

Investigating the Different Hydrological Components Influenced by Climate Change and Land Use Change Scenarios in the Pasikhan Watershed and Their Impact on the Anzali Wetland

S. Rashedi¹, S.A. Hosseini^{2*}, S. Nazif³,
and B. Ghermez Cheshmeh⁴

Abstract

Without hydrological models the investigation and management of watersheds can be time-consuming and costly. This study aims to explore various hydrological factors including runoff, sedimentation, evaporation, and transpiration in Pasikhan watershed located in Guilan province. The study also examines the impact of these factors on the Anzali Wetland. To achieve this, the research utilizes the SWAT model. Data on flow discharge, precipitation, and sedimentation for three hydrometric station in the Pasikhan watershed from 1999 to 2020 were obtained from the regional water company of Guilan province. The necessary maps for model execution were obtained using established methods. Predictions for various factors, such as flow rate, sedimentation, surface runoff, evaporation and transpiration, deep aquifer recharge, curve number, deep infiltration, and watershed runoff, were made for the years 2040 and 2071. Discharge-sediment from 1999 to 2011 is used for calibration and for validation used the data from 2012 to 2022 is used. The study also assessed changes in hydrological components caused by climate change using the RCP8.5 scenario and land use changes. The findings demonstrate variations in multiple hydrological elements and precipitation patterns within the catchment basin. The Nash Sutcliffe criterion yielded values between 0.60 and 0.80 for both the calibration and validation phases of the model in terms of flow rate and sedimentation. This indicated that the implementation of the SWAT model is satisfactorily accurate. Results showed that the maximum surface runoff within the basin will reach 485 mm in 2055, coinciding with a rainfall of 1431 mm. Additionally, the study identified the highest levels of evaporation and transpiration as 1707 mm within the RCP8.5 scenarios in 1996. Overall, the research emphasizes the negative impact of sediment generated within the Pasikhan watershed on the Anzali Wetland, highlighting the need for effective control measures to mitigate wetland degradation.

Keywords: Evaporation, Sedimentation, Runoff, Curve Number, Modeling.

Received: October 3, 2023

Accepted: January 21, 2024

بررسی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مختلف تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی در حوضه پسیخان و اثر آنها بر تالاب انزلی

سعید راشدی^۱، سید عباس حسینی^{۲*}، سارا نظیف^۳
و باقر قرمزچشمه^۴

چکیده

بررسی و مدیریت حوضه‌های آبخیز بدون استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است. هدف از انجام این مطالعه بررسی مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی مانند رواناب، رسوب، تبخیر و تعرق و غیره در حوضه پسیخان واقع در استان گیلان و اثرات این مؤلفه‌ها بر تالاب انزلی است. برای انجام این پژوهش از مدل SWAT استفاده شد. اطلاعات دبی جریان، بارش و رسوب حوضه پسیخان در سه ایستگاه هیدرومتری برای دامنه زمانی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان دریافت شد. نقشه‌های مورد نیاز برای اجرای مدل از روش‌های متداول به دست آمدند. مؤلفه‌های مختلف از جمله دبی جریان، رسوب، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق، تغذیه آبخوان عمیق، نفوذ عمقی و رواناب خروجی از حوضه برای سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ مورد پیش‌بینی قرار گرفت. برای واسنجی از اطلاعات دبی-رسوب مربوط به سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۹۹ برای اعتبارسنجی از سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۲ استفاده شد. تغییرات مؤلفه‌های مختلف ناشی از تغییر اقلیم در سناریو RCP8.5 و تغییر کاربری اراضی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بین تغییرات مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی و بارش در حوضه تطابق وجود دارد. معیار نش ساتکلیف برای بخش واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای دبی جریان و رسوب بین ۰/۶۰ تا ۰/۸۰ به دست آمد که نشان دهنده دقت مناسب اجرای مدل SWAT است. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۲۵ بیشترین رواناب سطحی حوضه برابر با ۴۸۵ میلی‌متر با بارندگی ۱۴۳۱ میلی‌متر رخ خواهد داد. همچنین، مشاهده شد که بیشترین مقدار تبخیر و تعرق نیز در سناریو RCP8.5 در سال ۱۹۹۶ برابر ۱۷۰۷ میلی‌متر بوده است. به طور کلی، در صورت عدم کنترل رسوب در حوضه پسیخان، تالاب انزلی با سرعت بسیار زیادی روبه نابودی خواهد رفت.

کلمات کلیدی: تبخیر، رسوب، رواناب، شماره منحنی، مدل‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: abbas_hoseini@srbiau.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Research Institute of Soil Protection and Watershed Management, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.188122](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.188122)

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



حوضه آبخیز وجود ندارد. برای بررسی و ارزیابی فرآیندهای هیدرولوژیک در حوضه آبخیز مدل‌های متعددی وجود دارند که فقط برخی از آنها قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای GIS را دارند. مدل SWAT از پرکاربردترین این مدل‌ها است. مدل SWAT یک مدل جامع در زمینه مطالعات آب و خاک است که می‌تواند در مدیریت و برنامه‌ریزی‌های کلان برای اراضی وسیعی مورد استفاده قرار گیرد. توانایی این مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده حوضه‌های آبخیز در محیط، GIS این مدل را نسبت به مدل‌های یکپارچه که در آنها واحدهای کاری بزرگتر مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است (Beza et al., 2023; Golfam and Ashofteh, 2023).

Van Liew et al. (2003) پیش‌بینی شدت جریان را توسط دو مدل SWAT و HSPF در هشت حوضه کشاورزی واقع در ایالات اوکلاهما آمریکا در حوضه رودخانه Washita بررسی کردند. این پژوهشگران دریافتند که اختلاف بین دو مدل عمدتاً ناشی از اختلاف در مکانیسم آنها در محاسبات رواناب است و مدل SWAT در ارتباط با پیش‌بینی شدت جریان نتایج قابل قبول‌تری در شرایط مختلف آب و هوایی ارائه می‌کند. Wang et al. (2014) با استفاده از مدل SWAT به بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر جریان رودخانه در دو زیرحوضه دونگ و پولی در چین با استفاده از تصاویر لندست برای سه سال ۲۰۰۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ پرداختند. تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نشان دهنده کاهش مرتع و جنگل طی دوره ده ساله و افزایش اراضی کشاورزی برنج بوده است. این پژوهشگران نشان دادند که کاهش تبخیر و تعرق و افزایش مقدار رواناب، نفوذ و جریان پایه ناشی از تغییرات کاربری اراضی در طی این سال‌ها بوده است. همچنین، Zuo et al. (2016) تأثیر تغییرات اقلیم و کاربری اراضی بر روی رواناب و رسوب حوضه رودخانه Huangfuchuan در کشور چین را با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه این پژوهشگران نشان دهنده کاهش رواناب و رسوب سالانه در این حوضه در نتیجه تغییرات بارندگی، درجه حرارت و تغییرات کاربری اراضی است. Kandel et al. (2023) به بررسی تولید رسوب و رواناب ناشی از تغییر پوشش گیاهی زمین در ایالت کنتاکی واقع در ایالات متحده با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۶ میزان دبی از ۹۲/۳۴ میلی‌متر در سال به ۱۰۴/۷ میلی‌متر در سال و رسوب از ۰/۸۳ تن در هکتار به ۱/۶۳ تن در هکتار افزایش یافته است. این پژوهشگران بیان کردند که نتایج این تحقیق یک رویکرد قوی برای ارزیابی اثر تغییر پوشش موقت زمین بر جریان‌ها و رودخانه‌های آپالاش ارائه می‌دهد. چنین اطلاعاتی می‌تواند

گرم شدن زمین و تأثیر آن بر چرخه آب مسئله‌ای است که تمامی دانشمندان علوم مختلف بر روی آن هم نظر هستند. افزایش دمای سطح زمین و تغییرات در الگوهای بارندگی پدیده‌های غالب در تغییر اقلیم است که این دو تقریباً تمام بخش‌های دیگر چرخه آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mander, 1994; Mengistu et al., 2023). کاربری اراضی یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر کنترل فرایند بارشی-رواناب در مقیاس وقایع سیل برای حوضه‌های آبخیز است و مطالعات اثبات کرده‌اند که تغییرات غیریکنواخت در کاربری اراضی با پوشش گیاهی با عکس‌العمل هیدرولوژیکی حوضه آبخیز ارتباط بسیار نزدیکی دارد (Siriwardena et al., 2006). به عبارت دیگر کاربری اراضی با الگوی نامناسب پوشش گیاهی، می‌تواند به هدر رفت شدید آب، خاک و مواد غذایی و تخریب اراضی منجر شود (Wei et al., 2007) و تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت اقلیمی و افزایش دما بر توزیع بارش، رواناب و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد (Yarahmadi, 2014).

مدل‌های هیدرولوژیکی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی در حوضه، جهت بهینه کردن مدیریت منابع آبی، هستند (Akbari et al., 2021; Yu et al., 2023; Janjić and Tadić, 2023). یکی از روش‌های تخمین رواناب مدل‌های بارش-رواناب هستند که ابزاری مناسب برای بررسی فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آب هستند. دو کاربرد مهم مدل‌های بارش-رواناب عبارت‌اند از پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز (Emerson et al., 2003). با توجه به اهمیت مطالعه و شبیه‌سازی فرآیندهای بیلان آب حوضه‌های آبخیز، مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی بیلان آب حوضه‌های آبخیز توسعه و به کار برده شده‌اند. در ابتدا تمام مدل‌های ارائه شده یکپارچه بودند و سپس مدل‌های نیمه توزیعی توسعه یافته و اکنون نیز به دلیل فراهم شدن سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی اکثر مدل‌ها به صورت کاملاً توزیعی توسعه داده شده‌اند (Sheikh, 2006). در مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز با توجه به فراوان بودن اطلاعات مکانی و زمانی، انجام هرگونه عملیات مدیریتی مانند پروژه‌های توسعه منابع آب و عملیات حفاظتی بسیار مشکل و زمان‌بر است، چراکه جمع‌آوری این اطلاعات، که اغلب به شکل‌های گوناگونی هستند، بسیار مشکل است. بنابراین، استفاده از مدل SWAT که قابلیت اتصال به سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را دارد می‌تواند بسیاری از مشکلات را برطرف کند (Aloui et al., 2023; Kandel et al., 2023). امروزه، به جز مدل‌سازی راه‌حل دیگری برای درک صحیح از فرآیندهای بهم پیوسته و چندگانه در یک

برای طراحی شیوه‌های مدیریت زمین برای حفظ آب و کنترل فرسایش خاک در منطقه Appalachian در شرق کنتاکی مفید است.

است. تاکنون هیچ مطالعه‌ای در حوضه پسیخان به بررسی و مدل‌سازی ویژگی‌های هیدرولوژیکی آن نپرداخته است. هدف از انجام این پژوهش شبیه‌سازی رواناب-رسوب و سایر ویژگی‌های هیدرولوژیکی در حوضه پسیخان واقع در استان گیلان توسط مدل SWAT تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و اقلیم در مقیاس زمانی سالانه و پیش‌بینی وضعیت آینده آن است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

۲-۱-۱- تالاب انزلی

تالاب انزلی یکی از تالاب‌های جوان است که از لحاظ زمین‌شناسی در اثر پسروی دریای کاسپین (دریای خزر) و جریانات دریایی به وجود آمده است. طول متوسط این تالاب ۳۰ کیلومتر، عرض متوسط سه کیلومتر و عمق آن متغیر بوده و به صورت متوسط سه متر بیان شده است. حوضه آبریز تالاب مساحتی برابر ۳۷۴۰۰۰ هکتار (۳۷۴۰ کیلومتر مربع) دارد. بارندگی متوسط سالانه حوضه آبخیز حدود ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر است. حداکثر عمق آب در بهار ۲/۵ متر در قسمت غربی و میزان بارندگی در این منطقه سالانه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر است. متوسط آورد رودخانه‌های منتهی به تالاب سالانه برابر با ۱۷۲۰ میلیون مترمکعب است که در ۵۲ درصد آن به بخش مرکزی، ۴۴ درصد به بخش شرقی و ۴ درصد باقیمانده به بخش غربی تالاب می‌ریزد (جایکا، ۲۰۰۵).

