

## The Response of Hydrological Performance Indicators to Land Use Change at the Watershed Scale

Negar Tayebzadeh Moghadam<sup>id</sup> | Bahram Malekmohammadi<sup>id</sup>✉

Department of Environmental Planning and Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.  
E-mail: [malekb@ut.ac.ir](mailto:malekb@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**

Research Article

**Article history:**

Received: 27 Aug. 2023

Revised: 09 Dec. 2023

Accepted: 18 Dec. 2024

Published online: 18 Apr. 2024

**Keywords:**

*Land use change,  
Sediment yield,  
Taleghan Watershed,  
Water yield.*

### Abstract

The response of water balance components as indicators of hydrological performance to stimuli such as land use change is of strategic importance. In this study, the effect of land use change on water balance components was evaluated, focusing on the relationships and change of the main indicators of water yield and sediment yield. Based on this, the Markov chain model was used to predict land use in 2040. Also, the American soil and water assessment tool was developed as a base model for evaluating and estimating hydrological indicators in the Taleghan Watershed as a mountainous watershed with structural heterogeneity. The results of model showed that the increase of settlements and urban development in Taleghan watershed will result in increased runoff, increased water yield and sediment yield indicators, and more sedimentation. Land use change leads to an increase of sediment yield by 11 times until 2040. The conversion of pastures to barren lands is the most important land use change that can increase sediment yield. Also, the increase of barren lands will be the reason for the reduction of evapotranspiration in some sub-basins of this watershed. Increasing rainfall and decreasing soil permeability will increase surface runoff, and as a result, soil erosion and sediment yield will increase. In this study, exactly the sub-basins that had the highest quantitative amount of predicted water yield index also had the highest quantitative amount of sediment yield index and increased sedimentation. In this research, it was determined that land use change as a type of structural change in the land will have visible effects on the functions and hydrological responses of the watershed.

**Cite this article:** Tayebzadeh Moghadam, N., Malekmohammadi, B. (2024). The Response of Hydrological Performance Indicators to Land Uses Change at the Watershed Scale. *Journal of Range & Watershed Management*, 77 (1), 85-105. DOI: 10.22059/jrwm.2024.364461.1722



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

## پاسخ شاخص‌های عملکرد هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی در مقیاس حوضه آبخیز

نگار طیب‌زاده مقدم | بهرام ملک‌محمدی

گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
رایانامه: malekb@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

پاسخ مولفه‌های بیلان آب به عنوان شاخص‌های عملکرد هیدرولوژیکی نسبت به محرک‌هایی چون تغییر کاربری اراضی از اهمیت استراتژیک برخوردار است. در این مطالعه ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر مولفه‌های بیلان آبی با تمرکز بر روابط و تغییرات شاخص‌های اصلی عملکرد آب و عملکرد رسوب صورت پذیرفت. بر این اساس از مدل زنجیره‌ای مارکوف برای پیش‌بینی کاربری اراضی در سال ۲۰۴۰ استفاده شد. همچنین مدل ارزیابی آب و خاک آمریکا به‌عنوان مدل مبنای ارزیابی و برآورد شاخص‌های هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز طالقان به عنوان حوضه‌ای کوهستانی با عدم تجانس ساختاری توسعه داده شد. نتایج مدل نشان داد که افزایش سکونتگاه‌ها و توسعه شهری در حوضه آبخیز طالقان منجر به ایجاد رواناب بیشتر، افزایش کمی شاخص‌های عملکرد آب، عملکرد رسوب و همچنین افزایش رسوب‌گذاری خواهد شد. تغییر کاربری اراضی سبب افزایش تقریباً ۱۱ برابری بار رسوب تا سال ۲۰۴۰ می‌گردد. تبدیل مراتع به زمین‌های بایر مهمترین تغییر کاربری است که می‌تواند افزایش رسوب‌گذاری را به همراه داشته باشد. همچنین افزایش زمین‌های بایر خود علتی بر کاهش تبخیر و تعرق در برخی از زیرحوضه‌های این آبخیز خواهد بود. افزایش بارندگی و کاهش نفوذپذیری خاک باعث افزایش رواناب سطحی شده و در نتیجه فرسایش خاک و رسوب‌گذاری را افزایش خواهد داد. در این مطالعه دقیقاً زیرحوضه‌های که بالاترین میزان کمی شاخص عملکرد آب پیش‌بینی شده را داشتند دارای بالاترین میزان کمی شاخص عملکرد رسوب و افزایش رسوب‌گذاری نیز بودند. در این تحقیق مشخص گردید تغییرات کاربری اراضی به عنوان نوعی از تغییرات ساختاری در سرزمین اثرات مشهودی را بر عملکردها و پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه آبخیز خواهد گذاشت.

### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

### کلیدواژه‌ها:

تغییر کاربری اراضی،

عملکرد آب،

عملکرد رسوب،

حوضه آبخیز طالقان.

استناد: طیب‌زاده مقدم، نگار؛ ملک‌محمدی، بهرام (۱۴۰۳). پاسخ شاخص‌های عملکرد هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی در مقیاس حوضه آبخیز. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۷(۱)، ۸۵-۱۰۵

۸۵-۱۰۵

DOI: 10.22059/jrwm.2024.364461.1722



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

تغییر در ساختار سرزمین به واسطه تغییرات کاربری اراضی یکی از عوامل اصلی اثرگذار بر عملکردهای هیدرولوژیکی و مولفه‌های آبی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی در حوضه‌های آبخیز مختلف در سراسر جهان است (Dibaba et al., 2020). شناخت و درک مفهوم بیلان آب یکی از پیش نیازهای ضروری در راستای مدیریت پایدار منابع در سطح حوضه‌های آبخیز می‌باشد. مطابق این تعریف کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده خاص می‌گردند به مصرف رسیده، ذخیره شده و یا به صورت‌های مختلف از محدوده مشخص شده خارج می‌گردد که مجموعه بیلان را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین عناصر بیلان آب از دیدگاه مدیریت منابع آب شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی می‌باشند (Pandi et al., 2023).

در کشور ما اکثر حوضه‌های آبخیز، به ویژه حوضه‌های آبخیز کوهستانی فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری به تعداد کافی می‌باشند و این موضوع هر گونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل مواجه می‌سازد (انصاری و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به اهمیت شناخت و آگاهی از وضعیت بیلان آبی و تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز بدون آمار، برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های آبی، لزوم استفاده از فناوری‌های نوین در پیش‌بینی مولفه‌های بیلان آبی بیش از پیش مشهود می‌باشد (Artimani et al., 2017). در سال‌های اخیر مدل‌هایی با ماهیت نیمه‌توزیعی ارائه شده‌اند که در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کرده‌اند. یکی از این مدل‌های نیمه‌توزیعی که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است مدل هیدرولوژیکی SWAT<sup>۱</sup> است (Arnold et al., 2012).

درک ساختار تغییر کاربری اراضی بر اجزای مختلف چرخه آب از اهمیت استراتژیک برخوردار است که نادیده انگاشتن آن خدمات جبران ناپذیری را بالاخص در مناطق خشک بر جای خواهد گذاشت (Rouholahnejad et al., 2017). این موضوع از اصل ارتباط ساختار و عملکرد که نخستین بار توسط ریسر<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۸۴) به صورت ارتباط بین الگوهای مکانی و فرآیندهای اکولوژیکی و پس از آن به عنوان ارتباط بین ساختار و عملکرد توسط فورمن و گودرون<sup>۳</sup> (۱۹۸۶) و هم‌چنین ترنر<sup>۴</sup> (۱۹۸۹) مطرح گردید نشأت می‌گیرد. پیچیدگی ساختار سرزمین در تمامی مقیاس‌های آن قابل رویت است. تئوری سلسله مراتب بیان می‌کند که چگونه اجزای سیمای سرزمین در هر مقیاس، با مقیاس بالاتر و پایین‌تر از خود در ارتباط هستند. به این معنی که در این تئوری هر سیستم به صورت جزئی از یک سیستم بزرگتر در نظر گرفته می‌شود که به نوبه خود متشکل از زیر سیستم‌ها می‌باشد. ملموس‌ترین مثال در این زمینه حوضه‌های آبخیز هستند که خود از زیرحوضه‌ها و حوضه‌های کوچکتری تشکیل شده‌اند (Farina, 1998).

