

Research Paper

The Effect of Climate Change and Future Land Use Using the CA-Markov Model on the Streamflow of the Talar River in Mazandaran Province

Hossein Ruigar¹ , Samad Emamgholizadeh², Saeid Gharechelou³ and Saeed Golian⁴

1- Ph.D. Student, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, (Corresponding Author: Hossein_ruigar@yahoo.com)

2- Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology

4- Associate Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 17 November, 2023

Accepted: 13 February, 2024

Extended Abstract

Background: In recent years, changes in climate and land use have led to fluctuations in water resources. These changes have affected the river flow, environment, and drinking and agricultural water. Land use change has four important effects on watersheds, namely changes in peak flow characteristics, changes in total runoff volume, changes in water quality, and changes in hydrological balance. To prevent natural disasters, it is important to identify the current conditions and predict the future situation. Overcoming these crises and reducing their adverse effects are only possible in the shadow of management, planning, and relying on practical knowledge. The present study aimed to determine the impact of climate change and land use on the river flow in the Talar basin between 2020 and 2050.

Methods: The effects of future land use, climate changes, and their combined effect in the Talar basin (Mazandaran province) have not been seriously investigated using the sixth climate change report. Therefore, this study analyzed data based on CMIP6 climate change scenarios and land use projections for 2035 and 2050. First, the SWAT model was used to evaluate the effects of climate and land use on the river flow in the Talar River basin. After calibration and validation of the model using the best parameters from 2001 to 2020, CMIP6 data were downscaled based on six models and projected under two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The scale of atmospheric general circulation models was reduced using two methods: the delta method and quantile mapping (Qm). These methods were chosen due to the large scale of the models. In this research, the Markov prediction model (CA-Markov) was used to simulate and predict land use changes for the years 2035 and 2050. Precipitation and temperature data obtained from climate change and land use scenarios were entered into the SWAT model to predict the average monthly flow during the years 2020-2035 and 2020-2050.

Results: Calibration and validation at the Kiakola station as the output of the Talar watershed showed that the Nash-Sutcliffe index (NSE) had efficiencies of 0.8 and 0.76, respectively. The best values of the validation indices were obtained by the INM model. The Delta method for downscaled precipitation data and the Qm method for downscaled minimum and maximum temperatures showed better evaluation values. For example, the presented tables show that the values of RMSE, NRMSE, and MAE for the rainfall of the Kiakola station are 2.185, 0.0402, and 1.716, respectively, using the Delta method. All these values show the good accuracy of these downscaling methods for SWAT model inputs to predict the streamflow in the Talar River basin. These methods were implemented for all the studied stations, and the downscaled values of the aforementioned parameters were used to predict the streamflow of the Talar River basin at the Kiakola station.

Conclusion: The predicted results for 2035 and 2050 show a decrease in the runoff volume, wetlands, and urban land. Therefore, land use activities in the future should be based on appropriate land use development and land use regulation to reduce the long-term adverse effects of land use changes.

In the Talar River basin, land use changes are mainly controlled by internal factors, such as agricultural land expansion and urbanization, while climate change is regarded as an external factor. Both have an important role in changing the hydrological processes of the basin. This study evaluates the combined effects of land use and future climate changes on the water balance in the



Talar River basin. The combination of land use change and climate change has a more obvious effect on surface runoff. On a monthly scale, runoff from surface runoff decreases significantly across seasons, indicating that more extreme events (i.e., droughts) could potentially occur in the future. With land use changes, these effects can only be reduced by less than 20%. Therefore, more measures (for example, soil conservation) are needed in addition to land use planning to increase infiltration and aquifer nutrition and, subsequently, reduce risks from land use and climate change impacts. This research presents the effects of changes in land use and climate on the available water in the Talar River basin in the future. Furthermore, this paper presents a study on the use of the SWAT model in hydrology to help the scientific field. The findings of this study can also be useful for officials in reducing water stress through proper management of land use in the future. The results indicate that the average monthly streamflow of the Talar River basin has decreased due to land use changes, such as the expansion of urban areas and the reduction of agricultural land. In the future, changes in land use and land cover (LULC) may affect streamflow. The main drivers of LULC changes include agricultural development, deforestation, urban planning, land tenure policy, and organization development.

Keywords: CMIP6 Model, Downscaling, Scenario, Streamflow, SWAT Model, Watershed

How to Cite This Article: Ruigar, H., Emamgholizadeh, S., Gharechelou, S., & Golian, S. (2024). The Effect of Climate Change and Future Land Use Using the CA-Markov Model on the Streamflow of the Talar River in Mazandaran Province. *J Watershed Manage Res*, 15(2), 89-104. DOI: [10.61186/jwmr.15.2.89](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.89)



مقاله پژوهشی

تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی آینده با مدل CA-Markov بر جریان رودخانه تالار مازندران

حسین رویگر^۱، صمد امامقلی زاده^۲، سعید قره‌چلو^۳ و سعید گلپان^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، (نویسنده مسوول: Hossein_ruigar@yahoo.com)

۲- استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۶

صفحه: ۸۹ تا ۱۰۴

چکیده مسوط

مقدمه و هدف: در چند سال اخیر، تغییرات اقلیم و کاربری اراضی منجر به نوسانات منابع آب شده است. این تغییرات بر جریان رودخانه، محیط‌زیست، آب آشامیدنی و کشاورزی تأثیر گذاشته است. تغییر کاربری اراضی چهار اثر مهم روی هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز دارد که عبارت‌اند از: تغییر در خصوصیات دبی اوج، تغییر در حجم کل رواناب، تغییر در کیفیت آب و تغییر در تعادل هیدرولوژیک. به‌منظور پیش‌گیری از بلایای طبیعی، شناسایی شرایط فعلی و پیش‌بینی وضعیت آینده مهم است. فائق آمدن بر این بحران‌ها و کاهش اثرات سوء آن‌ها، تنها در سایه مدیریت و برنامه‌ریزی و با تکیه به دانش روز عملی می‌باشد. مطالعه حاضر با هدف تعیین چگونگی تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر جریان رودخانه در حوضه تالار مازندران در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ انجام شد.

مواد و روش‌ها: با توجه به اینکه اثر تغییرات کاربری آینده در حوضه آبریز تالار مازندران با استفاده از گزارش ششم تغییر اقلیم و اثر تلفیقی تغییرات کاربری و تغییر اقلیم در این حوضه مورد بررسی جدی قرار نگرفته است، در این مطالعه اثر تغییر کاربری اراضی (با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مدل CA-Markov) و تغییر اقلیم (خروجی‌های دما و بارش چند مدل گزارش ششم تغییر اقلیم و ریزمقیاس نمایی آن‌ها با روش‌های نوین Qm و delta بر میزان آبدی رودخانه تالار (با استفاده از مدل SWAT) در سال‌های آینده تا سال ۲۰۵۰ مورد مطالعه قرار گرفت.

این مطالعه داده‌ها را بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم CMIP6 و همچنین پیش‌بینی‌های کاربری زمین برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ تجزیه و تحلیل کرد. ابتدا، مدل (SWAT) برای ارزیابی اثرات اقلیم و کاربری اراضی بر جریان رودخانه در حوضه رودخانه تالار استفاده شد. پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل با استفاده از بهترین پارامترها از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰، داده‌های CMIP6 بر اساس شش مدل کوچک‌سازی شدند و تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شدند. برای کاهش مقیاس مدل‌های گردش عمومی اتمسفر، در دو روش استفاده شد: روش دلتا (Delta) و نقشه‌برداری کوانتیل (Qm). این روش‌ها به دلیل مقیاس بزرگ مدل‌ها انتخاب شدند. همچنین در این تحقیق از مدل پیش‌بینی مارکوف (CA-Markov) برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییر کاربری زمین برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ استفاده شد. داده‌های بارش و دما حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم و کاربری اراضی برای پیش‌بینی میانگین جریان ماهانه طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۳۵ و ۲۰۲۰-۲۰۵۰ به مدل SWAT وارد شد.

یافته‌ها: کالیبراسیون و اعتبارسنجی در ایستگاه کیاکلا به‌عنوان خروجی حوضه آبریز تالار نشان داد که شاخص Nash-Sutcliffe (NSE) به‌ترتیب دارای بازده ۰/۸ و ۰/۷۶ است. بهترین مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای ریزمقیاس نمایی مدل INM به‌دست آمد. همچنین روش Delta برای ریزمقیاس نمایی بارش و روش Qm برای ریزمقیاس نمایی دمای حداقل و حداکثر مقادیر ارزیابی بهتری را نشان می‌دهند. به‌طور مثال مطابق جداول نشان داده شده مقادیر RMSE، NRMSE و MAE برای بارش ایستگاه کیاکلا به‌ترتیب ۲/۱۸۵، ۰/۰۴۰۲ و ۱/۷۱۶ با استفاده از روش Delta می‌باشد، تمامی این مقادیر نشان دهنده دقت خوب این روش‌های ریزمقیاس نمایی برای ورودی‌های مدل SWAT برای پیش‌بینی جریان در حوضه آبریز تالار می‌باشد. این روش‌ها برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه پیاده شده و مقادیر ریزمقیاس نمایی شده پارامترهای فوق‌الذکر برای پیش‌بینی جریان رودخانه حوضه تالار در ایستگاه کیاکلا استفاده شد.