در جدول ۱ مشخصات زیرحوضه‌ها و رسوب معلق انتقالی در رودخانه‌های ورودی به تالاب انزلی آمده است (اطلاعات از آب منطقه‌ای استان گیلان دریافت شده است). همان‌گونه که مشاهده می‌شود زیرحوضه پسیخان دارای بیشترین مساحت معادل ۷۹۵ کیلومتر مربع و زیرحوضه‌های بخش غربی نسبت به بخش شرقی دارای مساحت بیش‌تری هستند و رسوب سالانه این بخش بسیار بالا است. بیش‌ترین و کم‌ترین بار رسوب سالانه در رودخانه پسیخان معادل ۱۸۸۳۴۹ و کلسر با مقدار ۴۰۲۵۱ تن در سال است. تغییرات رسوب ویژه در زیرحوضه‌های مورد مطالعه از ۱۲۵ تا ۳۳۵ تن در سال در کیلومتر مربع است. علت این تغییرات زیاد در رسوب ویژه را می‌توان به وسعت تحت پوشش، زمین‌شناسی و فرسایش در بالادست هر ایستگاه نسبت داد.

شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز و استفاده از روش‌های دقیق و کم هزینه برای برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب و زمین به منظور برآورد پیامدها، خسارات و ارائه راه‌کارهای مناسب برای کاهش این خسارات امری ضروری است. اولین قدم در این خصوص را می‌توان به شناخت دقیق و کافی از وضعیت هیدرولوژیکی حوضه نسبت داد. پهنه آبی تالاب انزلی یکی از نقاط استثنایی و بسیار جالب در جهان است که حفاظت و مدیریت آن از نظر زیست محیطی بسیار حائز اهمیت است. این تالاب با ویژگی‌های منحصر به فرد خود در برقراری توزان اکولوژیکی ماهیان، جانوران و پرندگان مهم است و یکی از بزرگترین زیستگاه‌های تخم‌ریزی ماهیان مهم تجارتي در گذشته بوده است. این تالاب محل تخم‌ریزی آبریان به ویژه ماهیان سفید و پناهگاه و زیستگاه پرندگان بومی و مهاجر است. در این تالاب بیش از ۱۸۹ گونه پرنده، ۶۰ گونه ماهی و صدها گونه مختلف از گیاهان و جانوران زندگی می‌کنند و به همین دلیل، از مهم‌ترین تالاب‌های جهان محسوب می‌شود که از سال ۱۳۵۴ جزو تالاب‌های بین‌المللی تحت حفاظت واقع شده و مهم‌ترین منبع تکثیر و تولید ماهیان خاویاری و استخوانی دریای خزر است. تالاب به لحاظ قرار گرفتن در یک منطقه پر جمعیت، انواع گوناگون آلاینده‌ها را از طریق رودخانه‌های منتهی به آن دریافت می‌کند. رشد فزاینده‌ی جمعیت شهرستان‌های رشت و انزلی که تقریباً نیمی از جمعیت استان گیلان را در خود جای داده است بر اکوسیستم تالاب اثر سو داشته است. بیش از ده رودخانه‌ی مهم به تالاب وارد می‌شود که این رودخانه‌ها از مناطق صنعتی، شهری و کشاورزی گذشته و به سبب ورود فاضلاب‌های گوناگون این مناطق دارای سطح آلودگی بالایی هستند. مهم‌ترین مشکل در تالاب انزلی ورود حجم بسیار زیادی از رسوب بالادست به آن است که باعث آلودگی و کاهش عمق این تالاب شده است. با توجه به پژوهش‌های (Asadi (2016) و Ebrahimi et al. (2022 a,b) نشان داده شده است که از نظر ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه پسیخان مهم‌ترین حوضه در آبخیز تالاب انزلی است. در حوضه پسیخان طی سال‌های اخیر تغییرات کاربری اراضی مشهود بوده و افزایش ساخت و ساز در منطقه به چشم می‌خورد، افزایش ساخت و سازها سبب افزایش تولید رسوب در حوضه و در نهایت انتقال آنها به تالاب انزلی خواهد شد. همچنین مشاهده شده است که در بخش جنوبی حوضه جنگل‌تراشی و تخریب مراتع با شدت زیادی در حال وقوع است. با توجه به اهمیت این حوضه در آبخیز تالاب انزلی بررسی و مدل‌سازی ویژگی‌های هیدرولوژیکی آن دارای اهمیت بسیار زیادی

Table 1- Average discharge and sediment load of major rivers inflowing into Anzali Wetland

جدول ۱- میانگین دبی و رسوب رودخانه‌های اصلی ورودی به تالاب انزلی

River	Area (km ²)	Sediment Yield (ton / year km ²)	Annual sediment load (tons / year)	Bed load (tons / year)	Suspended load (tons / year)
Pasikhan	795	236	188349	24567	163781
Shakhezr	443	177	78606	10253	68353
Masuleh roud khan	400	246	87453	11407	76046
Pirbazar	368	207	76591	9990	66601
Chafroud	136	335	45828	5978	39850
Kolsar	257	156	40251	5250	35001
Khalkaie	342	227	77911	10162	67749
Morghak	308	239	73927	9643	64284
Bahmbar	116	125	14627	1908	12719

در جدول ۲ مشخصات فیزیوگرافی حوضه پسیخان نمایش داده شده است. طول اصلی رودخانه پسیخان از سرشاخه تا تالاب انزلی ۹۹/۵ کیلومتر است و وسعت حوضه ۸۲۵ کیلومتر مربع است. میانگین ارتفاع آن ۴۷۵/۷ متر است. ضرایب شکل حوضه مورد مطالعه شامل ضریب گراولوس برابر با ۱/۵۷ است. همچنین، زمان تمرکز به روش چاو، کریچ و کالیفرنیا نیز به ترتیب برابر ۴۱/۳۶، ۲۹/۷۰ و ۴۰/۴۶ دقیقه است. دمای متوسط، جمع بارش سالانه و تبخیر و تعرق در حوضه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱۰/۸ درجه سانتی‌گراد، ۱۱۶۳ میلی‌متر و ۸۷۲ میلی‌متر است. از نظر زمین‌شناسی این حوضه به سه بخش کوهستان، دشت و رودخانه تقسیم می‌شود که سن بخش کوهستانی به دوران ژوراسیک و پالئوزویک و بخش رودخانه به دوران کواترنری بر می‌گردد.

۲-۱-۲- حوضه پسیخان

رودخانه پسیخان مهمترین رودخانه در حوضه آبریز تالاب انزلی در استان گیلان واقع در شمال ایران است. دو شاخه اصلی و کوهستانی آن، رودخانه مبارک آباد و علیسرا است که هر دو از ارتفاعات کوه‌های در بخش جنوبی حوضه که ارتفاعی حدود ۲۸۶۷ متر دارند، سرچشمه می‌گیرند. این ارتفاعات در ۴۴ کیلومتری شهرستان شفت واقع شده است. دو شاخه مذکور در جهت شمال-شمال شرقی جریان یافته و در حدود ۱۹ کیلومتری جنوب غرب شهر رشت به هم پیوسته و رودخانه پسیخان را تشکیل می‌دهند. حوضه آبخیز رودخانه پسیخان و زیر حوضه‌های آن در ۳۳۴۷۳۵ تا ۳۷۹۶۳۷ طول شرقی و ۴۱۲۹۴۹۲ تا ۴۱۸۶۷۷۴ عرض شمالی در سیستم UTM واقع شده است (شکل ۱).

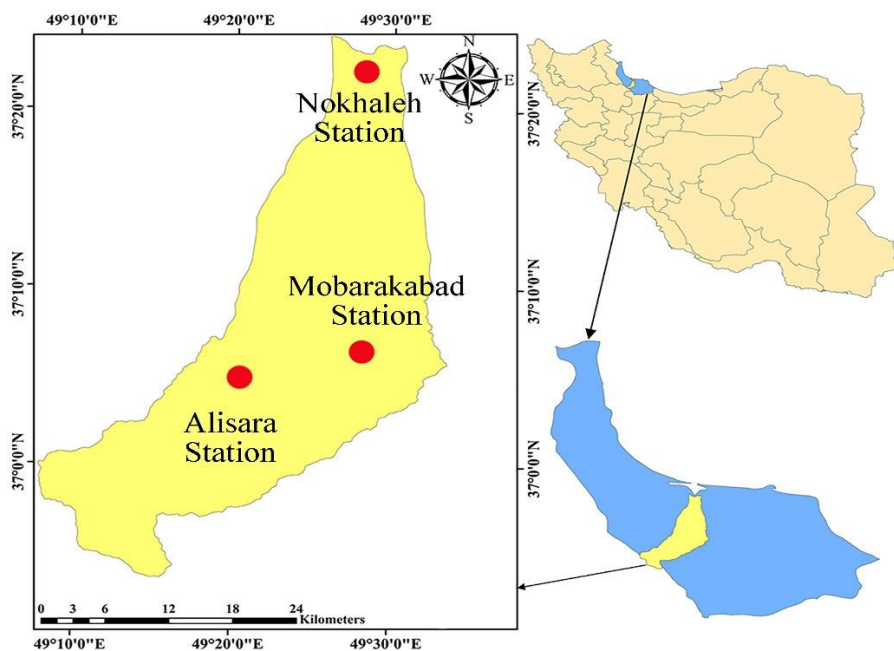


Fig. 1- The location of Pasikhan watershed and its hydrometric stations

شکل ۱- موقعیت حوضه پسیخان و ایستگاه‌های هیدرومتری آن

سالانه برای ایستگاه نوخاله ۳۳/۴ متر مکعب بر ثانیه بوده است، چراکه در این ایستگاه متوسط بارندگی سالانه ۱۱۰۴/۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است و در مقایسه با سایر ایستگاه بالاترین مقدار است (جدول ۳). همچنین، دلیل دیگر بالا بودن آبدهی سالانه در ایستگاه نوخاله را می‌توان به مساحت زیاد تحت پوشش آن نسبت به دو ایستگاه دیگر نسبت داد.

۲-۳- مدل‌سازی

در شکل ۲ مراحل مدل‌سازی این پژوهش نمایش داده شده است. به این صورت که ابتدا ورودی‌های مورد نیاز شامل نقشه‌ها و اطلاعات طولانی مدت مورد نیاز تهیه شد. در گام بعدی ساختار مدل SWAT بر اساس هدف و شرایط حوضه پایه‌ریزی شد. سپس اثر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی در سالیان مختلف بر روی ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از معیارهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۴- تغییرات کاربری اراضی

در پژوهش حاضر، برای شناسایی تغییرات محدوده مورد مطالعه از مقایسه تصاویر طبقه‌بندی شده استفاده شد؛ زیرا این روش بهترین روش شناسایی تغییرات در دو زمان مختلف است که در آن مقدار و نوع تغییرات در تصاویر به دست می‌آید.

بستر رودخانه دارای رسوبات دانه درشت، تخته سنگ، قلوه سنگ مخلوط با رسوبات ریز به شکل شن، ماسه، رس و سیلت است، دیواره بستر ناپایدار بوده و کف بستر و کناره رودخانه در حال فرسایش است (Ebrahimi et al., 2022 a,b).

زیرحوضه مبارک آباد در شرق رودخانه سیامزگی واقع است که محل سرچشمه آن کوه خرکش با ۲۴۰۳ متر ارتفاع و جهت کلی این رودخانه جنوب به شمال است. زیر حوضه مبارک آباد در ۳۴۷۶۳۹ تا ۳۵۳۶۰۳ متر طول شرقی و ۴۰۹۰۷۴۶ تا ۴۰۹۸۹۰۷ متر عرض شمالی در سیستم UTM واقع شده است. زیرحوضه علیسرا در بخش جنوب غربی حوضه پسیخان در ۳۳۴۳۸۰ تا ۳۵۱۷۶۵ متر طول شرقی و ۴۰۸۵۷۱۸ تا ۴۱۰۸۲۳۸ متر عرض شمالی در سیستم UTM واقع شده است.

