs). *Journal of Wildlife and Biodiversity* 5(2): 69-87. <https://doi.org/10.22120/jwb.2020.136616.1188>

Mohapatra, J., Singh, C.P., Hamid, M., Verma, A., Semwal, S.C., Gajmer, B., Khuroo, A.A., Kumar, A., Nautiyal, M.C., Sharma, N. & Pandya, H.A. (2019). Modelling *Betula utilis* distribution in response to climate-warming scenarios in Hindu-Kush Himalaya using random forest. *Biodiversity and Conservation*, 28(8), 2295-2317, <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01731-w>

Naghypour Borj, A.S., Haidari Aghakhani, M. & Sangoony, H. (2019). Application of ensemble modelling method in predicting the effects of climate change on the distribution of *Fritillaria imperialis* L. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 32(3), 747-758, <https://doi.org/20.1001.1.23832592.1398.32.3.8.5>

- Nazari, S., Jafarian, Z., Alavi, J., & Naghipoor, A. (2021). The Impact of Climate Change on The Geographic Distribution of *Thymus Kotschyanus* (Boiss. and Hohen.) Using Ensemble Modelling. *Desert Management* 9(3): 1- 16. <https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.526831.1338>
- Parviz, L., Kazemi, B., & Hatef, M.A. (2024). Utilization of the Climate Indices and the Multi-Criteria Decision-Making Approach in Crop Yield Forecasting in line with Policy Making in Agriculture. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 49-66. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7942.1072>
- Pourmeidani, A., Tavakoli Neko, H. & Ghamghami, M. (2021). Zoning the plains of Salt Lake catchment for cultivation of four medicinal plant species based on climatic and hydrological indicators. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 3 (1). 162-177. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.128229.2659>
- Ramezani Etedali, E. & Koochi, S. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Aridity in Iran with a Population Exposure Approach. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3(9), 17-38. <https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.8258.1079>
- Rouse, J.J., Haas, R.H., Deering, D., Schell, J., & Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *NASA Special Publication 351*, 309.
- Soltani, M.; Bahmanabadi, B. & Kaviani, A. (2025). Investigating the Changes in the Major Cultivated Area of Qazvin Plain Using Multi-Temporal Satellite Images. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 3(11), 1-24. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8743.1106>
- Yosefi Kebriya, A., & Nadi, M. (2023). Checking the accuracy of GPM satellite rainfall estimation (case study of Mazandaran province). *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(3), 1-14. <https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6232.1022>
- Williams, J.E., & Blois, J.L. (2018). Range shifts in response to past and future climate change: Can climate velocities and species' dispersal capabilities explain variation in mammalian range shifts? *Journal of Biogeography*. 45(9). 2175-2189. <https://doi.org/10.1111/jbi.13395>