تا کنون مطالعات متعددی در خصوص محاسبه مولفه‌های بیلان آبی در سطوح مختلف انجام شده است. برای مثال در مطالعه‌ای در حوضه آبخیز چیتار در هند ۵ نوع از مولفه‌های بیلان آبی شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، نفوذ، تبخیر و تعرق واقعی و آب موجود در خاک در مقیاس زیرحوضه‌های آبخیز با مدل SWAT محاسبه گردیده است (Pandi et al., 2023). بررسی تاثیر تغییر کاربری اراضی بر پارامترهای هیدرولوژیکی نیز در برخی مطالعات صورت پذیرفته است (Osei et al., 2019; Liu et al., 2023). به عنوان مثال شبیه‌سازی پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییر کاربری اراضی در حوضه آبخیز گرمسیری در استرالیا نشان داد توسعه شهری باعث افزایش رواناب سطحی و نیز کاهش رواناب جانبی و آب‌های زیرزمینی شده و جنگل‌زدایی باعث کاهش رواناب سطحی و افزایش تبخیر و تعرق می‌گردد (Zhang et al., 2020). در تحقیقی دیگر که در حوضه آبخیز رودخانه مدر در آفریقای جنوبی مشخص کرد وجود پوشش جنگلی در یک محدوده شیب مناسب می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد آب حوضه آبخیز داشته باشد (Woyessa and Welderufael, 2021). کندو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۷) رواناب سطحی نسبتاً بیشتر و بازده و عملکرد آب بالاتری را به دلیل وجود زمین‌های بایر، کاربری شهری و سکونتگاه‌ها

<sup>1</sup> Soil and Water Assessment Tool

<sup>2</sup> Risser

<sup>3</sup> Forman & Godron

<sup>4</sup> Turner

<sup>5</sup> Kundu

گزارش کردند. گیتویی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹) همچنین اشاره کردند که کاهش پوشش گیاهی باعث افزایش جریان سطحی و افزایش بازده و عملکرد آب می‌شود. برخی از مطالعات نیز به بررسی کاربرد مدل SWAT به منظور ارزیابی مولفه‌های بیلان آبی تحت تاثیر سناریوهای مختلف تغییرات کاربری اراضی پرداختند. در این میان می‌توان به تحقیق دارابی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره نمود که از مدل SWAT برای بررسی اثر سناریوهای تغییرات کاربری اراضی بر شاخص‌های حدی هیدرولوژیک استفاده کردند. بر این اساس سه سناریو با کاربری قدیم، کاربری میانی و کاربری جدید تعریف گردیده و مولفه‌های بیلان آبی برای هر یک از این سناریوها مشخص گردید. همچنین پیکونیس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۳) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی مولفه‌های اصلی بیلان آبی تحت تاثیر سه سناریو تغییر کاربری اراضی استفاده نمودند. در سناریو اول گسترش زمین‌های کشاورزی در سناریو دوم جنگل‌زدایی زیرحوضه تریکالا و در سناریو سوم گسترش مناطق شهری در زیرحوضه تریکالا در کشور یونان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها حاکی از افزایش رواناب و عملکرد آب در دوره‌های مرطوب و کاهش آن در طول دوره‌های خشک است. با وجود تحقیقات صورت گرفته تاکنون، فقدان مطالعات در خصوص برآورد تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر پارامترهای هیدرولوژیک در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف و همچنین ارتباطات میان مولفه‌های بیلان آبی در حوضه‌های آبخیز کوهستانی با عدم تجانس ساختاری به وضوح مشهود است.