۲-۲- اطلاعات پایه

برای اعتبارسنجی مدل‌ها از اطلاعات بلند مدت (۱۹۹۹-۲۰۲۲) دبی و رسوب رودخانه پسیخان که از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان دریافت شد، استفاده شد. همچنین، تغییرات بارش، دما، مدیریت مزرعه و عملکرد محصول در سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۲۲ به عنوان ورودی‌های مدل از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان جمع‌آوری شد. در جدول ۳ مشخصات جریان و رسوب در سه زیرحوضه به تفکیک نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقدار آبدهی

Table 2- General characteristics of Pasikhan watershed

جدول ۲- برخی مشخصات زیرحوضه‌های پسیخان

Station	Area (km ²)	Circumference (km)	Length of watershed (km)	Gravlius coefficient	Average height (m)	Watershed average slope (m m ⁻¹)	Main river length (km)
Nokhaleh	825	163.92	53.75	1.57	475.7	19.62	99.5
Mobarakabad	111.5	45.5	16.55	1.21	1238.5	37.6	17.93
Alisara	184.2	71	23.75	1.46	1626	41.5	29.98

Table 3- Statistics of suspended sediment load and runoff in three hydrometric stations in Pasikhan watershed

جدول ۳- آمار بار رسوب معلق و آبدهی در سه ایستگاه هیدرومتری حوضه پسیخان

Station	Minimum of suspended sediment load	Mean of suspended sediment load	Maximum of suspended sediment load	Minimum of annual flow rate	Mean of annual flow rate	Maximum of annual flow rate	Mean of annual rainfall
	thousand tons per year			m ³ s ⁻¹			mm
Nokhaleh	74.4	196.9	407.4	14.3	22.2	33.4	1104.8
Mobarakabad	0.8	66.6	223.1	2.9	4.2	6.19	908.4
Alisara	0.5	31.31	185.0	1.21	3.02	5.06	844.3

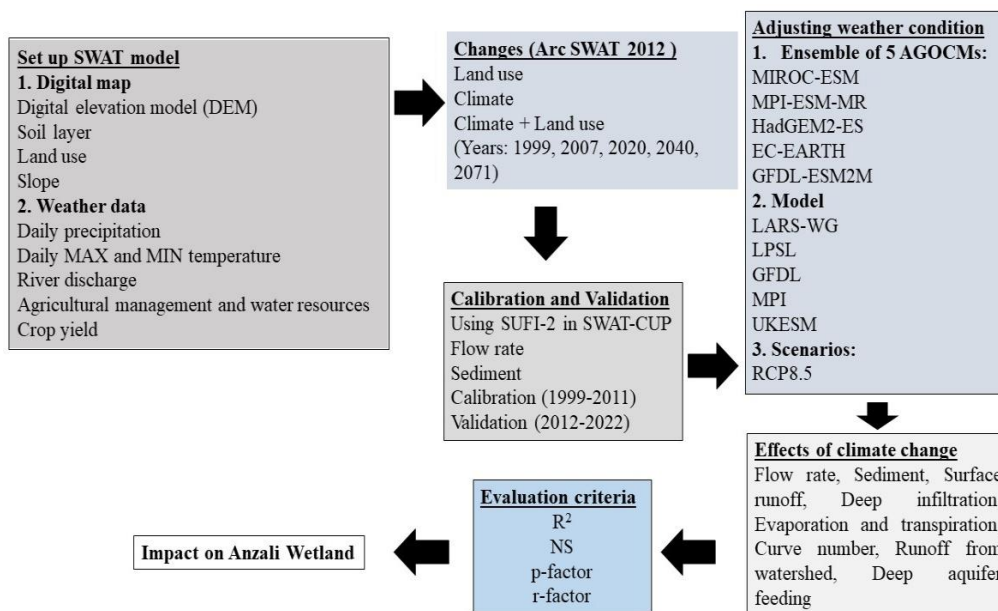


Fig. 2- The modeling process of the present study

شکل ۲- روند انجام مدل سازی مطالعه حاضر

زنجیره مارکوف، این بار ماتریس احتمال انتقال با استفاده از سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۷ به دست آمد. با قرار دادن نقشه کاربری سال ۲۰۲۲ به عنوان سال مبدا و ماتریس احتمال انتقال بین سال‌های گذشته اقدام به پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ در مدل CA-Markov شد.

دقت طبقه‌بندی با استفاده از دقت کلی و ضریب کاپا مورد ارزیابی قرار گرفت. دقت کلی و ضریب کاپا برای تصاویر طبقه‌بندی شده در جدول ۴ ارائه شده است. صحت بالاتر از ۸۵ درصد می‌تواند برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای مناسب باشد. پس با توجه به نتایج، این الگوریتم روش مناسبی برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد نظر است (Coles, 2001; Lu et al., 2004; Langat et al., 2019).

ماتریس احتمال انتقال برای تهیه نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ با استفاده از نقشه‌های مربوط به کاربری سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۸۶ به ترتیب در جدول ۵ بر اساس خروجی از زنجیره مارکوف به دست آورده شده است.

طبقه‌بندی در این روش به این صورت است که تصاویر کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۷، ۲۰۲۲ و نقشه‌های پیش‌بینی شده کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ جداگانه در نظر گرفته می‌شوند، سپس، آنها را بر روی هم دیگر انطباق داده و بدین وسیله تغییرات به وجود آمده تشخیص داده می‌شود. به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی بر اساس نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۲ و عوامل مؤثر بر این تغییرات، از برنامه مدل‌ساز تغییر زمین مدل سلول‌های خودکار مارکوف در نرم‌افزار TerrSet که نسخه جدید نرم‌افزار Idrisi Selva است، استفاده شد (El-Hamid et al., 2022; Ghonchepour et al., 2023; Atef et al., 2023). نقشه‌های کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۲ و نقشه پیش‌بینی شده سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ برای استخراج ماتریس احتمال تغییر وضعیت کاربری‌ها با استفاده از روش زنجیره مارکوف مورد استفاده قرار گرفت. بعد از ارزیابی ضریب کاپا و قابل قبول بودن نتایج آن، مجدداً با اجرای مدل CA-Markov (مدلی هیبرید از سلول‌های خودکار و سیستم مارکوف) جهت تهیه نقشه کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ اقدام شد. با این تفاوت که با کمک مدل

Table 4- Classification results of Pasikhan watershed images with maximum likelihood estimation

جدول ۴- نتایج طبقه‌بندی تصاویر حوزه پسیخان با الگوریتم حداکثر احتمال

	Land use 1999	Land use 2007	Land use 2020	Land use 2040	Land use 2071
Overall accuracy (%)	97	91.61	99.14	93.4	90.7
Kappa coefficient	0.90	0.87	0.96	0.92	0.91

Table 5- Transition probability matrix of Markov chain

جدول ۵- ماتریس احتمال انتقال خروجی از زنجیره مارکوف

Land use	Water bodies	Water bodies	Undisturbed Pasture	Moderate Pasture	Degraded Pasture	Forests	Bare	Urban	Total
Urban	0.0687	0.0000	0.0000	0.0151	0.0004	0.0000	0.0000	0.9153	1
Bare	0.0000	0.0034	0.0007	0.0452	0.6887	0.2311	0.0308	0.0000	1
Forests	0.0000	0.0006	0.0011	0.2501	0.6511	0.0928	0.0043	0.0000	1
Degraded Pasture	0.0891	0.0063	0.0009	0.4428	0.4188	0.0354	0.0020	0.0048	1
Moderate Pasture	0.3772	0.0142	0.0002	0.4041	0.1144	0.0069	0.0005	0.0825	1
Undisturbed Pasture	0.3907	0.0048	0.0945	0.0000	0.1131	0.2245	0.1665	0.0059	1
Rice field	0.0513	0.5124	0.0005	0.0729	0.2897	0.0679	0.0043	0.0010	1
Water bodies	0.8913	0.0023	0.0007	0.0523	0.0249	0.0050	0.0010	0.0228	1

سناریوی RCP8.5 بدون اتخاذ هیچ گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر این سناریو پیش خواهد رفت. به طوریکه ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و همچنان روند افزایش خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایشی گازهای گلخانه‌ای است.

برای پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۹۹ نیاز به ماتریس احتمال انتقال و نقشه سال مبنا (نقشه سال ۱۳۸۶) جهت مدل‌سازی است. با وارد کردن این ورودی‌ها در مدل CA-Markov نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ و ۲۰۷۱ تولید شد. تصاویر احتمال شرطی حاصل از تحلیل زنجیره مارکوف، از ماتریس احتمال انتقال به دست آمده است، احتمال اینکه هر نوع پوشش زمین در هر موقعیت مکانی در آینده پیدا شود را بیان می‌کند که بر اساس دو تصویر پوشش زمین قبلی نقشه‌سازی شده است.

۵-۲- تغییرات اقلیمی

در پژوهش‌های زیادی، پیش‌بینی مدل‌های GCM بزرگترین عامل عدم قطعیت در ارزیابی آثار تغییر اقلیم شناخته شده است (Serrat-Capdevila et al., 2007). در این مطالعه، جهت تولید اطلاعات بارش برای دوره آینده از خروجی پروژه CMIP5 که شامل اطلاعات روزانه بودند، مدل MR-ESM-MPI مد نظر قرار گرفت این مدل توسط مرکز تحقیقات آب و هوایی ماکس پلانک آلمان با قدرت تفکیک مکانی (LLon**lat) 1.875*1.85 تهیه و توسعه یافته است.

به منظور بررسی تغییرات اقلیم در آینده، دو متغیر بارندگی و دما با مقیاس زمانی ماهانه، با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو برای دو دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۹) و دوره آتی (۲۰۷۱-۲۰۲۲) تولید شد. مقایسه خروجی‌های دما و بارندگی در دوره پایه و آتی منجر به تولید سناریوی تغییر اقلیم (RCP8.5) خواهد شد که این سناریو به منظور ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل LARS-WG مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، خروجی‌های مدل‌های GCM در دوره آتی، پس از ریزمقیاس‌شدن جهت شبیه‌سازی جریان در آینده، به مدل بارش-رواناب معرفی می‌شوند. در حال حاضر ۲۱ مدل اقلیمی عمومی در نقاط مختلف جهان مورد استفاده یا در حال توسعه است. در این مطالعه به منظور ریزمقیاس‌کردن خروجی مدل‌های GCM از یکی از مدل‌های مولد آب و هوا (مدل LARS-WG) استفاده شد. کوچک مقیاس کردن آماری سری‌های روزانه داده‌های بارش و دمای حداکثر از مدل AOGCM در دوره‌های آتی برای منطقه مورد مطالعه توسط مدل LARS-WG در سه مرحله مجزا انجام می‌شود.

۶-۲- مدل SWAT

در این مطالعه از مدل Arc Swat 2012 استفاده شد که پس از نصب به عنوان یک مدل اضافه شده تحت نرم‌افزار Arc Gis10.3 قرار گرفت. اجرای مدل در محیط Arc GIS انجام گرفت. در مرحله نخست نقشه رقومی وارد و تولید شبکه جریان توسط خود مدل، بر اساس حد آستانه ۱۴۰۰۰ هکتار به عنوان حداقل سطح زهکشی و ایستگاه هیدرومتری نوخاله به عنوان خروجی معرفی شد. پس از ترسیم مرز حوضه، زیرحوضه و شبکه جریان، پارامترهای فیزیکی مربوط به حوضه

و هر زیر حوضه شامل: مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب، خصوصیات ارتفاعی و غیره محاسبه شد. در مرحله بعد، نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به مدل وارد شدند و طبقات شیب نیز توسط کاربر تعریف شدند و با ترکیب آنها واحدهای واکنش هیدرولوژی (HRU¹) در هر زیر حوضه تولید شد. در این مطالعه ۳ کلاس شیب (۰-۹/۵، ۹/۵-۲۴، ۲۴-۹/۵ > درصد) به مدل معرفی شد.