نتیجه‌گیری: نتایج پیش‌بینی‌شده سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ نشان‌دهنده کاهش حجم رواناب، تالاب‌ها و زمین‌های شهری است. بنابراین، فعالیت‌های کاربری اراضی در آینده باید مبتنی بر توسعه کاربری مناسب و تنظیم کاربری باشد تا اثرات نامطلوب پایدار تغییرات کاربری اراضی را کاهش دهد. در حوضه تالار، تغییرات کاربری اراضی عمدتاً توسط عوامل داخلی، مانند گسترش اراضی کشاورزی و شهرنشینی کنترل می‌شود، در حالی که تغییرات اقلیمی به‌عنوان عوامل بیرونی در نظر گرفته می‌شود. هر دو نقش مهمی در تغییر فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه دارند. این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی، اثرات ترکیبی کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی آینده را بر بیلان آب در حوضه تالار ارزیابی می‌کند. ترکیب تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی تأثیر بارزتری بر جریان و رواناب سطحی دارد. در مقیاس ماهانه، جریان ناشی از رواناب سطحی به‌طور قابل‌توجهی در طول فصول سال کاهش می‌یابد، که نشان می‌دهد رویدادهای شدیدتر (یعنی خشک‌سالی) به‌طور بالقوه می‌تواند در آینده رخ دهد. با تغییرات کاربری اراضی، این اثرات را می‌توان تنها کمتر از ۲۰٪ کاهش داد. بنابراین، اقدامات بیشتری (به‌عنوان مثال، حفاظت از خاک) علاوه بر برنامه ریزی کاربری اراضی به‌منظور افزایش نفوذ و تعدیه آبخوان و متعاقباً کاهش خطرات ناشی از استفاده از اراضی و اثرات تغییرات اقلیمی مورد نیاز است. این تحقیق چگونگی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و آب و هوا را بر آب در دسترس در حوضه تالار در آینده ارائه می‌دهد. همچنین این مقاله مطالعه‌ای را در مورد استفاده از مدل SWAT در هیدرولوژی برای کمک به حوزه علمی ارائه می‌دهد. یافته‌های این مطالعه همچنین می‌تواند برای مسئولان در کاهش تنش آبی از طریق مدیریت صحیح کاربری اراضی در آینده مفید باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که به‌دلیل تغییرات کاربری اراضی مانند گسترش مناطق شهری و کاهش زمین کشاورزی، میانگین جریان ماهانه کاهش یافته است. در آینده، تغییرات کاربری زمین و پوشش زمین ممکن است بر جریان رودخانه تأثیر بگذارد. محرک‌های اصلی تغییر کاربری شامل توسعه کشاورزی، جنگل‌زدایی، گسترش شهرسازی، سیاست مالکیت زمین و توسعه زیرساخت‌ها است.

واژه‌های کلیدی: جریان رودخانه، حوضه آبریز، ریزمقیاس نمایی سناریو، مدل CMIP6، مدل SWAT

مقدمه

جنگل‌ها و تغییر کاربری اراضی از سوی دیگر باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است (Solomon, 2007). یکی از مهم‌ترین مسائلی که طی دهه‌های اخیر در بخش کشاورزی

رشد صنایع و کارخانه‌ها از آغاز انقلاب صنعتی و به‌تبع آن افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی از یک‌سو و تخریب

مدل‌ها و آنالیز حالت‌های مختلف، ابزاری قوی برای شناخت الگوی کاربری اراضی و مکانیسم‌های پیچیده آن است. بعضی از مدل‌های شبیه‌سازی پویایی ممکن است به تصمیم‌گیری در مورد شبیه‌سازی حالت‌های ممکن آینده کمک کند. از جمله این مدل‌ها CA-Markov است (Samie et al., 2017). برای پیش‌بینی موقعیت کاربری‌ها در زمان $t+1$ ، فن سلول‌های خودکار به‌همراه مدل مارکوف به‌کار گرفته می‌شود. مدل CA مارکوف مؤلفه‌های مجاورت مکانی و دانش کاربر را به توزیع مکانی احتمال تبدیل کاربری‌ها به مدل زنجیره‌ی مارکوف اضافه می‌کند (Nouri et al., 2014). در مدل CA مارکوف وضعیت هر سلول به وضعیت مکانی و زمانی سلول‌های مجاور بستگی دارد (Reddy et al., 2017). مدل CA مارکوف با در نظر گرفتن روند تغییر کاربری زمین و حالت ممکن در نظر، در پیش‌بینی مکانی-زمانی بسیار مفید است (Mujiono et al., 2017). به‌طور کلی توانایی مدل‌سازی و شبیه‌سازی حالت‌های ممکن مختلف با مدل‌های کارآمد در تحلیل‌های مکانی و به‌کار بردن روش‌های نوین در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، امکان بررسی و پیش‌بینی تغییر مکانی-زمانی کاربری زمین را می‌دهد (Surabuddin Mondal et al., 2019).

فقدان آمار و اطلاعات یا کافی نبودن آمار درست و مناسب سبب شده است تا بررسی و شناخت رفتار متغیرهای هیدرولوژیکی و خصوصیات حوزه‌های آبخیز با دقت قابل‌قبولی صورت نگیرد. بر همین اساس، مدل‌های هیدرولوژیکی ابزار مناسبی برای ارزیابی وضعیت کنونی منابع آبی و پیش‌بینی شرایط آبی با آگاهی و درک از اندرکنش‌ها و تعاملات حاکم در سطح حوزه‌های آبخیز می‌باشند (Kiyani Majd et al., 2023). در این تحقیق از مدل هیدرولوژیکی ابزار ارزیابی آب‌و‌خاک (SWAT)¹ و همچنین مدل CA-Markov در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)² استفاده شد. مدل SWAT امروزه به‌طور مکرر مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا این مدل، یک مدل در مقیاس حوضه رودخانه است که قادر به شبیه‌سازی اثرات شیوه‌های مدیریت زمین در حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده است، از جمله اثراتی که در واحدهای مدل‌سازی کوچک‌تر به‌نام واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs)³ رخ می‌دهد. SWAT توسط بسیاری از مطالعات به‌عنوان یک مدل محاسباتی بسیار کارآمد برای پیش‌بینی اثرات کاربری زمین و تغییرات آب‌وهوایی بر جریان رودخانه نامیده شده است (Neitsch et al., 2011). مطالعات متعددی اثربخشی مدل SWAT را در حین ارزیابی جهانی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مناطق مختلف ارزیابی کرده‌اند (Shang et al., 2014; Khan et al., 2019). با نگاهی به تحقیقات گذشته، بسیاری از محققان تأثیرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری زمین را بر دسترسی به آب مورد مطالعه قرار داده‌اند (El-Khoury et al., 2015; Zhang et al., 2017; Tan et al., 2015). و برخی از مطالعات روی اثرات تغییر آب‌وهوا (Apurv et al., 2015; Ivancic & Shaw, 2017; Leng et al., 2015; Wu et al., 2017) یا تغییر کاربری زمین (Jia & Wan, 2012) متمرکز شده‌اند (Miller & Hess, 2017; Schilling et al., 2014). زو و همکاران (Xu et al., 2019) عدم قطعیت موجود در رواناب پیش‌بینی‌شده آینده را ناشی از تغییرات آب‌وهوا و

نمود یافته و تولید محصولات زراعی را با محدودیت مواجه ساخته است، تغییرات اقلیم است. همچنین یکی از موضوعات مهم در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی در منابع آب است (Liu et al., 2005). تغییرات کاربری اراضی یکی از عوامل مهم در تغییر وضعیت هیدرولوژیکی آبخیز و فرسایش خاک بوده و نوع کاربری-ارضی از عوامل مهم و تعیین‌کننده در تولید رواناب سطحی است (Jafari Gorzin et al., 2023). اراضی شهری، بالاترین حجم رواناب و دبی اوج و کم‌ترین زمان تمرکز را در مقایسه با اراضی جنگلی دارد. افزایش رواناب در مناطق شهری در نتیجه تغییر کاربری و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ است که موجب جلوگیری از نفوذ آب به داخل خاک و در نتیجه ایجاد رواناب می‌شود (Olivera & Maidment, 1999). تغییر کاربری اراضی چهار اثر مهم روی هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز دارد که عبارتند از: تغییر در خصوصیات دبی اوج، تغییر در حجم کل رواناب، تغییر در کیفیت آب و تغییر در تعادل هیدرولوژیکی. همچنین واکنش هیدرولوژیکی یک حوزه آبخیز، نماد جامعی از شرایط و خصوصیات محیط طبیعی آن حوضه می‌باشد. به‌منظور پیش‌گیری از بلایای طبیعی، شناسایی شرایط فعلی و پیش‌بینی وضعیت آینده مهم است. فائق آمدن بر این بحران‌ها و کاهش اثرات سوء آن‌ها، تنها در سایه مدیریت و برنامه‌ریزی و با تکیه به دانش روز عملی می‌باشد. تاکنون در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است که در این مطالعات تأثیر هم‌زمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی پرداختند. فعالیت‌های انسانی از آغاز انقلاب صنعتی در قرن نوزدهم غلظت دی‌اکسید کربن (CO_2) در جو را تا حدود ۵۰ درصد افزایش داده است. افزایش میانگین دمای جهانی آشکارترین پیامد افزایش CO_2 در سطح جهانی است (Alexander et al., 2013). با این حال، افزایش دما پیامدهایی برای الگوی بارش به‌همراه دارد. دمای گرم‌تر نقطه اشباع بخار آب و ظرفیت نگهداری آب را در جو افزایش داده است (Dannenberg et al., 2019).

هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) در ششمین گزارش ارزیابی خود (AR6) افزایش میانگین دمای جهانی مشاهده شده را ۱/۰۹ درجه سلسیوس در سال ۲۰۱۱ - ۲۰۲۰ نسبت به آغاز انقلاب صنعتی (۱۸۵۰ - ۱۹۰۰) را برآورد کرده است (Masson-Delmotte et al., 2021). برای به تصویر کشیدن تغییرات عوامل اقلیمی و به‌خصوص متغیرهای بارشی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) یک ابزار علمی دقیق و در دسترس در سطح جهانی هستند. مدل‌های گردش کلی جو نمایش جامع و فزاینده‌ای از سامانه اقلیم ارائه می‌کنند. آخرین نسخه این مدل‌ها هم‌اکنون تحت عنوان پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) با طیف گوناگونی در دسترس هستند. در گزارش پنجم تغییر اقلیم سناریوهای RCP (Representative Concentration Pathways) به چهار سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 تقسیم می‌شدند و در AR6 با توجه به تجربیات به‌دست‌آمده پنج سناریوی (Shared Socio-economic Pathways (SSPs): SSP1-1.9، SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7 و SSP5-8.5 مورد استفاده قرار گرفته است.

صنعتی مواجه شده است. تجزیه و تحلیل تغییرات کاربری اراضی و تغییر اقلیم در حوزه آبخیز تالار، محرک‌های آن و پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین در آینده برای درک پویایی تعاملات محیطی انسانی و مداخلات مدیریت زیست‌محیطی حیاتی است.