هدف از این تحقیق تدوین روشی مناسب در زمینه ارزیابی روابط تغییر ساختار سرزمین و عملکرد هیدرولوژیکی در سیمای سرزمین می‌باشد تا بر این مبنا بتوان تغییرات ساختاری را به تغییرات عملکردی تعمیم داد. با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق ارزیابی کمی پاسخ هیدرولوژیک شاخص‌های عملکرد هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی به عنوان تغییرات ساختاری در سرزمین در سلسله مراتب مقیاس مکانی و زمانی صورت خواهد پذیرفت. بر این اساس می‌توان مولفه‌های منابع آب موجود در یک سیستم را در دوره‌های مختلف مورد مقایسه قرار داده و درجه تاثیر هر یک را در تغییرات بیلان آبی سیستم‌های هیدرولوژیکی شناسایی نمود. از اینرو در این مطالعه ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر مولفه‌های بیلان آبی با تمرکز بر روابط و تغییرات شاخص‌های اصلی عملکرد آب (WYLD) و عملکرد رسوب (SYLD) انجام خواهد شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شناخت اثرات تغییر کاربری اراضی مختلف بر فرآیندهای هیدرولوژیکی منجر خواهد شد که در برنامه‌ریزی‌های سیمای سرزمین و بهبود عملکرد آب و خاک کارآمد خواهد بود. حوضه آبخیز طالقان در سال‌های اخیر و بالاخص پس از بهره‌برداری از سد طالقان با تغییرات گسترده کاربری اراضی مواجه شده است و به همین جهت به عنوان منطقه مطالعاتی در این پژوهش انتخاب گردیده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه مطالعاتی

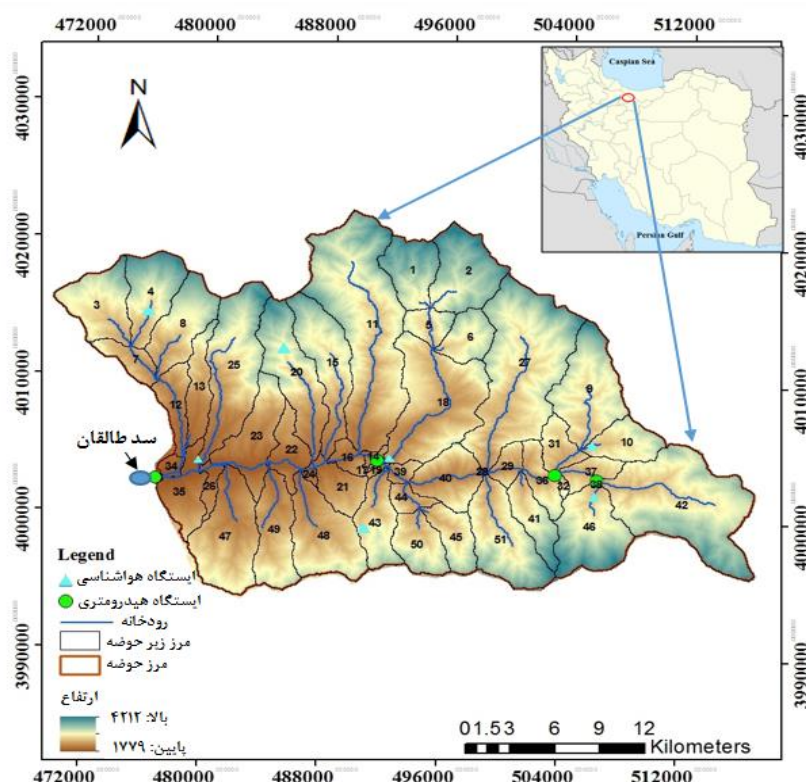
حوضه آبخیز طالقان در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز و در بخش شمال غربی در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از تهران واقع شده است. این منطقه در میان دره بزرگی در کوه‌های البرز قرار دارد. این حوضه بین دو عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴ دقیقه شمالی و ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه و بین دو طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه و ۵۱ درجه و ۱۲ دقیقه شرقی واقع شده است. مساحت حوضه آبخیز طالقان تا خروجی گلینک ۸۰۰ کیلومتر مربع است. متوسط ارتفاع حوضه مورد مطالعه ۲۸۱۶ متر و شیب متوسط آن ۲۶ درجه است. متوسط بارش سالانه در این منطقه ۵۹۱ میلی‌متر و متوسط دما سالانه ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد اقلیم منطقه مطالعاتی به عنوان برآیند اثر عناصر مختلف در یک سامانه اقلیمی می‌باشد که عمدتاً متأثر از ارتفاع و توپوگرافی است ولی در عین حال از آنجائیکه بارندگی در حوضه آبخیز طالقان از طول و عرض جغرافیایی نیز تبعیت می‌نماید اثر ارتفاع در ترازهای یکسان برای تمام آبخیز یکسان نیست. با این وجود طبق پهنه‌بندی اقلیمی دومارتن اصلاح شده بیش از ۷۳ درصد کل حوضه آبخیز طالقان در اقلیم فراسرد ارتفاعی واقع شده است. فصول بهار و