در گام بعدی، داده‌های اقلیمی شامل اطلاعات بارش و درجه حرارت روزانه به مدل‌ها وارد شده و روش مناسب برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، بر اساس نوع داده‌های اقلیمی در دسترس، تعیین می‌شود. در این مطالعه، از روش هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1982, 1985) برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. برای روندیابی جریان از روش ضریب ذخیره متغیر و روش ماسکینگام^۲ (McCarthy, 1938) استفاده شد. همچنین، اطلاعات مدیریتی از جمله کاشت، کوددهی، زمان آبیاری و برداشت محصولات غالب حوضه به مدل‌ها معرفی گردید (Guilan Province Agricultural Jihad Organization, 2021). در گام پایانی، مدل برای شبیه‌سازی دبی جریان ماهانه با در نظر گرفتن سه سال برای آماده‌سازی (گرم کردن^۳) اجرا شد.

۷-۲- تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

برای انجام تحلیل حساسیت از رابطه حساسیت نسبی ارائه شده توسط Feyereisen et al. (2007) استفاده شد. برای تعیین مقادیر ورودی هر پارامتر، دامنه تغییر آن مشخص و در این دامنه چهار عدد با فاصله گام‌های مختلف انتخاب و پس از آرایه آن‌ها به مدل، شبیه‌سازی انجام شد. شاخص حساسیت نسبی (Sr) بیانگر نسبت تغییر تابع خروجی در قبال تغییر پارامترهای ورودی است (رابطه ۱):

$$Sr \cong \frac{[(Q_{P+\Delta P}) - (Q_{P-\Delta P})/Q_P]}{2\Delta P/P} \quad (1)$$

که در آن، Sr بیانگر حساسیت نسبی، P مقدار پارامتر و Q مقدار تابع هدف استخراج شده از نتیجه مدل است.

پس از انجام مرحله تحلیل حساسیت به کمک نرم‌افزار SWAT-CUP، از الگوریتم SUFI-2 موجود در نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی مدل استفاده شد. برای انجام واسنجی، نیاز است که نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای که در ایستگاه خروجی حوضه آبریز اندازه‌گیری شده است سنجیده شود. در نتیجه، از اطلاعات دبی و غلظت رسوب ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه نوخاله (۲۰۱۱-۱۹۹۹) برای واسنجی و برای اعتبارسنجی (۲۰۲۲-۲۰۱۲) استفاده شد.

و از ضریب NS به عنوان تابع هدف برای بهینه‌سازی استفاده شد. عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی مدل نیز توسط عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد (۹۵ ppu) محاسبه شد. وقتی میزان دو فاکتور p-factor و r-factor قابل قبول باشد، مطلوبیت بیشتر مدل را می‌توان با R² و ضریب NS ارزیابی کرد. از شاخص‌های R² و NS نیز جهت ارزیابی کارایی مدل در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. واسنجی هر دوره با چند تکرار^۴ صورت گرفت؛ به این صورت که در اولین تکرار به پارامترها مقادیر اولیه نسبت داده شد و ۵۰۰ دوره شبیه‌سازی در هر تکرار انجام پذیرفت. پس از اتمام تکرار اول، مقادیر معیارهای NS و R² بررسی شد و مقادیر پارامترها در بهترین دوره شبیه‌سازی، به عنوان مقادیر اولیه پارامترها در تکرار بعدی جایگزین شدند. این فرآیند تا دستیابی به دقت مناسب در تخمین رواناب خروجی حوضه ادامه پیدا کرد.

۸-۲- معیارهای ارزیابی مدل

به طور کلی، معیارهای ارزیابی کارایی مدل‌ها، معیارهایی ریاضی هستند که برای بیان میزان هم‌خوانی مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر مشاهده‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه از دو معیار مرسوم برای ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژی، ضریب تبیین (R²) و معیار نش و ساتکلیف (NS)، جهت مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده و سنجش دقت SWAT در برآورد رواناب استفاده شد. مقدار عددی ضریب نش و ساتکلیف از منفی بینهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هر چه به یک نزدیکتر باشد بیانگر آن است که مدل برآورد بهتری داشته است. عموماً اگر معیار NS بیشتر از ۰/۷۵ باشد کارایی مدل خوب، اگر بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۵ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$R^2 = \frac{[\sum_1(Q_{m,1} - \overline{Q_m})(Q_{s,1} - \overline{Q_s})]^2}{\sum_1(Q_{m,1} - \overline{Q_m})^2 \sum_1(Q_{s,1} - \overline{Q_s})^2} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_1(Q_m - \overline{Q_i})^2}{\sum_1(Q_{m,1} - \overline{Q_m})^2} \quad (3)$$

در این معادلات Q_m نشان دهنده مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر رسوب یا دبی، Q_s مقدار برآورد شده پارامتر و $\overline{Q_m}$ مقدار میانگین پارامتر اندازه‌گیری شده و $\overline{Q_s}$ مقدار میانگین پارامتر برآورد شده است.

بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 در برنامه SWAT-CUP انجام شد. در برنامه SUFI2 یک دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته شد که در هنگام واسنجی سعی شد پارامترها در این محدوده قرار گیرند که

به آن دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) گفته می‌شود، برای کمی کردن میزان دقت واسنجی یا عدم قطعیت دو شاخص p-factor و r-factor استفاده شد (Abbaspour, 2011; Rouholahnejad et al., 2012).

p-factor عبارت است از درصدی از داده‌های مشاهداتی که داخل باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند (Abbaspour, 2011). که هرچه مقدار این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد شبیه‌سازی با دقت بیشتری انجام شده است. r-factor عبارت است از متوسط ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ درصد تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است. هر چه این ضریب به صفر نزدیک‌تر باشد، شبیه‌سازی بهتری صورت گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کاربری اراضی

به منظور بررسی روند تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز پسیخان از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ استفاده شد. محدوده مورد نظر از روی تصاویر برش داده شد و سپس تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری بر روی تصاویر ماهواره‌ای انجام شد. پس از تصحیحات، با انتخاب ترکیب رنگی مناسب از تصاویر، لایه‌ها برای ورود به الگوریتم حداکثر احتمال برای انجام عملیات طبقه‌بندی مورد استفاده قرار داده شد. برای این منظور نیاز به داشتن نمونه‌های تعلیمی بود. این نمونه‌ها از تصاویر رنگی کاذب داده‌های ماهواره‌ای هر سه سنجنده مورد استفاده، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای موجود در نرم‌افزار Google Earth و داده‌های میدانی به دست آمدند. در نمونه‌های تعلیمی سعی بر آن بود که از پراکنش مناسبی در مرز مطالعاتی برخوردار باشد. سپس در محیط نرم‌افزار Envi 5.3 پس از جمع‌آوری نمونه‌های آموزشی، نمونه‌ها بر سطح تصاویر پیاده شد. روی تصاویر طبقه‌بندی شده حاصل از الگوریتم حداکثر احتمال فیلتر Majority با ابعاد ۳×۳ اعمال شد و پیکسل‌های منفرد تصاویر حذف گردید. طبقه‌بندی تغییرات پوشش کاربری اراضی در هشت کلاس شالیزار، زمین بایر، جنگل، مرتع با پوشش فقیر، متوسط و متراکم، مسکونی و نواحی آبی استخراج شد. ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده در سال‌های مورد بررسی با استفاده از برداشت نقاط کنترل زمین (بیش از ۱۰۰ پلیگون به صورت تصادفی) انجام شد که در اینجا منظور همان نمونه‌های گرفته شده پس از انجام طبقه‌بندی است. نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های مختلف در شکل ۳ نمایش داده شد. با بررسی روند

تغییرات اراضی شالیزار در سال‌های مورد مطالعه نشان داده می‌شود که این کاربری با کاهش شدیدی روبه‌رو خواهد بود، از سال ۲۰۲۱ با ۴۱۰ کیلومترمربع تحت کشت برنج به ۳۶۴ کیلومترمربع در سال ۲۰۷۰ خواهد رسید. همچنین کاربری مسکونی در سال ۲۰۲۱ برابر ۸ درصد از حوضه را شامل بوده که این مقدار در سال ۲۰۷۰ به ۲۱ درصد خواهد رسید.

۳-۲- آنالیز حساسیت مدل SWAT

در این مطالعه قبل از مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ابتدا توسط نرم‌افزار SWAT-CUP و با انجام تحلیل حساسیت به روش تحلیل حساسیت جامع، پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر دبی خروجی از حوضه داشتند، مشخص شدند. از میان ۴۷ پارامتر مورد بررسی در این مطالعه، مدل نسبت به ۳۳ پارامتر حساسیت نشان داده و به عنوان متغیرهای مؤثر بر شبیه‌سازی جریان و رسوب در حوضه مورد مطالعه مشخص شدند که در جدول ۶ آورده شده است. Omani et al. (2006) نیز گزارش کردند که حساس‌ترین پارامترها در تخمین رواناب شماره منحنی (CN) است. (Reungsong et al. (2010) نیز بیان کردند که پارامتر CN حساس‌ترین پارامتر در آنالیز حساسیت بوده است.

۳-۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل

نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی در دوره‌های شبیه‌سازی در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشند. تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای پارامترهای R^2 و NS ارائه نشده است؛ اما (Moriyas et al. (2007) پیشنهاد می‌کند که مقادیر NS در مطالعات هیدرولوژیک و همچنین فرآیندهای مربوط به انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه باید از ۰/۵ بزرگتر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول قلمداد نمود که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شد که نتایج شبیه‌سازی در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی جریان و رسوب توانایی قابل قبولی داشته است. (Moriyas et al. (2007) یک طبقه‌بندی برای عملکرد مدل با استفاده از R^2 و NS ارائه کرد، این پژوهشگران بیان کردند که اگر NS بین ۰/۷۵ تا ۱ عملکرد مدل بسیار خوب است و اگر بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ باشد عملکرد مدل خوب است، با توجه به طبقه‌بندی این پژوهشگران نتایج عملکرد این مدل در سطح قابل قبولی قرار دارد.