با توجه به اینکه اثر تغییرات کاربری آینده در حوضه آبریز تالار مازندران با استفاده از گزارش ششم تغییر اقلیم و اثر تلفیقی تغییرات کاربری و تغییر اقلیم در این حوضه مورد بررسی جدی قرار نگرفته است، در این مطالعه اثر تغییر کاربری اراضی (با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مدل CA-Markov) و تغییر اقلیم (خروجی‌های دما و بارش چند مدل گزارش ششم تغییر اقلیم و ریزمقیاس نمایی آن‌ها با روش‌های نوین Δ ، و Q_m بر میزان آبدهی رودخانه تالار (با استفاده از مدل SWAT) در سال‌های آینده تا سال ۲۰۵۰ مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌های مطالعه برای ارائه شواهد تجربی در مورد الگوها و نرخ‌ها و شناسایی عوامل اصلی تغییرات کاربری اراضی و آب‌وهوا در سطح حوضه آبریز و بهبود سیاست‌های کاربری اراضی در چارچوب برنامه‌ریزی کاربری پایدار در رابطه با تغییرات یا توسعه آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

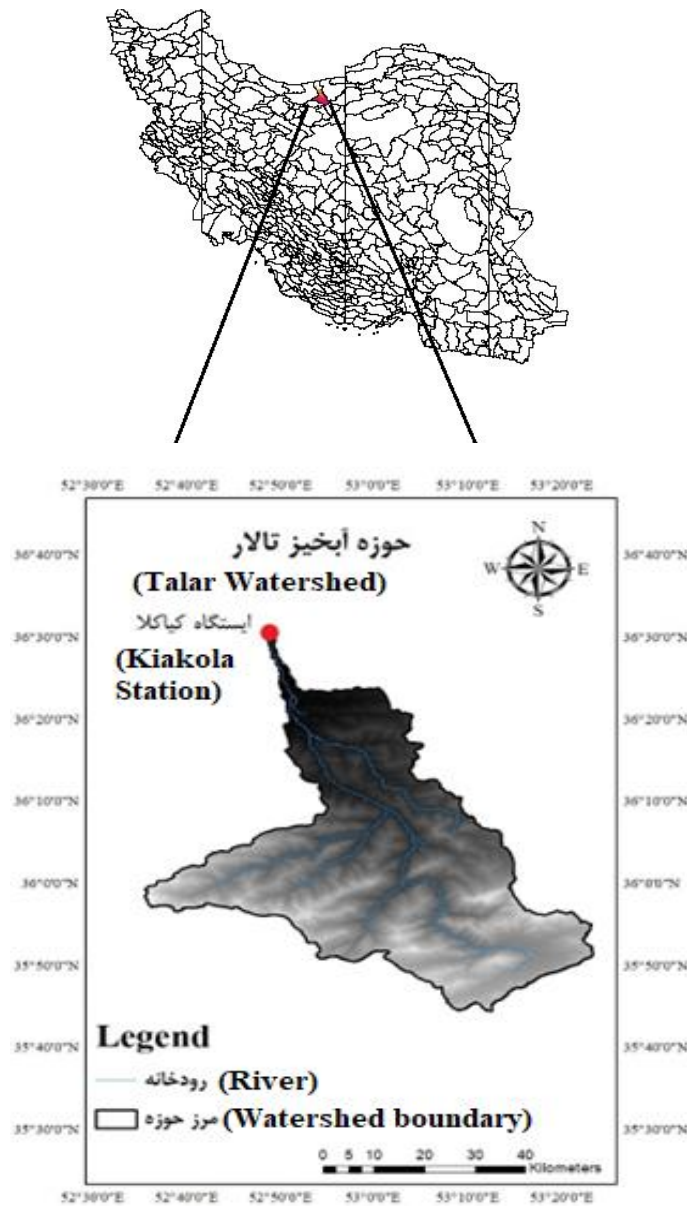
مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تالار-کیاکالا یکی از حوزه‌های آبخیز کوهستانی شمال ایران با مساحت ۲۲۵۸۰۰ هکتار واقع در البرز مرکزی و در دو طرف جاده آسفالتی فیروزکوه تهران- قائم‌شهر واقع شده است. این حوضه آبخیز در سیستم مختصات جغرافیایی UTMWGS1984 در زون ۳۹ و حد واسط ۵۲ درجه ۳۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه الی ۵۳ درجه ۲۳ دقیقه و ۲۴ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه ۲۴ دقیقه و ۳۶ ثانیه و ۳۶ درجه ۱۹ دقیقه و ۱ ثانیه عرض شمالی واقع شده و توسط یک رودخانه به نام تالار که امتداد اصلی جنوب به شمال است، زهکش می‌شود و از سرشاخه‌های مهم آن می‌توان به رودخانه‌های سرخ‌آباد، شوراب، کبیر، بزلا، چرات، پالندردبار و شش رودبار اشاره کرد. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد.

روش‌های پابین آمدن در حوضه رودخانه بیلو (استان لیاونینگ، شمال شرقی چین) ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT، دو روش ریزمقیاس نمایی آماری، چهار مدل گزارش پنجم تغییر اقلیم و دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای ساخت ۲۲ سناریو برای تخمین رواناب استفاده کردند. نتایج نشان داد که دمای آینده در RCP8.5 بیشتر از RCP4.5 افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان بارش‌های بعدی آینده ۱۶ سناریو افزایش می‌یابد. رواناب آینده در ۱۳ تا از ۲۲ سناریو کاهش یافت. کائو و همکاران (Cao et al., 2023) به بررسی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری بر جریان رودخانه در جزیره گرمسیری هاینان، چین پرداختند. در این تحقیق از مدل‌های گزارش تغییر اقلیم ششم و مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی جریان با مدل SWAT استفاده شد.

نتایج نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تغییرات اقلیم نسبت به تغییر کاربری زمین در حوضه آبریز مطالعه شده، با سهم ۹۷/۵۷٪ و ۲/۴۳٪ بوده است. چنگی‌زاده و همکاران (Chegnizadeh, 2023) به بررسی اثر تغییرات میان‌مدت در اقلیم و کاربری اراضی بر میزان کاهش جریان در حوضه آبریز کرخه با استفاده از مدل SWAT و مدل‌های تغییر اقلیم RCP پرداختند. نتایج بررسی هم‌زمان تغییرات در اقلیم و کاربری اراضی بر روی میزان متوسط جریان نشان‌دهنده بیشترین میزان تغییر در سناریو RCP8.5 بود.

به‌طور کلی مطالعات محققین قبلی در موضوع تغییرات را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد: مطالعات تغییرات کاربری اراضی، مطالعات تغییر اقلیم، اثر تغییر کاربری بر رواناب، اثر تغییر اقلیم بر رواناب و درنهایت اثر هم‌زمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری بر رواناب. به‌دلیل تغییرات کاربری اراضی، مازندران با مشکلات زیست‌محیطی جدی از جمله فرسایش خاک، تخریب زمین، از دست دادن حاصلخیزی خاک و جنگل‌زدایی مواجه شده است. «حوضه رودخانه تالار» متنوع‌ترین و مهم‌ترین حوضه از لحاظ پوشش گیاهی و دارای یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های مازندران است. حوضه تالار با تغییرات زمین و آب‌وهوا ناشی از رشد جمعیت، شهرنشینی، گسترش زمین‌های کشاورزی، جنگل‌زدایی، چرای بیش‌ازحد، گسترش فعالیت‌های



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه تالار
Figure 1. The studied area in Talar Basin

داده‌های مورد استفاده

مجموعه داده‌های ورودی عمدتاً شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM¹)، شبکه جریان (اختیاری)، نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه بافت خاک، داده‌های آب و هواشناسی و پارامترهای برداشت آب نقطه‌ای و داده‌های خروجی بود. جزئیات مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه به شرح زیر است: (۱) داده‌های DEM: از مجموعه داده‌های ALOS PALSAR (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>) استخراج شد و سپس به داده‌هایی با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر × ۱ کیلومتر به‌عنوان ورودی اولیه به مدل استفاده شد.

شکل (۱) موقعیت تالار را نشان می‌دهد که با دامنه‌های با شیب ملایم آن (کمتر از ۱۲٪) عمدتاً بین دشت‌های ارتفاعات جنوب شرقی و زمین‌های نزدیک به خروجی حوضه پراکنده شده است. نواحی شیب‌دار (بیش از ۶۰ درصد شیب) ۱۴/۲ درصد از کل قلمرو را به خود اختصاص داده است. باقی‌مانده اراضی حوضه نیز شیب بیش از ۳۰٪ دارند. میانگین دبی ایستگاه شیرگاه واقع در ۵۲ درجه و ۵۳ دقیقه در طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه در عرض شمالی ۷/۹۵ مترمکعب بر ثانیه و بیشترین دبی ۹۳/۴۶ مترمکعب بر ثانیه (۱۹۷۱-۱۹۹۸) بوده است. مهم‌ترین کاربری‌های منطقه مورد مطالعه، جنگل، دیم، اراضی آبی، مراتع و مناطق مسکونی است (Kavian *et al.*, 2018).

پوشش‌ها، مدیریت و خصوصیات خاک است. مدل SWAT از روش عدد منحنی اصلاح‌شده یا روش نفوذ گرین-آمپت برای محاسبه رواناب اعمال می‌کند. در این مطالعه، کل منطقه مورد مطالعه بر اساس رودخانه اصلی و داده‌های DEM به ۱۷ زیر حوضه تقسیم شد. حوضه‌ها با شیب (محاسبه‌شده از DEM)، کاربری زمین و لایه‌های خاک به HRUهایی با ویژگی‌های همگن تقسیم شدند. در نهایت، اطلاعات مربوط به DEM، کاربری زمین و خاک در پارامترهای مدل SWAT نوشته شد. در فرآیندهای ترسیم و تقسیم حوضه، حجم رواناب سطحی برای هر واحد هیدرولوژیکی محاسبه می‌شود. در این تحقیق به منظور کالیبراسیون و همچنین صحت‌سنجی نتایج مدل SWAT از برنامه SWAT-CUP استفاده شد (Abbaspour, 2007; Arnold et al., 2012). در این برنامه از الگوریتم SUFI-2، برای تشخیص عدم قطعیت پارامترها برای همه منابع عدم قطعیت (مانند بارش)، مدل‌های مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. بعد از انجام آنالیز حساسیت با استفاده از مقادیر p -value و t -state پارامترهای با حساسیت بالا استخراج می‌شود و ادامه کالیبراسیون با این پارامترها انجام می‌شود. برای تعیین میزان دقت مدل‌های شبیه‌سازی آبدی باید از معیار مناسبی استفاده گردد.