<sup>1</sup> Githui

<sup>2</sup> Pikounis

زمستان پر باران‌ترین فصول سال در سطح حوضه به شمار می‌روند که حداکثر بارندگی در این دو فصل در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت رخ می‌دهد (مهندسین مشاور بازآب، ۱۳۸۱).

رودخانه طالقان در مرکز این حوضه از گردنه عسلک در غرب کندوان سرچشمه می‌گیرد و به سمت غرب در جریان است این رودخانه پس از دریافت شاخه‌های پرآبی مانند رودهای علیزان، مهران، خجیره، حسنجون و اورازان طی چندین کیلومتر به رودخانه الموت می‌پیوندد و پس از آن با نام رودخانه شاهرود به دریاچه سد سفیدرود می‌ریزد (مهندسین مشاور بازآب، ۱۳۸۱). حوضه طالقان با ۹۵/۵۷ درصد مناطق کوهستانی و ۴/۴۳ درصد اراضی دشتی یکی از حوضه‌های سرشاخه‌ای حوضه سفید رود محسوب می‌گردد. ۸۵ درصد حوضه آبخیز طالقان را مراتع و ۱۵ درصد آن را باغ‌ها، زمین‌های کشاورزی و سایر کاربری‌ها پوشش می‌دهد (دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران، ۱۳۷۲). نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در حوضه آبخیز طالقان حاکی از فرسایش‌پذیری قابل ملاحظه اراضی با سنگ بستر مارن است که مربوط به دوران سوم زمین‌شناسی می‌باشد (آرمین و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل (۱) موقعیت منطقه مطالعاتی نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (منبع: یافته‌های تحقیق)

## ۲-۲. روش پژوهش

### ۲-۲-۱. استخراج و طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

سنجش از دور به منظور ارزیابی تغییرات پوشش اراضی به کار برده می‌شود. از طریق این فن می‌توان با استفاده از مجموعه تصاویر چندزمانه و پردازش آنها با یکی از روش‌های مناسب موجود و با سرعت و دقت بالا نسبت به آشکارسازی تغییرات مورد نظر در منطقه اقدام نمود (Goodchild & Quattrochi, 2023). یکی از روش‌های پرکاربرد استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای، طبقه‌بندی است