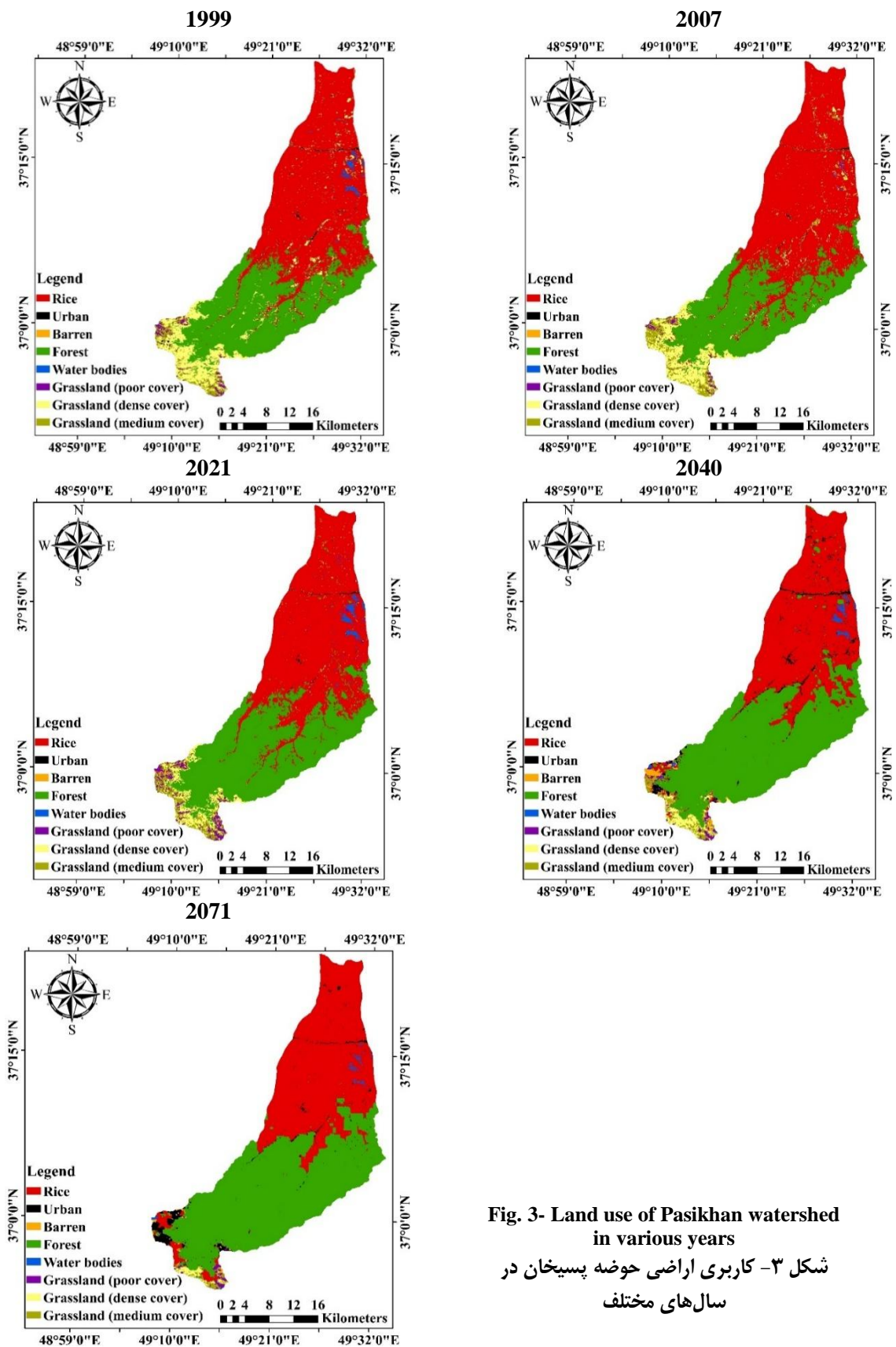


Fig. 3- Land use of Pasikhan watershed in various years

شکل ۳- کاربری اراضی حوضه پسیخان در سال‌های مختلف

Table 6- Sensitivity analysis of the investigated model

جدول ۶- تحلیل حساسیت مدل مورد بررسی

Row	Parameter	Range		Description
		Max	Min	
1	r_CN2.mgt	0.8	-0.8	CN
2	v_SMTMP.bsn	5	-5	Snow melting base temperature
3	v_SMFMN.bsn	10	0.00	December 21 snow melt factor
4	v_REVAPMN.gw	200	0.00	Threshold depth of water in a shallow aquifer to penetrate a deep aquifer
5	v_RCHRG_DP.gw	1	0.00	Aquifer permeability coefficient
6	v_SLSUBBSN.hru	150	10	Average slope length
7	v_GW_DELAY.gw	60	0.00	Delay time to feed the aquifer
8	v_CH_K2.rte	150	0.00	Effective hydraulic steering in the main channel
9	v_ESCO.hru	1	0.01	Evaporation compensation factor from soil
10	r_HRU_SLP.hru	0.6	0.00	Average steepness of the slope
11	v_ALPHA_BF.gw	1	0.00	Base flow factor
12	r_SOL_BD().sol	0.4	-0.4	Bulk density of soil
13	r_SOL_AWC().sol	0.5	-0.5	Average usable water
14	r_SOL_K().sol	0.8	-0.8	Hydraulic conductivity of soil saturation
15	v_SFTMP.bsn	5	-5	Snowfall temperature
16	v_ALPHA_BNK.rte	1	0.00	Base flow coefficient for coastal storage
17	v_LAT_TTIME.hru	180	0.00	Lateral flow travel time
18	v_PLAPS.sub	100	0.00	Rainfall gradient
19	v_TLAPS.sub	8	-4	Temperature gradient
20	r_PCPMM().wgn	0.5	-0.5	Average total monthly precipitation during the forecast period
21	V_CH_EQN.rte	4	0.00	Sediment trending method
22	V_ADJ_PKR.bsn	2	0.5	Peak speed adjustment factor for sediment trending in the sub-basin (sub-channels)
23	V_CH_COV1.rte	0.6	-0.05	Channel erodibility factor
24	V_CH_COV2.rte	1	0.00	Channel coverage factor
25	V_CH_BNK_BD.rte	1.9	1.1	The bulk density of channel bank sediment
26	V_CH_BED_BD.rte	1.9	1.1	The bulk density of channel bed sediment
27	V_SPEXP.bsn	1.5	1	A parameter to calculate re-sediment in channel sediment trends
28	V_CH_BNK_D50.rte	10000	1	D50 average diameter of channel sediment particles (mm)
29	V_CH_BED_D50.rte	10000	1	D50 average diameter of channel bed sediment particles (meters)
30	V_SPCON.bsn	0.01	0.0001	A linear parameter used to calculate the maximum amount of sediment that can be contained during channel sedimentation
31	V_CH_BNK_TC.rte	400	0.00	Critical shear stress of channel surface
32	V_CH_BED_TC.rte	400	0.00	Critical shear stress of channel bed
33	V_CH_BED_KD.rte	3.7	0.001	Erodibility of channel bed sediment by jet test

نشان می‌دهد که با وجود چالش‌های فراوان مربوط به اطلاعات ورودی برای حوضه مورد مطالعه، دقت شبیه‌سازی قابل قبول و تقریباً مشابه با نتایج سایر پژوهش‌ها به دست آمده است.

۳-۴- تغییرات دبی و رسوب در سناریوهای مختلف

شکل ۵ نسبت تغییرات جریان در سناریوی RCP8.5 را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد، همان‌طور که مشخص است تولید رواناب در دوره آینده تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه کمتر است و علت این امر را علاوه بر مورد اشاره شده در بالا که تبدیل شالیزارها به مناطق جنگلی از مهمترین عوامل کاهش رواناب است، از موارد دیگر می‌توان به کاهش بارش در آینده هم اشاره کرد. در شکل ۶ نسبت تغییرات دبی جریان در آینده (سال ۲۰۴۰) با دوره‌های پایه بر اساس تغییر نقشه کاربری اراضی مشخص شده است. ترتیب ماه‌ها بر اساس سال آبی بوده و شماره یک مربوط به شهریورماه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت تغییرات بر اساس تأثیر تغییر کاربری در دبی جریان چشم‌گیر نیست.

Abaspour (2015) جهت شبیه‌سازی رواناب برای p-factor بیش از ۰/۷ درصد و برای r-factor اعداد نزدیک به یک را پیشنهاد کرد، بنابراین ضرایب به دست آمده کارایی مدل SWAT در جهت شبیه‌سازی رواناب در حوضه پسیخان را به خوبی نشان می‌دهد. Tang et al. (2012) به مدل‌سازی و تحلیل عدم قطعیت رواناب حوضه رودخانه چاو در چین که در معرض کم آبی قرار دارد پرداختند. این پژوهشگران حوضه را با مدل SWAT شبیه‌سازی کرده و واسنجی مدل و آنالیز عدم قطعیت را به وسیله SUFI-2 انجام دادند. نتایج میزان p-factor و r-factor را برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۵ و ۱/۱۲ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۸۳ و ۲/۱۵ به دست آوردند. Tang et al. (2012) برای دوره واسنجی NS و R^2 به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۹۰ و برای اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۷۷ به دست آوردند. بر اساس پژوهش‌های پیشین معیار NS بیشتر از ۰/۵ برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی نتیجه قابل قبولی است (Gassman et al., 2007). بنابراین نتایج این مطالعه در هر دو بخش واسنجی و اعتبارسنجی قابل قبول هستند. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سایر پژوهش‌ها مشابه صورت گرفته در سطح جهان (Bekiaris et al., 2005; Feyereisen et al., 2007; Alansi et al., 2009; Mengistu et al., 2023)

Table 5- Criteria for examining model calibration and validation

جدول ۵- مشخصات آماری برازش مدل برای رسوب و دبی جریان در دو بخش واسنجی و اعتبارسنجی

	Flow rate				Sediment			
	p-factor	r-factor	R ²	NS	p-factor	r-factor	R ²	NS
Calibration	0.63	0.75	0.80	0.80	1	1.1	0.74	0.61
Validation	0.76	0.79	0.61	0.60	0.74	1.01	0.66	0.61

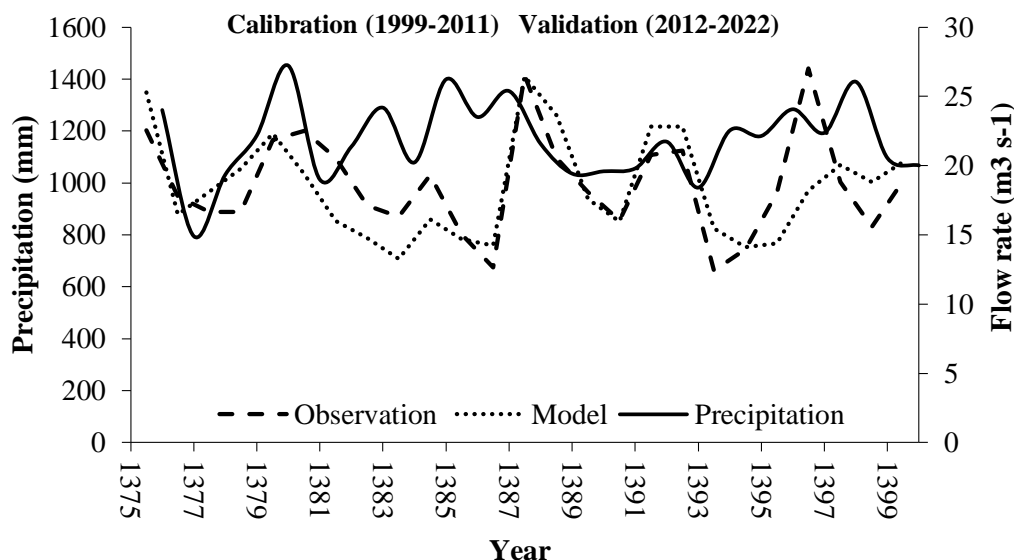


Fig. 4- Calibration and validation of flow rate of Pasikhan river using SUFI-2 algorithm
شکل ۴- واسنجی و اعتبارسنجی دبی جریان رودخانه پسیخان با استفاده از الگوریتم SUFI-2

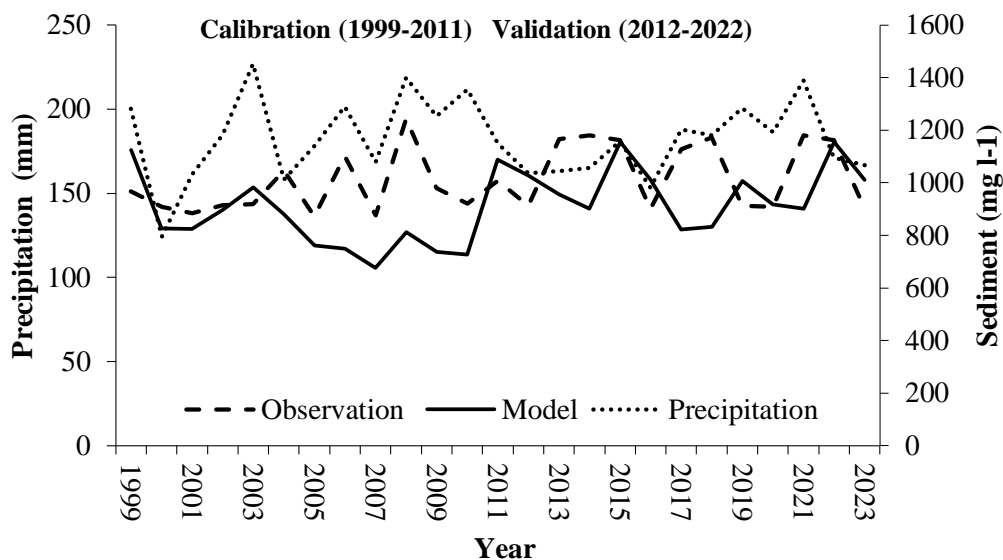


Fig. 5- Calibration and validation of the sediment of the Pasikhan River using the SUFI-2 algorithm
شکل ۵- واسنجی و اعتبارسنجی رسوب رودخانه پسیخان با استفاده از الگوریتم SUFI-2

و کاهش آن تغییراتی همسو نشان داده است. مشاهده می‌شود که در گذشته در سال ۲۰۰۱ مقدار رواناب سطحی در حوضه افزایش چشمگیری معادل ۴۵۴ میلی‌متر داشته است که در همان سال میزان بارندگی ۱۴۵۲ میلی‌متر بوده است که نسبت به سال‌های مجاور بالاتر بوده است. در آینده، در سال ۲۰۵۵ نیز بیشترین رواناب سطحی حوضه برابر با ۴۸۵ میلی‌متر با بارندگی ۱۴۳۱ میلی‌متر رخ خواهد داد. علت افزایش رواناب سطحی در این سال را می‌توان به تغییرات کاربری اراضی از قبیل افزایش کاربری مسکونی و کاهش کاربری اراضی مانند شالیزار (از ۴۱۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۲ به ۳۶۴ کیلومترمربع در سال ۲۰۷۱) نسبت داد.