توسط این معیار کارایی مدل در حین آموزش نشان داده می‌شود. در این روش طراحی و آموزش مدل بر مبنای کاهش خطای مدل است. بدین شکل که مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل با مقادیر ثبت‌شده جریان حوضه آبریز مطالعاتی با توابع هدف مقایسه گردید. توابع هدف مورد استفاده برای بهینه‌سازی نمونه‌ها عبارت‌اند از: R^2 (ضریب تعیین) و (NS) ضریب ناش-ساتکلیف (Nash & Sutcliffe, 1970) که روابط آن‌ها به صورت زیر هست:

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q})^2} \right) \quad (1)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_o)^2}{n}} \quad (3)$$

که در آن مقدار Q_o جریان مشاهداتی است، Q_s مقدار شبیه‌سازی‌شده است و \bar{Q}_o و \bar{Q}_s به ترتیب میانگین مقادیر جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است. برای واسنجی پارامترهای مدل SWAT از روش برازش عدم قطعیت متوالی (SUFI-2) استفاده شد (Abbaspour, 2007). روش SUFI-2 بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت را برای اتخاذ یک روش جستجوی عمومی ترکیب می‌کند. از طریق نمونه‌برداری هایپرکعب لاتین، این روش می‌تواند با پارامترهای متعددی مقابله کند. در این مقاله، کارایی نش-ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R^2)، برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. برای ارزیابی مدل، مجموعه داده دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱ به دوره کالیبراسیون (۲۰۰۱-۲۰۱۲) و دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۳-۲۰۲۰) تقسیم شد. همچنین دوره گرم

(۲) داده‌های شبکه جریان: در این مطالعه، ارتفاع ۱۲/۵ متری، شیب و DEM با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر حاصل از داده‌های ALOS PALSAR به‌عنوان متغیرهای کمکی برای طبقه‌بندی برای بهبود بخش‌بندی هیدروگرافی و تعیین مرز زیر حوضه استفاده شد.

(۳) داده‌های کاربری اراضی: در این پژوهش به منظور ارزیابی تغییرات رخ داده در منطقه، از نقشه‌های کاربری بر اساس داده‌های رقومی ماهواره‌ای سری لندست ۵ (سال ۲۰۰۱) و لندست ۸ (۲۰۱۹) در سامانه ارث انجین استفاده شده است که از مزایای این تصاویر عدم نیاز به پیش‌پردازش و تصحیح اولیه هندسی، رادیو متریکی و ... است.

همچنین برای طبقه‌بندی داده‌های کاربری اراضی ماهواره لندست از محصول کاربری اراضی ماهواره مادیس با دقت ۵۰۰ متری که شامل ۱۵ کلاس کاربری است، استفاده شد.

(۴) داده‌های بافت خاک: نقشه خاک و ویژگی‌های خاک، با وضوح مکانی $1\text{km} \times 1\text{km}$ ، از پایگاه داده‌های جهانی خاک (موجود در <http://westdc.westgis.ac.cn>) به‌دست آمد.

(۵) داده‌های هواشناسی مدل شامل (بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد، نقطه شبنم و تابش خورشیدی) است که در این تحقیق از داده‌های ایستگاه سینوپتیک قراخیل و همچنین داده‌های بارش روزانه ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی و دمای حداقل و حداکثر ۳ ایستگاه کلیماتولوژی بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است (جدول ۲).

(۶) داده‌های روزانه بارش و دمای حداقل و حداکثر دوره زمانی بین سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 توسط مدل‌های مختلف گزارش ششم تغییر اقلیم به داده‌های روزانه بارش و دمای حداقل و حداکثر دوره زمانی بین سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 توسط مدل‌های مختلف گزارش ششم تغییر اقلیم به‌دست آمده است (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>).

مدل‌سازی هیدرولوژیکی

مدل‌های زیادی برای ارزیابی هیدرولوژی حوضه وجود دارند که توسط مدیران منابع آب، تصمیم‌گیرنده‌ها و محققین به کار می‌روند. این مدل‌ها کمک بزرگی در تخمین تأثیر بر رواناب از یک برنامه توسعه خاص ایجاد می‌کنند. مدل‌های پیوسته جریان می‌توانند درک بهتری از پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبریز در اثر تغییر اقلیم و تغییر پوشش گیاهی ناشی از آن ایجاد کنند (Meaurio et al., 2015). مدل SWAT جهت شبیه‌سازی اثرات فعالیت‌های مدیریتی اراضی بر آب، ایجاد رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در مقیاس حوضه آبریز با تنوع خاک، پوشش اراضی و شرایط مدیریتی در بازه زمانی طولانی توسعه‌یافته است. این مدل یک مدل فیزیکی-توزیعی است و به‌جای آنکه از معادلات رگرسیونی جهت توصیف رابطه برای متغیرهای ورودی و خروجی استفاده نماید، اطلاعات ویژه‌ای راجع به هوا، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و پوشش اراضی در حوضه آبریز دریافت می‌کند (Pignotti et al., 2017). در مدل SWAT زیر حوضه‌ها به بخش‌های پاسخ‌های هیدرولوژیکی (HRUs)² تقسیم می‌شوند که بخش‌هایی از زیر حوضه‌ها برای

کردن (Warm-up) از ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ برای دستیابی به یک حالت ثابت برای مدل‌سازی انتخاب شد. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های تغییر اقلیم در این تحقیق از ۶ مدل GCM از گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش و دما استفاده شد که فهرست مدل‌های استفاده‌شده در جدول (۱) آورده شده است. در این تحقیق از دو سناریو SSP2-4.5 به‌عنوان سناریوی متوسط و SSP5-8.5 به‌عنوان سناریوی بدبینانه استفاده‌شده است که این سناریوها براساس شهرنشینی، رقابت منطقه‌ای و سناریوهای توسعه اجتماعی-اقتصادی با سوخت فسیلی طبقه‌بندی می‌شوند (Meinshausen et al., 2020).

جدول ۱- مدل‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی تغییر اقلیم

Table 1. The models used to predict climate change

درجه تفکیک Degree of separation	مدل model
KM (100)	BCC-CSM2-MR
KM (100)	CMCC-ESM2
KM (100)	FIO-ESM-2-0
KM (100)	GFGL-CM4
KM (100)	INM-CM4-8-0
KM (100)	MPI-ESM1-2-HR

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و کلیماتولوژی

Table 2. The Rain gauge and Climatology Stations

ایستگاه باران‌سنجی (Rain gauge station)			
ارتفاع (Elevation)	عرض جغرافیایی (Latitude)	طول جغرافیایی (Longitude)	نام ایستگاه (Station Name)
682	53.06	36.1	پل سفید (Polsefid)
1225	52.9	36.02	پالاند (Paland)
955	53.2	36.07	درزیکولا (Darzikola)
1337	53.23	36.06	سنگده (Sangedeh)
1250	53.19	36.09	سودکولا (Sudkola)
259	52.89	36.3	شیرگاه (Shirgah)
4	52.81	36.56	کیاکولا (Kiakola)
1500	53.22	36.09	ولیک چال (Valikchal)
80	52.93	36.43	گل افشان (Golafshan)
1557	53.16	36.07	کاله (Kaleh)
ایستگاه کلیماتولوژی (Climatology Station)			
14.7	52.77	36.45	قراخیل (Gherakheyl)
1805	52.84	36.07	آلاشت (Alasht)
610	53.08	36.13	پل سفید (Polsefid)
ایستگاه هواشناسی (Synoptic Station)			
15	52.77	36.45	قراخیل (Gherakheyl)

که در آن $F_m(x^m)$ ، F_m^{-1} و $F_m(x^m)$ شکل معکوس CDF، است که از نظر فنی به‌عنوان تابع چنک نامیده می‌شود.

روش ریزمقیاس‌نمایی دلتا:

"روش دلتا" از نظر مفهومی بسیار ساده است و به‌طور گسترده در مطالعات برنامه‌ریزی آب استفاده می‌شود. برای محاسبه عامل تغییر یا دلتای بارش برای هر یک از ماه‌های سال، میانگین بارش هر یک از ماه‌های آینده به میانگین بارش تاریخی در ماه مشابه در اقلیم حاضر تقسیم می‌شود که در این صورت ۱۲ عامل تغییر یا دلتا برای شبکه‌ای که ایستگاه مورد مطالعه در آن واقع است به‌دست می‌آید. در این صورت برای به‌دست آوردن بارندگی در هر یک از سناریوهای اقلیمی از رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$P_{new} = P_{obs} \times P_{fact} \quad (6)$$

که در آن P_{fact} نسبت میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده CGM از دوره زمانی آینده نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۲۰۰۱)، به‌طور میانگین در منطقه جغرافیایی مورد علاقه است.

روش (Quantile mapping) QM

به‌طور کلی، در روش‌های QM، تغییرات آماری برای پس پردازش خروجی‌های مدل‌سازی اقلیمی اجرا می‌شود. تبدیل‌های آماری شامل تبدیل توابع توزیع متغیرهای مدل‌سازی شده به توابع مشاهده‌شده با استفاده از یک تابع ریاضی است که می‌تواند به‌صورت ریاضی به‌صورت (Piani et al., 2010) بیان شود:

$$X^o = f(x^m) \quad (4)$$

که در آن x^o متغیر مشاهده‌شده و $f(x^m)$ تابع تبدیل متغیر مدل شده است.

با توجه به اینکه روش‌های Qm از رابطه چنک-چنک برای همگرایی تابع توزیع متغیرهای شبیه‌سازی‌شده به تابع مشاهده‌شده استفاده می‌کنند، باید توجه داشت که با CDFهای سری زمانی متغیرهای مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، رابطه چنک به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (Ringard et al., 2017):

$$X^o = F_o^{-1}[F_m(x^m)] \quad (5)$$

انجام این روش با استفاده از نرم‌افزار Terset ابتدا نقشه‌های کاربری اراضی برای حوضه مورد مطالعه تهیه شد. سرانجام، براساس عوامل دخیل در تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه ورودی‌های مدل سلول‌های خودکار (مانند شیب، طبقات ارتفاعی و ...) انتخاب می‌شود. پیش‌بینی صورت گرفته تابعی از ورودی‌های مدل هست.