در شکل ۷ نسبت تغییرات رسوب در سناریو RCP8.5 به نمایش در آمده است. همان‌طور که مشخص است در سناریو RCP8.5 تغییرات رسوب به دوره پایه نزدیک‌تر است و تغییرات غلظت رسوب کمتر از شرایط پایه است.

۳-۵- رواناب سطحی

در شکل ۸ تغییرات رواناب سطحی در حوضه با بارندگی در دامنه زمانی ۱۹۹۹-۲۰۷۱ در سناریو مورد مطالعه آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات رواناب در سناریو وابسته به بارندگی است و با افزایش

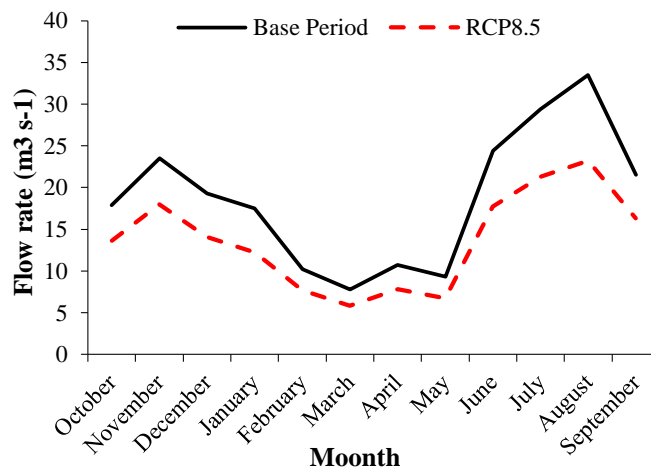


Fig. 6- Flow rate in the RCP8.5 scenarios relative to the base period
شکل ۶- تغییرات جریان در سناریو RCP8.5 نسبت دوره پایه

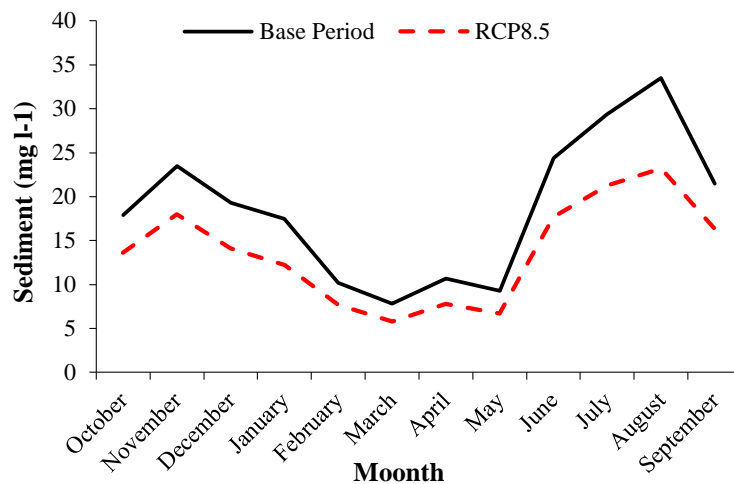


Fig. 7- The sediment changes in the RCP8.5 scenarios relative to the base period

شکل ۷- تغییرات رسوب در سناریو RCP8.5 نسبت دوره پایه

۲۰۷۱-۱۹۹۹ در سناریو RCP8.5 مورد مطالعه آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات نفوذ عمقی همانند رواناب سطحی در سناریو وابسته به بارندگی است و با افزایش و کاهش آن تغییراتی همسو نشان داده است. مشاهده می‌شود که در گذشته در سال ۲۰۱۶ مقدار نفوذ عمقی در حوضه افزایش چشمگیری معادل ۲۳۰ میلی‌متر داشته است که در همان سال میزان بارندگی ۱۱۸۱ میلی‌متر بوده است که نسبت به سال‌های مجاور بالاتر بوده است. در آینده، در سال‌های مختلف مانند ۲۰۲۴، ۲۰۳۰، ۲۰۵۴ و ۲۰۶۸ نیز بیشترین رواناب سطحی حوضه بیش از ۲۰۰ میلی‌متر رخ خواهد داد.

Shaygan et al. (2011) ضمن بررسی مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه طالقان در سال ۲۰۱۰ به این موضوع اشاره کردند. متوسط رواناب ماهانه ایستگاه هیدرومتری ۵/۲۲ مترمکعب بر ثانیه و این مقدار برای رواناب شبیه‌سازی شده اولین اجرای مدل برابر ۲/۸۳ مترمکعب بر ثانیه بود. مدل به میزان ۴۵ درصد رواناب را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرد. بنابراین برای بهبود نتایج اقدام به واسنجی مدل طی دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۸ و صحت‌سنجی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ کردند.

۳-۶- نفوذ عمقی

در شکل ۹ تغییرات نفوذ عمقی در حوضه با بارندگی در دامنه زمانی

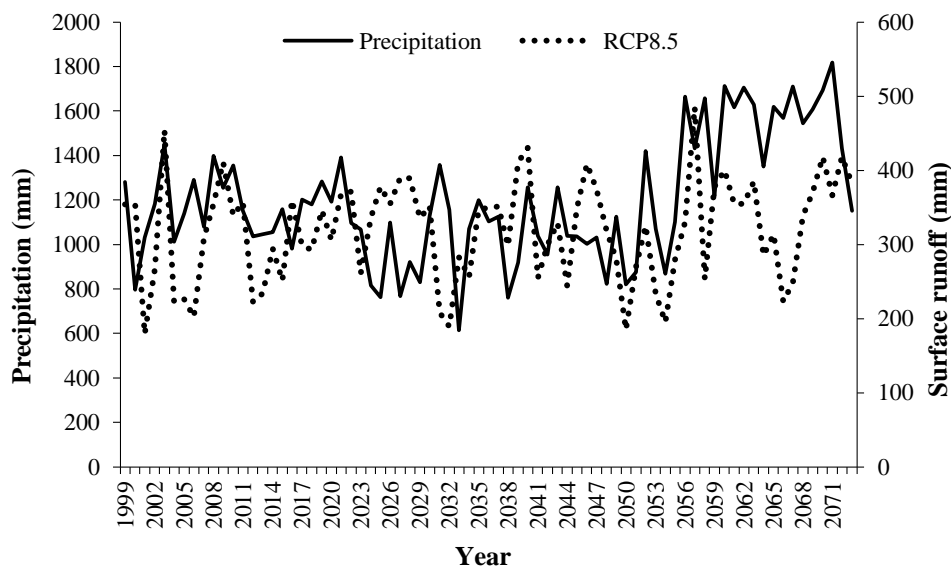


Fig. 8- Changes in surface runoff with precipitation in different years and the studied scenario

شکل ۸- تغییرات رواناب سطحی با بارندگی در سال‌های مختلف و سناریوی مورد مطالعه

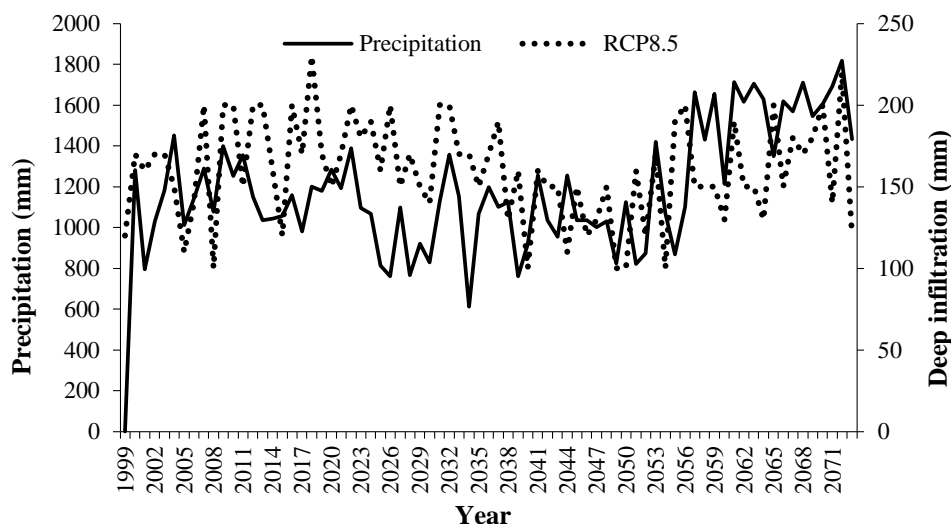


Fig. 9- Changes of deep infiltration with precipitation in different years and the studied scenario
 شکل ۹- تغییرات نفوذ عمقی با بارندگی در سال‌های مختلف و سناریوی مورد مطالعه

نسبتاً نزدیکی را برآورد کرده‌اند.

۷-۳- تبخیر و تعرق

در شکل ۱۰ تغییرات تبخیر و تعرق در حوضه با بارندگی در دامنه زمانی ۱۹۹۹-۲۰۷۱ در سناریو RCP8.5 مورد مطالعه آمده است. کمترین مقدار تبخیر و تعرق در سال ۲۰۶۷ و در سناریو RCP8.5 برابر با ۱۰۵۳ میلی‌متر به دست آمد. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق نیز در سناریو RCP8.5 در سال ۱۹۹۹ برابر ۱۷۰۷ میلی‌متر بوده است. روند تغییرات تبخیر و تعرق در حوضه پسیخان با میزان بارندگی در آن نسبتاً همسو است. مشاهده می‌شود که در سال‌های آتی اختلاف بین مقدار تبخیر و تعرق در سناریو مورد مطالعه کاهش یافته و این دو مقادیر

۸-۳- شماره منحنی

در شکل ۱۱ تغییرات شماره منحنی در حوضه پسیخان با بارندگی در دامنه زمانی ۱۹۹۹-۲۰۷۱ در سناریو RCP8.5 مورد مطالعه آمده است. شماره منحنی هر حوضه نشانگر رفتار هیدرولوژیکی و توان تولید رواناب آن حوضه در مواقع بارندگی است که در آنها، خصوصیات خاک با یک عامل هیدرولوژیکی که نشان‌دهنده حداقل سرعت نفوذپذیری در حالت مرطوب بودن طولانی مدت خاک است، بیان می‌شود.

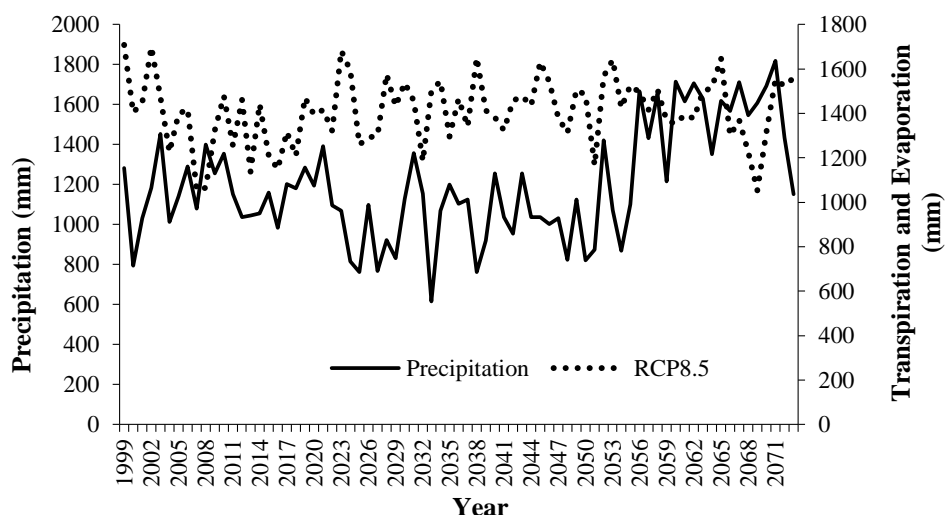


Fig. 10- Changes of evaporation and transpiration with precipitation in different years and the studied scenario

شکل ۱۰- تغییرات تبخیر و تعرق با بارندگی در سال‌های مختلف و سناریوی مورد مطالعه

نسبتاً منطبق است و در سال‌های پایینی دوره مورد مطالعه این تغییرات انطباق بیشتری پیدا کرده است.

مشاهده می‌شود که از سال ۲۰۵۱ در سناریو مورد مطالعه شماره منحنی کاهش یافته است. علت این موضوع را می‌توان به افزایش نسبی نفوذ عمقی آب در حوضه نسبت داد.

۳-۱۰- تغذیه آبخوان عمیق

در شکل ۱۳ تغییرات تغذیه آبخوان عمیق در حوضه پسیخان با بارندگی در دامنه زمانی ۱۹۹۹-۲۰۷۱ در سناریو RCP8.5 مورد مطالعه آمده است. تغذیه منابع آب زیرزمینی فرایند مهم برای مدیریت آب زیرزمینی پایدار است، چراکه نرخ حجم تخلیه از آبخوان در دراز مدت باید کمتر یا برابر با نرخ حجم تغذیه آبخوان باشد.

۳-۹- رواناب خروجی از حوضه

در شکل ۱۲ تغییرات رواناب خروجی از حوضه پسیخان با بارندگی در دامنه زمانی ۱۹۹۹-۲۰۷۱ در سناریو RCP8.5 مورد مطالعه آمده است. بیشترین مقدار رواناب خروجی از حوضه در سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۶۸ برابر با ۱۶۱/۹ میلی‌متر با بارندگی ۱۶۹۲ میلی‌متر به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات رواناب خروجی از حوضه با بارندگی

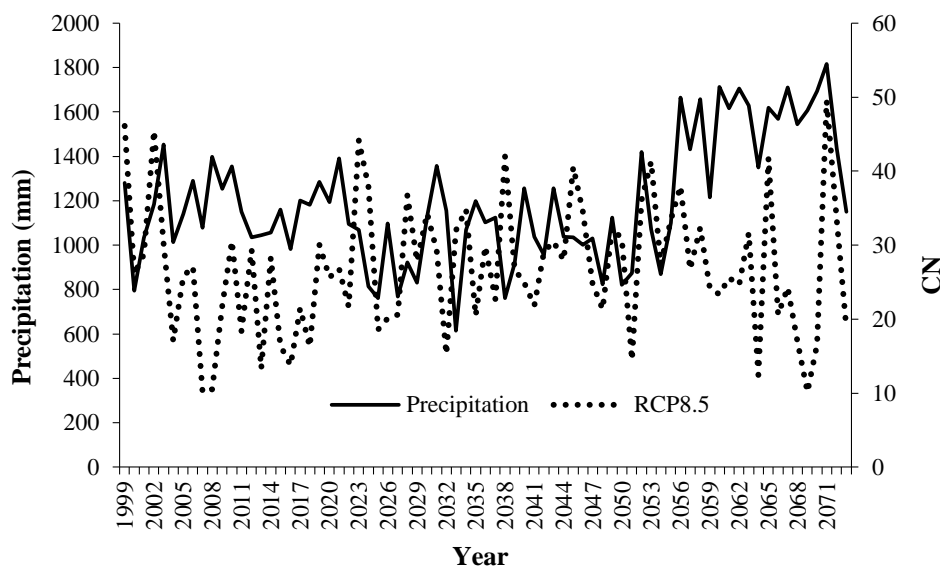


Fig. 11- Changes in curve number with precipitation in different years and the studied scenario

شکل ۱۱- تغییرات شماره منحنی با بارندگی در سال‌های مختلف و سناریوی مورد مطالعه

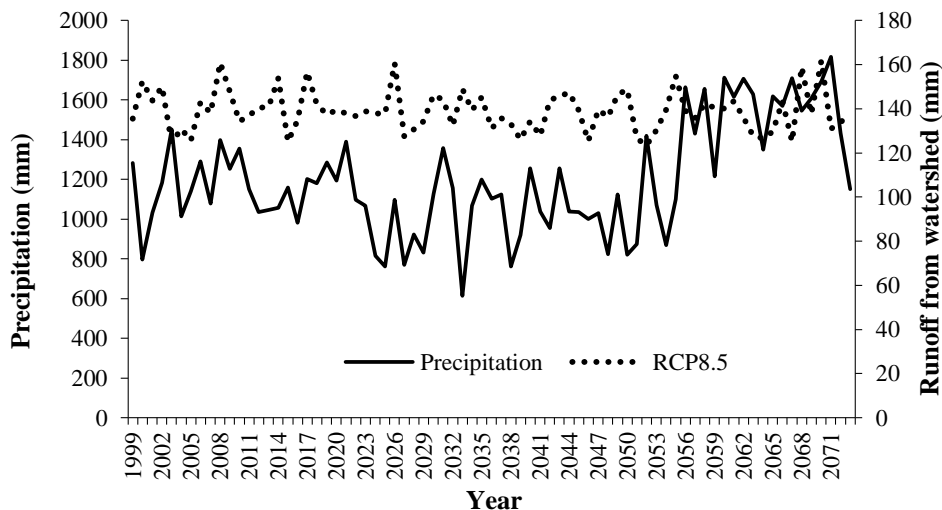


Fig. 12- Changes in runoff from watershed and precipitation in different years and the studied scenario

شکل ۱۲- تغییرات رواناب خروجی از حوضه با بارندگی در سال‌های مختلف و سناریوی مورد مطالعه

رسوب بیش از حد می‌تواند تعادل ظریف آن را مختل کند. دوم، فعالیت‌های انسانی نیز نقش بسزایی در ورود رسوب به تالاب دارد. جنگل‌زدایی، چرای بیش از حد دام‌ها، شیوه‌های نامناسب استفاده از زمین، فعالیت‌های ساختمانی و رواناب کشاورزی، همگی به افزایش رسوب کمک می‌کنند. جنگل‌زدایی پوشش گیاهی را از بین می‌برد که به تثبیت ذرات خاک کمک می‌کند و منجر به افزایش نرخ فرسایش می‌شود. فعالیت‌های ساختمانی، از جمله راه‌سازی یا توسعه شهری در نزدیکی منطقه تالاب، می‌تواند سطوح خاک را مختل کرده و آنها را در معرض فرسایش قرار دهد. رسوبات حاصل از این سایت‌های ساختمانی می‌توانند در هنگام بارندگی شسته شده و به تالاب ختم شوند. رواناب کشاورزی یکی دیگر از منابع اصلی ورود رسوب به تالاب انزلی است.

رسوبات و رواناب حوضه پسیخان می‌تواند اثرات منفی متعددی بر تالاب انزلی داشته باشد:

- تخریب کیفیت آب: رسوبات و رواناب حامل آلاینده‌هایی مانند کودها، آفت‌کش‌ها و سایر مواد شیمیایی از مزارع کشاورزی، مناطق شهری و سایت‌های صنعتی هستند. این آلاینده‌ها می‌توانند آب موجود در تالاب را آلوده کنند و منجر به کیفیت پایین آب شوند. سطوح بالای مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر می‌تواند باعث یوتریفیکاسیون شود و منجر به رشد بیش از حد جلبک‌ها و کاهش اکسیژن در تالاب شود؛

مشاهده می‌شود که تغییرات تغذیه آبخوان عمیق منطبق بر بارندگی در حوضه است و از آن تبعیت می‌کند. بیشترین مقدار تغذیه آبخوان عمیق در سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۳۱ برابر با ۵۳ میلی‌متر است. افزایش تغذیه آبخوان در حوضه می‌تواند نقش اساسی در بیلان آب دارد و تحت تأثیر مدیریت در حوضه است، در همین راستا Sadeghi et al. (2005) بیان کردند که اقدامات آبخیزداری سبب کاهش رواناب و افزایش تغذیه آبخوان‌ها می‌شود که این امر سبب تعادل بخشی سفره‌های آب زیرزمینی و احیای مراتع می‌شود.

۴- آینده تالاب انزلی

ورود رسوبات به تالاب انزلی یک موضوع مهم زیست محیطی است که اکوسیستم و تنوع زیستی آن را با چالش‌های مختلفی مواجه می‌کند. به طور کلی، پرداختن به رسوب‌گذاری در تالاب انزلی برای حفظ یکپارچگی اکولوژیکی آن و تضمین پایداری بلند مدت این اکوسیستم مهم حیاتی است. رسوب تالاب انزلی اساساً از طریق دو منبع اصلی فرآیندهای فرسایش طبیعی و فعالیت‌های انسانی وارد تالاب می‌شود. نخست، فرآیندهای فرسایش طبیعی، فرسایش آبی، به بار رسوب در تالاب کمک می‌کنند. تپه‌ها و کوه‌های بخش جنوبی حوضه می‌توانند در هنگام بارندگی شدید رسوبات را آزاد کنند که سپس توسط رودخانه‌ها و نهرها به تالاب منتقل می‌شوند. این فرآیند رسوب‌گذاری طبیعی بخشی از پویایی طبیعی تالاب است. با این حال،

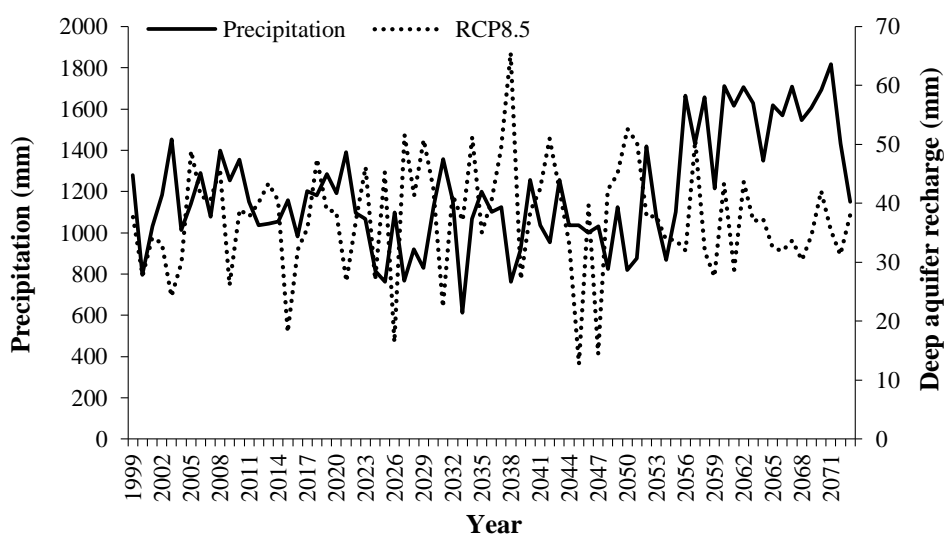


Fig. 13- Changes in deep aquifer recharge and precipitation in different years and the studied scenario

شکل ۱۳ - تغییرات تغذیه آبخوان عمیق با بارندگی در سال‌های مختلف و سناریوی مورد مطالعه