نتایج و بحث

کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل:

مدل SWAT با روش SUFI-2 کالیبره شد. پارامترهای کالیبره شده، بهترین جریان شبیه‌سازی شده و عملکرد مدل SWAT به ترتیب در جدول ۳ و ۴، شکل ۳ و جدول ۵ ارائه شده است.

برای پیش‌بینی مدل، می‌توان دریافت که 95PPU، یعنی عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد، به ترتیب شامل ۹۳ درصد و ۸۰ درصد مشاهدات در طول دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی است. برای شبیه‌سازی جریان ماهانه، اگر $0.7 > NSE$ باشد عملکرد مدل را می‌توان رضایت‌بخش تشخیص داد (Moriasi et al., 2015). براساس 95PPU و مقادیر معیار بهترین شبیه‌سازی، مدل SWAT توانسته است به‌طور رضایت‌بخشی جریان ماهانه رودخانه تالار را شبیه‌سازی کند.

همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۵ نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی جریان ماهانه مدل SWAT در دو ایستگاه کیاکلا و شیرگاه در طول دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی با توجه به شاخص‌های به‌دست‌آمده NS و R^2 رضایت‌بخش بود. در ایستگاه کیاکلا، کارایی مدل ناش-ساتکلیف در دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸ و ۰/۷۶ بود و در ایستگاه شیرگاه همین مقادیر برابر با ۰/۸۴ و ۰/۷۵ است. همچنین تقریباً همه مقادیر R^2 بیشتر از ۰/۷۵ بودند (جدول ۳). بین جریان مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده در طول دوره مطالعاتی همبستگی خوبی به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که مدل SWAT کالیبره شده می‌تواند جریان ماهانه را در منطقه مورد مطالعه به‌خوبی شبیه‌سازی کند.

تغییر اقلیم در آینده

قبل از انجام ریزمقیاس‌نمایی به روش‌های Qm و Delta برای دوره‌های آینده، می‌بایست از توانایی مدل به‌منظور شبیه‌سازی آینده اطمینان حاصل نمود. بدین ترتیب ریزمقیاس‌نمایی رویدادهای تاریخی بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ انجام شد.

با استفاده از ۶ مدل GCM که فهرست مدل‌های استفاده‌شده در جدول (۱) آورده شده است، ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش و دما تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شد.

به‌طور مثال شاخص‌های ارزیابی برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های ایستگاه باران‌سنجی کیاکلا و هواشناسی ایستگاه آلاشت در جدول‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. همچنین شکل ۴ نشان‌دهنده مقادیر بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر ایستگاه‌های مذکور برای داده‌های دوره مشاهداتی و ریزمقیاس‌شده است.

همچنین برای داده‌های دما، روش ریزمقیاس‌نمایی به‌روش عامل تغییر یا دلتا مشابه با بارش هست با این تفاوت که برای محاسبه مقدار عامل تغییر یا دلتای مربوط به دمای هریک از ماه‌های سال، میانگین دمای هریک از ماه‌های اقلیم آینده از میانگین دمای ماه مشابه در اقلیم حاضر کم می‌شود. به‌این ترتیب عامل تغییر یا دلتا برای گرید یا ایستگاه موردنظر به‌دست می‌آید.

در این تحقیق داده‌های تاریخی با روش‌های Qm و Delta ریزمقیاس شدند و با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفتند از آنجایی که داده‌های بارش دارای پیوستگی نمی‌باشند تنها از معیارهای خطا جهت انتخاب بهترین مدل استفاده شد و برای داده‌های دمایی علاوه معیارهای خطا، معیارهای همبستگی نیز جهت انتخاب بهترین مدل و روش مورد استفاده قرار گرفت. پس از انتخاب بهترین مدل داده‌های آینده برای سناریوهای متوسط و بدبینانه از سایت فوق برای مدل موردنظر دانلود شد و برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ پیش‌بینی صورت گرفت.

$$NRMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_S - X_O)^2}{\sum_{i=1}^n (X_O)^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_S - X_O)^2}{n}} \quad (8)$$

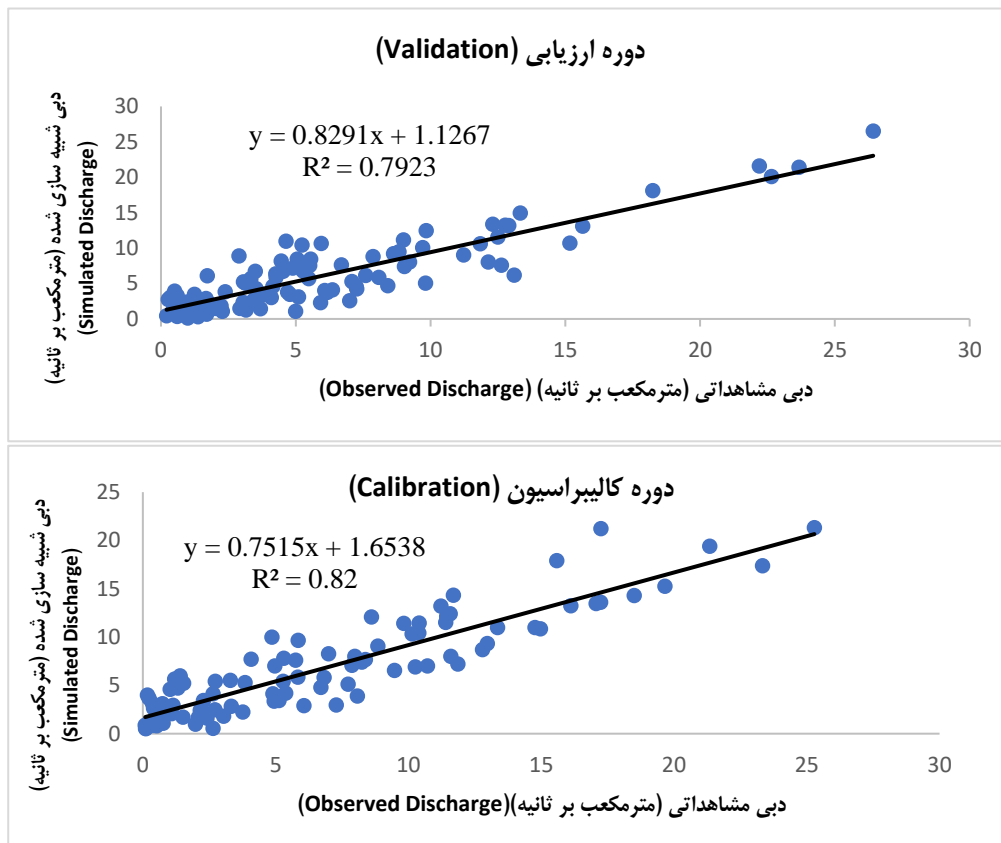
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_S - X_O|}{n} \quad (9)$$

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_O - X_S)^2}{\sum_{i=1}^n (X_O - \bar{X})^2} \right) \quad (10)$$

پیش‌بینی نقشه پوشش اراضی:

در مطالعات تغییر کاربری اراضی، روش مارکوف توزیع مساحتی کاربری زمین در انتهای یک دوره زمانی را با استفاده از توزیع کاربری در ابتدای دوره و یک ماتریس تغییر وضعیت پیش‌بینی می‌کند. این ماتریس تغییر وضعیت با توجه به تغییرات مشاهده‌شده در گذشته به‌دست می‌آید و برای پیش‌بینی کاربری‌ها در زمان آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل تلفیقی از مدل سلول‌های خودکار، زنجیره مارکوف و مدل تخصیص چند منظوره اراضی (MOLA) است که به‌منظور پیش‌بینی تغییرات آینده کاربری اراضی به‌کار می‌رود.

ابتدا با به‌کارگیری مدل زنجیره مارکوف احتمال تغییر طبقات نقشه کاربری اراضی به یکدیگر در قالب یک ماتریس تغییر وضعیت کاربری‌ها و بر مبنای تغییرات صورت گرفته از زمان T0 تا T1 محاسبه می‌شود. خروجی مدل مارکوف که همان ماتریس تغییر وضعیت است از لحاظ ماهیت غیرمانی است، یعنی در آن هیچ دانش و آگاهی از موقعیت جغرافیایی کاربری‌های زمین وجود ندارد. برای پیش‌بینی موقعیت مکانی کاربری‌ها (نقشه کاربری اراضی) در زمان آتی از مدل CA-Markov که مؤلفه‌های مجاورت مکانی و دانش کاربر نسبت به توزیع مکانی احتمال تبدیل کاربری‌ها را به مدل زنجیره مارکوف اضافه می‌کند، استفاده می‌شود (Aithal et al., 2014; Asheri, 2016). در این تحقیق برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز مطالعاتی از روش تلفیق زنجیره‌های مارکوف و سلول‌های خودکار استفاده می‌شود. برای



شکل ۲- نتایج دبی ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی جریان حوضه رودخانه تالار در ایستگاه کیاکولا
Figure 2. Observed and simulated monthly streamflow of the Talar river basin at Kiakola Station

جدول ۳- عملکرد مدل SWAT

Table 3. The performance of the SWAT model

RMSE	NSE	R ²	r-factor	p-factor	مرحله (Stage)	نام ایستگاه (Station Name)
2.64	0.80	0.81	0.85	0.67	کالیبراسیون (Calibration)	کیاکولا (Kiakola)
2.55	0.76	0.78	0.94	0.71	ارزیابی (Validation)	

جدول ۴- مقادیر اولیه برای کالیبراسیون مدل SWAT

Table 4. The initial and calibrated parameters selected for the SWAT model

حداکثر (Maximum)	حداقل (Minimum)	عدد کالیبراسیون (Calibration) (parameter)	توضیحات پارامتر (Parameter Description)	نام پارامتر (Parameter)
0.13	0.01	0.04	شماره منحنی (Curve Number)	CN2.mgt
0.12	0.05	0.10	فاکتور آلفا در جریان پایه (Baseflow alpha factor)	ALPHA_BF.gw
42.03	39.65	41.59	زمان تأخیر آب زیرزمینی (Groundwater delay time)	GW_DELAY.gw
931.90	806.57	916.98	عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق (Threshold depth of water)	GWQMN.gw
0.27	0.18	0.25	فاکتور تصحیح تبخیر از سطح خاک (Soil evaporation compensation factor)	ESCO.bsn
0.95	0.93	0.94	فاکتور تصحیح رشد پوشش گیاهی (Plant uptake compensation factor)	EPCO.bsn
0.03	0.02	0.03	ضریب revap آب زیرزمینی (Groundwater "revap" coefficient)	GW_REVAP.gw
16.21	15.30	16.02	ضریب تأخیر رواناب سطحی (Surface runoff lag coefficient)	SURLAG.bsn
0.69	0.66	0.68	آب موجود در هر لایه از خاک (Available water capacity of the soil layer)	SOL_AWC(..).sol
2.38	1.40	1.49	دمای بارش برف (درجه سانتی‌گراد) (Snowfall temperature (°C))	SFTMP.bsn
0.96	0.16	0.46	چگالی توده خاک مرطوب (Moist bulk density) (g/cm ³)	SOL_BD(..).sol
-0.09	-0.23	-0.23	فاکتور تأخیر دمای برف (Snow pack temperature lag factor) (mm/day-°C)	TIMP.bsn