دوره پایه کاهش یافته است، که علت اصلی آن به کاربری اراضی و کاهش بارش در آینده باز می‌گردد. همچنین، تغییرات رسوب در سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه نزدیک‌تر بوده و تغییرات کمتری نسبت به شرایط پایه نشان می‌دهد. این تغییرات در هیدرولوژی حوضه به بارندگی وابسته بوده و با افزایش یا کاهش آن همسو نشان داده می‌شود. نگاه به گذشته نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۱، میزان رواناب سطحی در حوضه افزایش چشمگیری داشته است که همراه با بارندگی بیشتر بوده است. در آینده، در سال ۲۰۵۵، بیشترین رواناب سطحی حوضه با بارندگی کمتر خواهد بود، که این امر به تغییرات در پوشش زمین نسبت داده می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد که عوامل مختلف مانند تغییرات کاربری اراضی، بارندگی و پوشش زمین تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در هیدرولوژی حوضه دارند و این اطلاعات می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مدیریت پایدار منابع آب در آینده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، نتایج این مطالعه نشان داد که تغییرات در نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق نیز با بارندگی وابسته هستند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که تغذیه منابع آب زیرزمینی نیز به بارندگی منطبق بوده و بیشترین مقدار تغذیه آبخوان در سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۳۱ به دست آمده است. با توجه به قابلیت‌های که از مدل SWAT در این پژوهش نشان داده شد، می‌توان از آن برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی در حوضه پسیخان برای اقدامات مدیریتی در سطح حوضه استفاده نمود و اثرات آن را بر تالاب انزلی مورد ارزیابی قرار داد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Hydrologic Response Units
- 2- Muskingum
- 3- Warm Up
- 4- Iteration

- تخریب زیستگاه: رسوب بیش از حد می‌تواند گیاهان آبی و موجودات ساکن در کف تالاب را خفه کند. رسوب‌گذاری همچنین می‌تواند مناطق یا کانال‌های کم‌عمق را پر کند و هیدرولوژی تالاب را تغییر دهد و زیستگاه‌های مهم گونه‌های مختلف را از بین ببرد؛
- تغییر دینامیک مواد مغذی: رسوب می‌تواند فرآیند چرخه مواد مغذی را در تالاب تغییر دهد. رسوب بیش از حد ممکن است رسوبات غنی از مواد مغذی را مدفون کند یا از رسوب آنها جلوگیری کند و در دسترس بودن مواد مغذی برای گیاهان و سایر موجودات را مختل کند. این تغییر در دینامیک مواد مغذی می‌تواند بر بهره‌وری کلی و تنوع زیستی اکوسیستم تالاب تأثیر بگذارد؛
- کاهش نفوذ نور: رسوب معلق در آب باعث کاهش نفوذ نور به تالاب می‌شود. این کاهش در دسترس بودن نور می‌تواند با محدود کردن فعالیت فتوسنتزی بر روی پوشش گیاهی آبی غوطه‌ور تأثیر منفی بگذارد. پوشش گیاهی آبی غوطه‌ور زیستگاه مهمی را برای بسیاری از گونه‌ها فراهم می‌کند، بنابراین کاهش آن به دلیل کاهش در دسترس بودن نور می‌تواند اثرات آبشاری روی سایر موجودات داخل تالاب داشته باشد؛
- افزایش فرسایش: رواناب حاصل از مزارع کشاورزی، مراتع یا کارگاه‌های ساختمانی اغلب مقادیر زیادی رسوب را به دلیل فرسایش خاک حمل می‌کند. این افزایش فرسایش می‌تواند منجر به کانالیزه شدن نهرها در داخل حوضه شود و در نتیجه سرعت جریان آب به سمت تالاب افزایش یابد. سرعت بیشتر ورود آب به تالاب می‌تواند باعث فرسایش کرانه‌ها، از بین رفتن پوشش گیاهی در کنار رودخانه‌ها و رسوب بیشتر در داخل تالاب شود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که تغییرات مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی در حوضه پسیخان تابعی از بارندگی است. نتایج این مطالعه نشان داد که در آینده با تغییر کاربری اراضی (عمدتاً به سمت مسکونی) و تغییرات اقلیمی دبی جریان و رسوب تولیدی در حوضه پسیخان افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده شد که تغییرات اقلیمی اثر چشم‌گیری بر تغییرات مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی حوضه از جمله رواناب سطحی، تغذیه آبخوان و تبخیر و تعرق دارد. نتایج نشان داد که میزان رواناب و رسوب تولید شده در این حوضه نیز افزایش خواهد یافت. در این مطالعه، نتایج تحقیقات مربوط به تغییرات جریانات جوی و هیدرولوژیکی در سناریو RCP8.5 مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در آینده، تولید رواناب در این سناریو نسبت به

۶- مراجع

- 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 93:1-100
- Abbaspour K C (2011) A user manual SWAT-CUP2: SWAT calibration and uncertainty programs. EAWAG: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland
- Abbaspour K C (2011) Swat-Cup2: SWAT calibration and uncertainty programs manual version 2, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland
- Akbari F, Shourian M, and Moridi A (2021) Planning the optimum crop pattern considering surface and groundwater resources interaction by coupling SWAT, MODFLOW and PSO. *Iran-Water Resources Research* 17(1):136-150 (In Persian)
- Alansi A W, Amin M S M, Abdul Halim G, Shafri H Z M, Aimrun W (2009) Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6(6):7581-7609
- Aloui S, Mazzoni A, Elomri A, Aouissi J, Boufekane A, and Zghibi A (2023) A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management* 326:116799
- Asadi H (2016) Estimation of sediment, organic carbon, and phosphorous loads from Pasikhan River into Anzali Wetland, Iran. *International Journal of Environmental Protection* 6:129-133
- Atef I, Ahmed W, Abdel-Maguid R H (2023) Future land use land cover changes in El-Fayoum governorate: A simulation study using satellite data and CA-Markov model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 38:651-664
- Bekiaris I G, Panagopoulos I N, Mimikou M A (2005) Application of the SWAT (soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden. *Global NEST Journal* 7(3):252-257
- Beza M, Hailu H, Teferi G (2023) Modeling and assessing surface water potential using combined SWAT model and spatial proximity regionalization technique for ungauged sub-watershed of Jewuha Watershed, Awash Basin, Ethiopia. *Advances in Civil Engineering* 9972801
- Coles S, Bawa J, Trenner L, Dorazio P (2001) An introduction to statistical modeling of extreme values (Vol. 208, p. 208). London: Springer
- Ebrahimi E, Asadi H, Joudi M, Rezaei Rashti M, Rahmani M, Farhangi M B, Ashrafzadeh A, Khodadai M (2022a) Variation entry of sediment, organic matter and different forms of phosphorus and nitrogen in flood and normal events in the Anzali wetland. *Journal of Water and Climate Change* 13(2):434-450
- Ebrahimi E, Asadi H, Rahmani M, Farhangi M B, Ashrafzadeh A (2022b) Effect of precipitation and sediment concentration on the loss of nitrogen and phosphorus in the Pasikhan River. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 71(2):211-228
- El-Hamid H T A, Nour-Eldin H, Rebouh N Y, El-Zeiny A M (2022) Past and future changes of land use/land cover and the potential impact on ecosystem services value of Damietta Governorate, Egypt. *Land* 11(12):2169
- Emerson C H, Welty C, Traver R G (2003) Application of HEC- HMS to model the additive effects of multiple detention basins over a range of measured storm volumes. *Civil Engineering Database, Part of World Water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia* 228pp.
- Feyereisen G W, Strickland T C, Bosch D D, Sullivan D G (2007) Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River watershed. *Transactions of the ASABE* 50(3):843-855
- Gassman P W, Reyes M R, Green C H, Arnold J G (2007) The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans ASABE* 50(4):1211-1250
- Ghonchepour D, Sadoddin A, Salmanmahiny A, Bahremand A, Jakeman A, Croke B (2023) Detection and prediction of land use changes and population dynamics in the Gorganrud River basin, Iran. *Land Degradation & Development* 34(10):2990-3002
- Golfam P, Ashofteh P S (2023) Application of the fuzzy theory development in the uncertainty analysis of water supply system performance indexes. *Iran-Water Resources Research* 19(1):84-101 (In Persian)
- Guilan Province Agricultural Jihad Organization (2021) Performance reports.

- Hargreaves G H, Samani Z A (1982) Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108(3):225-230
- Hargreaves G H, Samani Z A (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2):96-99
- Janjić J, Tadić L (2023) Fields of application of SWAT hydrological model-A review. *Earth* 4(2):331-344
- Kandel S, Gyawali B, Shrestha S, Zourarakis D, Antonious G, Gebremedhin M, Pokhrel B (2023) Estimation of runoff and sediment yield in response to temporal land cover change in Kentucky, USA. *Land* 12(1):147
- Langat P K, Kumar L, Koech R (2019) Identification of the most suitable probability distribution models for maximum, minimum, and mean streamflow. *Water* 11(4):734
- Lu D, Mausel P, Brondizio E, Moran E (2004) Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25(12):2365-2401
- Mander W J (1994) *Dictionary of global climatic change*. 2nd Revised ed., VCL Press, London
- Mengistu A G, Woldeesenbet T A, Dile Y T, Bayabil H K, Tefera G W (2023) Modeling impacts of projected land use and climate changes on the water balance in the Baro basin, Ethiopia. *Heliyon* 9(3):e13965
- Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Binger R L, Harmel R D, Veith T (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 50(3):885-900
- Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Binger R L, Harmel R D, Veith T L (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900
- Nash J, Sutcliffe J (1970) River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290
- Omani Tajrishi M, Abrishamchi A (2006) River flow simulation using SWAT and GIS Model. 7th International Seminar on River Engineering, February 24-26, Ahvaz Shahid Chamran University 1-8 (In Persian)
- Reungsang P, Kanwar R S, Srisuk K (2010) Application of SWAT model in simulating stream flow for the Chi River Subbasin II in Northeast Thailand. *Trends Research in Science and Technology* 2(1):23-28
- Rouholahnejad E, Abbaspour K C, Vejdani M, Srinivasan R, Schulin R, Lehmann A (2012) Parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software* 31:28-36
- Sadeghi S H R, Sharifi F, Forootan E, Rezaei M (2005) Quantitative performance evaluation watershed management measures (Case Study: Keshar Sub - Watershed). *Journal of Pajouhesh and Sazandegi* 65:96-102 (In Persian)
- Serrat-Capdevila A, Valdés J B, Pérez J G, Baird K, Mata L J, Maddock T (2007) Modeling climate change impacts modelling. *International Journal of Climatology* 27:1547-1578
- Shaygan M, Alimohammadi A, Rohani H (2011) Hydrological modeling of Taleghan basin in GIS environment using SAWT model. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS* 2:1-18 (In Persian)
- Sheikh V (2006) Soil moisture prediction: Bridging event and continuous runoff modelling. *Wageningen University and Research* 1-208
- Siriwardena L, Finlayson B L, McMahon T A (2006) The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* 326(1-4):199-214
- Tang F F, Xu H S, Xu Z X (2012) Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting. *Journal Procedia Environmental Sciences* 13:1760-1770
- Van Liew M W, Arnold J G, Garbrecht J D (2003) Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transaction of the AEAE* 46(6):1539-1551
- Wang G, Yang H, Wang L, Xu Z, Xue B (2014) Using the SWAT model to assess impacts on land use changes on runoff generation in headwaters. *Hydrological Process* 28(3):1032-1042
- Wei W, Chen L, Fu B, Huang Z, Wu D, Gui L (2007) The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology* 335:247-258
- Yarahmadi D (2014) Hydroclimatological analysis of Urmia Lake surface oscillations. *Natural Geography Research, Thirty-Second Year* 20:77-92 (In Persian)
- Yu E, Liu X, Li J, Tao H (2023) Calibration and evaluation of the WRF-Hydro model in simulating the streamflow over the arid regions of northwest China: A case study in Kaidu River Basin. *Sustainability* 15(7):6175

Zuo D, Xu Z, Yao W, Jin S, Xiao P, Ran D (2016)
Assessing the effects of changes in land use and
climate on runoff and sediment yields from a

watershed in the Loess Plateau of China. Science of
the Total Environment 544:238-250