جدول ۵- نتایج ارزیابی ریزمقیاس نمایی مدل‌های مختلف برای بارش

Table 5. The results of downscaled different models for precipitation

مدل (Model)	روش ریزمقیاس نمایی (Downscaling Method)	RMSE	NRMSE	MAE
BCC	Delta	2.22904	0.04112	1.5872
BCC	QM	2.3742	0.0438	1.6668
FIO	Delta	2.9484	0.05436	2.1576
FIO	QM	2.80424	0.05172	2.078
GFDL	Delta	2.28404	0.04212	1.7744
GFDL	QM	2.24464	0.0414	1.746
INM	Delta	2.1852	0.04028	1.7316
INM	QM	2.7804	0.05128	2.0796
CMCC	Delta	2.81704	0.05196	2.1316
CMCC	QM	2.67428	0.04932	1.9876
MPI	Delta	2.79704	0.0516	2.0868
MPI	QM	2.73396	0.0504	2.0572

جدول ۶- نتایج ارزیابی ریزمقیاس نمایی مدل‌های مختلف برای دمای مینیمم

Table 6. The results of downscaled different models for minimum temperature

مدل (Model)	روش ریزمقیاس نمایی (Downscaling Method)	RMSE	NRMSE	MAE
BCC	Delta	3.332	0.494	2.68
BCC	QM	3.044	0.451	2.43
FIO	Delta	4.176	0.619	3.51
FIO	QM	3.906	0.579	3.2
GFDL	Delta	3.652	0.542	3.02
GFDL	QM	3.785	0.561	3.1
INM	Delta	3.543	0.525	2.86
INM	QM	3.635	0.539	2.97
CMCC	Delta	3.517	0.522	2.91
CMCC	QM	2.795	0.414	2.28
MPI	Delta	3.902	0.579	3.32
MPI	QM	3.263	0.484	2.69

جدول ۷- نتایج ارزیابی ریزمقیاس نمایی مدل‌های مختلف برای دمای ماکزیمم

Table 7. The results of downscaled different models for maximum temperature

مدل (Model)	روش ریزمقیاس نمایی (Downscaling Method)	RMSE	NRMSE	MAE
BCC	Delta	6.541	0.428	5.54
BCC	QM	3.365	0.22	2.74
FIO	Delta	5.052	0.33	4.27
FIO	QM	3.897	0.255	3.13
GFDL	Delta	3.976	0.26	3.19
GFDL	QM	3.803	0.249	3.05
INM	Delta	5.107	0.334	4.31
INM	QM	4.274	0.28	3.51
CMCC	Delta	5.079	0.332	3.99
CMCC	QM	2.892	0.189	2.23
MPI	Delta	5.305	0.347	4.44
MPI	QM	3.481	0.228	2.74

می‌باشد. این روش‌ها برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه پیاده شده و مقادیر ریزمقیاس نمایی شده پارامترهای فوق‌الذکر برای پیش‌بینی جریان رودخانه حوضه تالار در ایستگاه کیاکلا استفاده شد.

تغییرات کاربری اراضی در آینده

در این پژوهش مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ دوره زمانی ۱۸ ساله برای دستیابی به ماتریس احتمال انتقال برای پیش‌بینی کاربری اراضی انجام شد و پیش‌بینی کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ انجام شد. هدف از مدل‌سازی، تعیین میزان توانایی مدل زنجیره مارکوف و تلفیق آن با اتوماتای سلولی به منظور آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی است. همچنین احتمال تغییر هر کلاس به کلاس دیگر یا احتمال ماندن همان کلاس در سال‌های آینده در جدول ۶ نشان داده شده است.

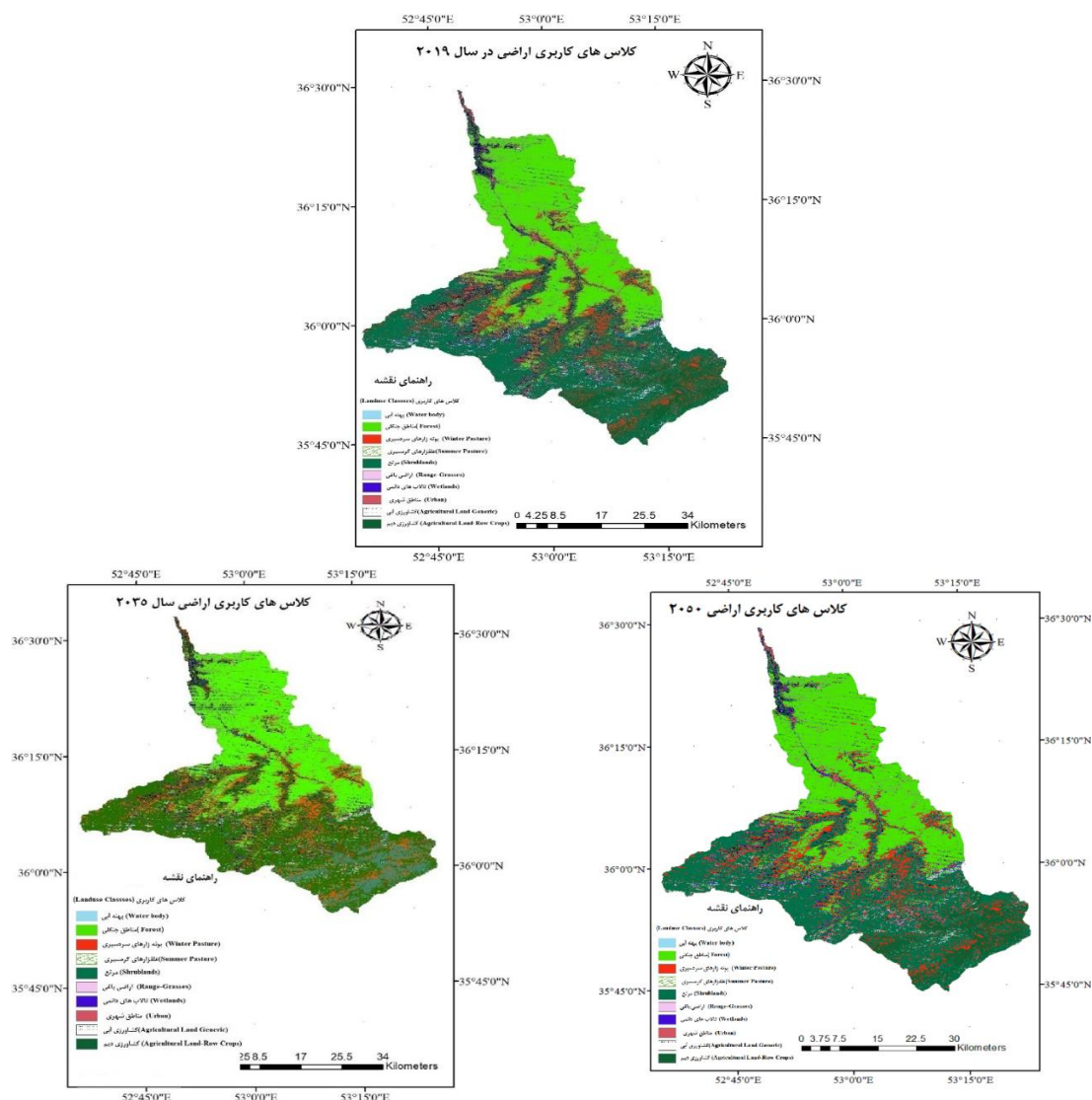
همان‌طور که در جداول ۵ تا ۷ مشاهده می‌شود بهترین مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای ریزمقیاس نمایی مدل INM به دست آمد. همچنین روش Delta برای ریزمقیاس نمایی بارش و روش Qm برای ریزمقیاس نمایی دمای حداقل و حداکثر مقادیر ارزیابی بهتری را نشان می‌دهند. به‌طور مثال مطابق جداول نشان داده شده مقادیر RMSE، NRMSE و MAE برای بارش ایستگاه کیاکلا به ترتیب ۲/۱۸۵، ۰/۰۴۰۲ و ۱/۷۱۶ با استفاده از روش Delta می‌باشد. مقادیر RMSE، NRMSE و MAE برای دمای حداقل ایستگاه آلاشت به ترتیب برابر با ۲/۲۸، ۰/۴۱۴، ۲/۷۹۵ با استفاده از روش Qm می‌باشد. همچنین مقادیر RMSE، NRMSE و MAE برای دمای حداکثر ایستگاه آلاشت به ترتیب برابر با ۲/۸۹۲، ۰/۱۸۹، ۲/۲۳ با استفاده از روش Qm می‌باشد. تمامی این مقادیر نشان دهنده دقت خوب این روش‌های ریزمقیاس نمایی برای ورودی‌های مدل SWAT برای پیش‌بینی جریان در حوضه آبریز تالار

جدول ۷- انواع کاربری اراضی و مساحت آن‌ها در سال‌های مختلف

سال	2050	2035	2019
کلاس‌های کاربری (Landuse Classes)	مساحت (Area)	مساحت (Area)	مساحت (Area)
پهنه آبی (Water body)	1760 (0.8)	1680 (0.7)	1594.3 (0.71)
مناطق جنگلی (Forest)	58050 (25.8)	60050 (26.7)	61132.8 (27.14)
بوته‌زارهای سردسیری (Winter Pasture)	18670 (8.3)	19630 (8.7)	21286.8 (9.45)
علفزارهای گرمسیری (Summer Pasture)	20000 (8.9)	20510 (9.1)	20837.6 (9.25)
مرتع (Shrublands)	89470 (39.7)	86820 (38.5)	84003.9 (37.29)
اراضی باغی (Range-Grasses)	2450 (1.1)	2400 (1.1)	2248.5 (1.00)
تالاب‌های دائمی (Wetlands)	4800 (2.1)	4520 (2.0)	4259.9 (1.89)
مناطق شهری (Urban)	6900 (3.1)	7010(3.1)	5928.1 (2.63)
کشاورزی آبی (Agricultural Land Generic)	14710 (6.5)	14280(6.3)	7777.1(3.45)
کشاورزی دیم (Agricultural Land-Row Crops)	8440 (3.7)	8340(3.7)	16182.7(7.18)

دوره‌ی پیش‌بینی به‌دست آمده است. شکل ۳ نشان دهنده کاربری اراضی مختلف در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۱۹ است. این نتایج نیاز بیشتر توجه برنامه‌ریزان محیط زیست در زمینه گسترش فعالیت‌های شهری و صنعتی و کاهش اراضی کشاورزی و باغ‌ها را نشان می‌دهد.

با بررسی کلاس‌های کاربری اراضی می‌توان نتیجه گرفت که مساحت اراضی کشاورزی آبی در آینده در اطراف رودخانه تالار کاهش می‌یابد. این کاهش اراضی کشاورزی آبی یک سناریوی امیدوار کننده برای آینده حوزه آبریز رودخانه تالار است. براساس نتایج به‌دست آمده از کاربری اراضی کاهش در سطوح کاربری کشاورزی آبی ۱۴۲۸۰ و ۱۴۷۱۰ هکتار در



شکل ۳- کاربری اراضی مختلف در سال‌های ۲۰۱۹، ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰
Figure 3. Different land uses in the years 2019, 2035, and 2050

پیش‌بینی جریان در آینده

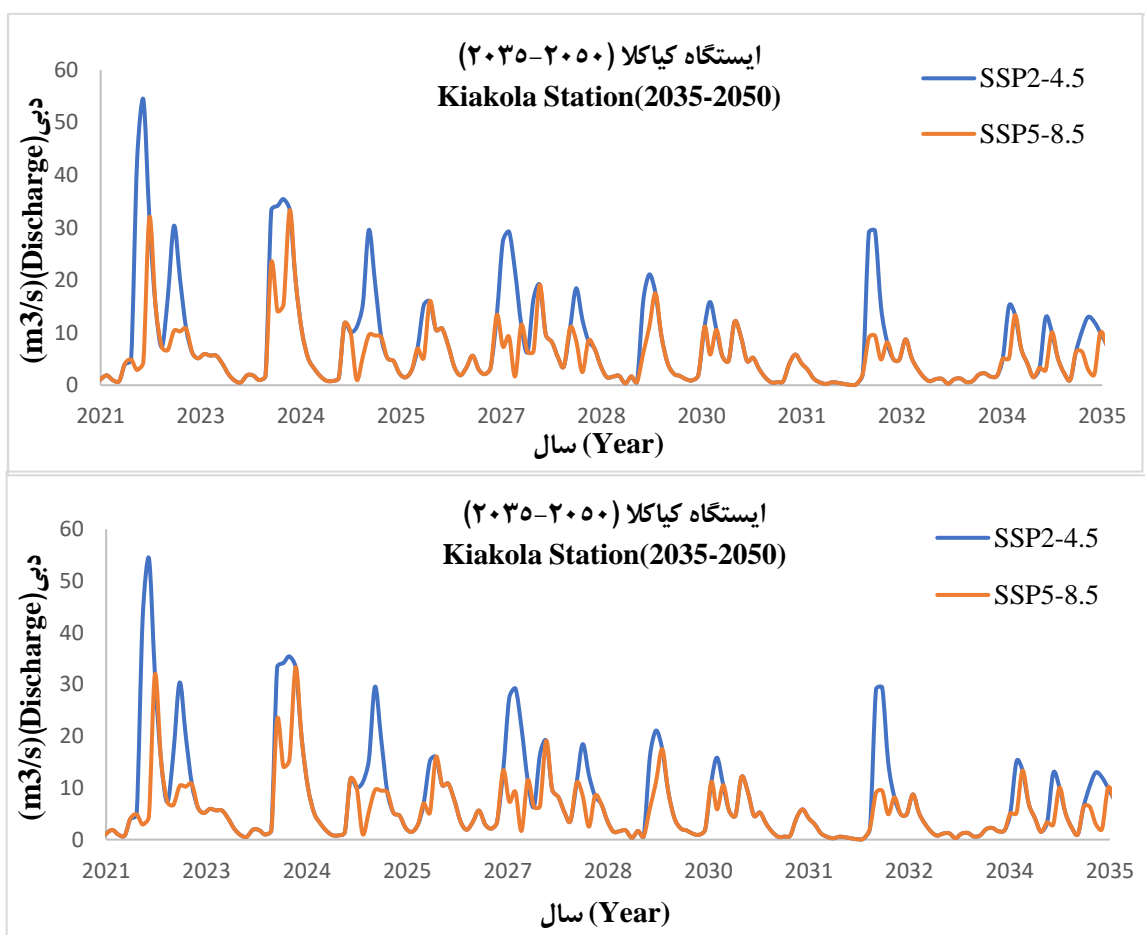
نشان می‌دهد که متوسط جریان ماهانه در طول سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۵ به مقدار ۲/۷۱٪ در سناریو SSP2-4.5 و به میزان ۱۹/۳۱٪ در سناریو SSP5-8.5، کاهش پیدا کرد. همچنین متوسط جریان ماهانه در طول سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ به مقدار ۷/۲۴٪ در سناریو SSP2-4.5 و به میزان ۲۳/۹۸٪ در سناریو SSP5-8.5، کاهش پیدا کرد. شکل ۴ نشان‌دهنده مقدار جریان ماهانه در ایستگاه‌های شیرگاه و کیاکلا تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و کاربری اراضی سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ می‌باشد.

پس از واسنجی مدل، سری زمانی جریان ماهانه حوضه با استفاده از مدل SWAT، در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰، با استفاده از داده‌های دما و بارش حاصل از روش‌های Delta برای هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و همچنین نقشه پیش‌بینی شده کاربری اراضی سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ با استفاده از روش CA-Markov، شبیه‌سازی شد. (جدول ۸). سپس مقایسه بین متوسط جریان ماهانه دراز مدت ۳۰ ساله در دوره آبی با متوسط جریان ماهانه دوره مشاهداتی در هر دو سناریو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج برای ایستگاه کیاکلا نتایج

جدول ۸- پیش‌بینی جریان آینده در حوضه رودخانه تالار تحت سناریوهای مختلف

Table 8. Future streamflow scenarios in the Talar River basin.

درصد تغییرات (Variation) (Percentage (%)	تغییرات دبی (Discharge) (Variation	دبی مشاهداتی (Observed) (Discharge	دبی شبیه‌سازی (Simulated) (Discharge	کاربری (Landuse)	بازه زمانی (Period)	سناریو (Scenario)	ایستگاه (Station)
-2.71	-0.18	6.63	6.45	2035	2021-2035	SSP2-4.5	کیاکلا
-19.31	-1.28	6.63	5.35	2035	2021-2035	SSP5-8.5	
-7.24	-0.48	6.63	6.15	2050	2021-2050	SSP2-4.5	
-23.98	-1.59	6.63	5.04	2050	2021-2050	SSP5-8.5	



شکل ۴- مقادیر جریان ماهانه در ایستگاه کیاکلا تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم
Figure 4. Monthly streamflow values at the Kiakola station under different climate scenarios

هیدرولوژیکی حوضه دارند. این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی، اثرات ترکیبی کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی آینده را بر بیابان آب در حوضه تالار ارزیابی می‌کند.

در حوضه تالار، تغییرات کاربری اراضی عمدتاً توسط عوامل داخلی، مانند گسترش اراضی کشاورزی و شهرنشینی کنترل می‌شود، در حالی که تغییرات اقلیمی به‌عنوان عوامل بیرونی در نظر گرفته می‌شود. هر دو نقش مهمی در تغییر فرآیندهای

کشاورزی، از بین رفتن جنگل‌ها، توسعه شهرسازی، سیاست مالکیت زمین و توسعه زیرساخت‌ها مهمترین محرک‌های تغییر کاربری اراضی می‌باشند.

نتیجه‌گیری

تغییرات کاربری زمین، مانند جنگل‌زدایی و شهرنشینی، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر هیدرولوژی حوضه‌های آبریز داشته باشد و در نهایت بر منابع آب تأثیر بگذارد. هنگامی که این تغییرات کاربری اراضی با اثرات تغییرات اقلیم ترکیب شود، می‌تواند منجر به افزایش فراوانی سیل یا خشکسالی شود که توسعه اجتماعی-اقتصادی جوامع محلی و منطقه‌ای را تهدید می‌کند. بیان آب در حوضه مورد مطالعه با تغییرات کاربری اراضی مرتبط است. به همین منظور در این پژوهش مدل SWAT برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۱ کالیبره و ارزیابی شد و عملکرد خوبی را نشان داد. متعاقباً، مدل معتبر برای شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی آینده در حوضه مورد مطالعه، با ترکیب کاربری پیش‌بینی‌شده اراضی و تغییرات اقلیم برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های گزارش تغییر اقلیم CMIP6 بر اساس شش مدل از دو روش دلتا (Δ) و نگاهت کمی (Qm) برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده شد و تحت دو سناریو SSP2-5/4 و SSP5-5/8 پیش‌بینی شد. همچنین در این مطالعه از مدل پیش‌بینی CA-Markov برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ استفاده شد. در صورتی که این عوامل در مدل‌سازی ترکیب شوند، تغییرات قابل‌توجهی به‌ویژه کاهش میانگین جریان ماهانه را می‌توان انتظار داشت. این تحقیق چگونگی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و آب و هوا را بر آب در دسترس در حوضه تالار در آینده ارائه می‌دهد. همچنین این مقاله مطالعه‌ای را در مورد استفاده از مدل SWAT در هیدرولوژی برای کمک به حوزه علمی ارائه می‌دهد. یافته‌های این مطالعه همچنین می‌تواند برای مسئولان در کاهش تنش آبی از طریق مدیریت صحیح کاربری اراضی در آینده مفید باشد.

ترکیب تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی تأثیر بارزتری بر جریان و رواناب سطحی دارد. در مقیاس ماهانه، جریان ناشی از رواناب سطحی به‌طور قابل‌توجهی در طول فصول سال افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد رویدادهای شدیدتر (یعنی سیل) به‌طور بالقوه می‌تواند در آینده رخ دهد. با تغییرات کاربری اراضی، این اثرات را می‌توان تنها کمتر از ۲۰٪ کاهش داد. بنابراین، اقدامات بیشتری (به‌عنوان مثال، حفاظت از خاک) علاوه بر برنامه‌ریزی کاربری اراضی به‌منظور افزایش نفوذ و تغذیه آبخوان و متعاقباً کاهش خطرات ناشی از استفاده از اراضی و اثرات تغییرات اقلیمی مورد نیاز است.

نتایج پیش‌بینی‌شده سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ نشان‌دهنده کاهش حجم رواناب، تالاب‌ها و زمین‌های شهری است. بنابراین، فعالیت‌های کاربری اراضی در آینده باید مبتنی بر توسعه کاربری مناسب و تنظیم کاربری باشد تا اثرات نامطلوب پایدار تغییرات کاربری اراضی را کاهش دهد. بنابر نتایج به‌دست آمده از پیش‌بینی رواناب حوزه آبخیز تالار (جدول ۸) بیش‌برآوردی رواناب در نتیجه از بین رفتن سطح وسیعی از جنگل‌ها، رشد بی‌رویه شهرها، فرسایش زمین‌های کشاورزی، گسترش بیابان‌ها، کاهش و آلودگی آب‌های زیرزمین غالباً ناشی از تبدیل غیراصولی کاربری و پوشش اراضی و اعمال روش‌های غلط در بهره‌برداری از آن‌ها می‌باشد. پیش‌بینی کاربری اراضی توسط ذبیحی و همکاران (Zabih et al., 2019) با استفاده از زنجیره مارکوف در حوضه تالار مازندران نشان‌دهنده جنگل‌زدایی و توسعه کاربری زمین‌های مسکونی در حوضه آبریز مورد مطالعه بود. لنت و همکاران (Lennert et al., 2020) نشان دادند نرخ گسترش جنگل‌ها، زمین‌های علفزار و دیگر زمین‌ها در دنیا رو به کاهش است.

حلیم و همکاران (Haleem et al., 2022) نشان دادند اثرات توأمان تغییرات اقلیم و تغییرات کاربری اراضی بر رواناب تأثیر می‌گذارد. همچنین مدیریت منابع آب پایداری محیط آبی را به‌دنبال دارد. از سوی دیگر، عوامل اصلی زیربنایی تأثیرگذار بر میزان آبدی حوضه آبخیز عبارتند از: عوامل جمعیتی، اقتصادی، فنی، نهادی، سیاستی و بیوفیزیکی. همچنین توسعه

References

- Abbaspour, K. C. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland*, 93.
- Aithal, B. H., Raok, V., & Ramachandra, T. V. (2014). Modeling and geo-visuisation of urban growth. In *Conference on conservation and sustainable management of wetland ecosystem in Western Ghats*.
- Alexander, L., Allen, S., & Bindoff, N. L. (2013). *Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: The physical science basis summary for policymakers*.
- Apurv, T., Mehrotra, R., Sharma, A., Goyal, M. K., & Dutta, S. (2015). Impact of climate change on floods in the Brahmaputra basin using CMIP5 decadal predictions. *Journal of Hydrology*, 527, 281-291.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Asheri, E. (2016). Study on urban land use change impacts on rural settlement strategy using automated cell model (case study city of Urmia). *Geographical Planning of Space*, 5(18), 151-167.
- Cao, C., Sun, R., Wu, Z., Chen, B., Yang, C., Li, Q., & Fraedrich, K. (2023). Streamflow Response to Climate and Land-Use Changes in a Tropical Island Basin. *Sustainability*, 15(18), 13941.
- Chegnizadeh, A., Rabieifar, H., Ebrahimi, H., & Zakeri Nayeri, M. (2023). The Effect of Mid-term Changes in Climate and Land use on Flow Reduction in Karkheh Catchment. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 12(2), 13-29.
- Dannenber, M. P., Wise, E. K., & Smith, W. K. (2019). Reduced tree growth in the semiarid United States due to asymmetric responses to intensifying precipitation extremes. *Science advances*, 5(10), eaaw0667.

- El-Khoury, A., Seidou, O., Lapen, D., Que, Z., Mohammadian, M., Sunohara, M., & Bahram, D. (2015). Combined impacts of future climate and land use changes on discharge, nitrogen and phosphorus loads for a Canadian river basin. *Journal of environmental management*, 151, 76-86.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Ivancic, T. J., & Shaw, S. B. (2017). Identifying spatial clustering in change points of streamflow across the contiguous US between 1945 and 2009. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2445-2453.
- Jafari Gorzin, B., Kaviani, A., & Solaimani, K. (2023). Investigation of Land use Changes and Its Role in the Hydrology of the Upstream Areas of Siahroud Watershed [Research]. *Journal of watershed management research*, 14(27), 26-37.
- Jia, H. J., & Wan, R. R. (2012). Simulating the impacts of land use/cover change on storm-runoff for a mesoscale watershed in east China. *Advanced Materials Research*, 347, 3856-3862.
- Kaviani, A., Gholami, L., Mohammadi, M., Spalevic, V., & Soraki, M. F. (2018). Impact of wheat residue on soil erosion processes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(2), 553-562.
- Khan, A., Ghoraba, S., Arnold, J. G & Di Luzio, M. (2014). Hydrological modeling of upper Indus Basin and assessment of deltaic ecology. *Int. J. Mod. Eng. Res*, 4(1), 73-85.
- Kiyani Majd, M., Nohtani, M., Dehmardeh Ghaleh No, M. R., & Shikh, Z. (2023). Simulating the Runoff of Watersheds in Dry Areas on A Monthly Scale using the SWAT Model (Case Study: Lar Watershed) [Research]. *Journal of watershed management research*, 14(27), 135-145.
- Leng, G., Tang, Q., & Rayburg, S. (2015). Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Global and Planetary Change*, 126, 23-34.
- Lennert, J., Farkas, J. Z., Kovács, A. D., Molnár, A., Módos, R., Baka, D., & Kovács, Z. (2020). Measuring and predicting long-term land cover changes in the functional urban area of Budapest. *Sustainability*, 12(8), 3331.
- Liu, Y. B., De Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2005). Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environmental modeling & assessment*, 9, 227-235.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2(1), 2391.
- Meaurio, M., Zabaleta, A., Uriarte, J. A., Srinivasan, R., & Antiguëdad, I. (2015). Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. *Journal of hydrology*, 525, 326-334.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., ... & Wang, R. H. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571-3605.
- Miller, J. D., & Hess, T. (2017). Urbanisation impacts on storm runoff along a rural-urban gradient. *Journal of hydrology*, 552, 474-489.
- Moriassi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
- Mujiono, M., Indra, T. L., Harmantyo, D., Rukmana, I. P., & Nadia, Z. (2017, July). Simulation of land use change and effect on potential deforestation using Markov Chain-Cellular Automata. In *AIP Conference Proceedings*, (Vol. 1862, No. 1). AIP Publishing.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Nouri, J., Gharagozlou, A., Arjmandi, R., Faryadi, S., & Adl, M. (2014). Predicting urban land use changes using a CA-Markov model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 5565-5573.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., Van Ruijven, B. J., Van Vuuren, D. P., Birkmann, J., & Kok, K. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global environmental change*, 42, 169-180.
- Olivera, F., & Maidment, D. (1999). Geographic Information Systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing. *Water Resources Research*, 35(4), 1155-1164.
- Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of hydrology*, 395(3-4), 199-215.
- Pignotti, G., Rathjens, H., Cibin, R., Chaubey, I., & Crawford, M. (2017). Comparative analysis of HRU and grid-based SWAT models. *Water*, 9(4), 272.
- Reddy, C. S., Singh, S., Dadhwal, V., Jha, C., Rao, N. R., & Diwakar, P. (2017). Predictive modelling of the spatial pattern of past and future forest cover changes in India. *Journal of Earth System Science*, 126, 1-16.

- Ringard, J., Seyler, F., & Linguet, L. (2017). A quantile mapping bias correction method based on hydroclimatic classification of the Guiana shield. *Sensors*, 17(6), 1413.
- Samie, A., Deng, X., Jia, S., & Chen, D. (2017). Scenario-based simulation on dynamics of land-use-land-cover change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability*, 9(8), 1285.
- Schilling, K. E., Gassman, P. W., Kling, C. L., Campbell, T., Jha, M. K., Wolter, C. F., & Arnold, J. G. (2014). The potential for agricultural land use change to reduce flood risk in a large watershed. *Hydrological Processes*, 28(8), 3314-3325.
- Shang, X., Jiang, X., Jia, R., & Wei, C. (2019). Land use and climate change effects on surface runoff variations in the upper Heihe River basin. *Water*, 11(2), 344.
- Solomon, S. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press.
- Surabuddin Mondal, M., Sharma, N., Kappas, M., & Garg, P. K. (2019). Ca Markov modeling of land use land cover dynamics and sensitivity analysis to identify sensitive parameter (S). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 723-729.
- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Yusop, Z., Duan, Z., & Ling, L. (2015). Impacts of land-use and climate variability on hydrological components in the Johor River basin, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 873-889.
- Wu, J., Miao, C., Zhang, X., Yang, T., & Duan, Q. (2017). Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, 586, 328-337.
- Xu, S., Qin, M., Ding, S., Zhao, Q., Liu, H., Li, C., Yang, X., Li, Y., Yang, J., & Ji, X. (2019). The impacts of climate variation and land use changes on streamflow in the Yihe River, China. *Water*, 11(5), 887.
- Zabihi, M., Moradi, H. R., Gholamalifard, M., & Khaledi Darvishan, A. (2019). Effects of Land Use/Land Cover Change Scenarios on Landscape Metrics on the Talar Watershed. *Watershed Management Research Journal*, 32(1), 84-99. <https://doi.org/10.22092/wmej.2018.123624.1156>
- Zhang, L., Karthikeyan, R., Bai, Z., & Srinivasan, R. (2017). Analysis of streamflow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China. *Catena*, 154, 1-11.