که به دو صورت نظارت شده و نظارت نشده صورت می‌گیرد. از آنجایی که هدف اصلی از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تهیه نقشه‌های موضوعی و کارآمد است، لذا انتخاب الگوریتم طبقه‌بندی، نقش مهمی در مدل‌سازی کاربری اراضی ایفا می‌کند (Myint & Wang, 2006). تصاویر استفاده شده برای استخراج کلاس‌های پوشش زمین، شامل تصاویر ماهواره‌های سری لندست می‌باشند که این تصاویر به دلیل قدمت سری‌های زمانی، توان تفکیک طیفی و مکانی مناسب برای مطالعات تغییرات کاربری اراضی در این تحقیق استفاده شده‌اند. تصاویر ماهواره‌های Landsat 8-OLI سال ۲۰۱۶ و تصاویر Landsat 5 TM برای سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۰۶ با وضوح مکانی ۳۰ متر از سایت زمین‌شناسی آمریکا استخراج گردیدند (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

به منظور انجام تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری از نرم افزار ([www.harrisgeospatial.com](http://www.harrisgeospatial.com)) ENVI5.3 استفاده گردید. تصحیحات هندسی و رادیومتری تصاویر با استفاده از مدل رگرسیون پلومیال و انحراف جذر میانگین مربعات ۰/۵ پیکسل در تصحیح هندسی انجام گرفت. از این نرم افزار به همراه ابزار ([www.esri.com](http://www.esri.com)) ArcGIS10.3 برای طبقه‌بندی تصاویر و عملیات پیش پردازش بهره گرفته شد. از روش کروستا<sup>۱</sup> و الگوریتم حداکثر احتمال (بیشترین شباهت) برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده گردید (Ozesmi & Bauer, 2002). این روش با استفاده از میانگین و ماتریس کوواریانس سایت‌های تعلیمی از روش‌های دیگر طبقه‌بندی مانند طبقه‌بندی کمترین فاصله از داده‌های تصویر تحلیلی بهتر به دست می‌آیند (Richards & Xiuping, 2006). در نهایت از نرم افزار TerrSet18.2 برای تحلیل تغییرات پوشش زمین، مدل‌سازی، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و نیز اعتبارسنجی مدل بهره گرفته شد (Eastman, 2015).

## ۲-۲-۲. کاربرد مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار

از مدل‌هایی که در پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین بسیار کارآمد می‌باشد، مدل زنجیره مارکوف است که از تکنیک تلفیق دو مدل زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار بهره می‌گیرد. دلیل این ترکیب این است که مدل زنجیره مارکوف به تنهایی قادر به شرح کمیت حالت‌های تبدیل بین انواع کاربری نیست، اما توانایی آشکارسازی میزان تبدیل بین انواع کاربری‌های گوناگون را دارد. از طرفی مدل سلول‌های خودکار یک تکنیک مدل‌سازی است که در فضای رستری تعریف می‌شود. وضعیت سلول معمولاً پوشش و کاربری اراضی آن سلول را ارائه می‌دهد و تغییر در نوع کاربری یک سلول به کاربری دیگر، وابسته به وضعیت کاربری سلول در زمان حال و وضعیت سلول‌های همسایه است (Sang et al., 2011). با اجرای مدل مارکوف چند تصویر احتمال ایجاد شد. این تصاویر که از ماتریس احتمال انتقال به دست آمد، احتمال اینکه هر نوع از پوشش زمین در هر موقعیت مکانی در آینده پیدا شود را بیان نمود. اگر چه احتمالات انتقال در هر کاربری دارای دقت زیادی بود، اما اطلاعاتی از توزیع مکانی مربوط به کاربری‌ها وجود نداشت. بنابراین، مدل تصادفی مارکوف فاقد هر گونه اطلاعات وابستگی مکانی بود و در مقابل شبکه خودکار توانایی تغییر وضعیتش را بر اساس به‌کارگیری قانونی که وضعیت جدید را تغییر وضعیت قبلی و وضعیت همسایگانش نشان می‌داد دارا بود. از فیلتر CA برای توسعه یک فاکتور وزن‌دهی مجاورت مکانی برای MARKOV استفاده گردید (کامیاب و ماهینی، ۱۳۸۹).

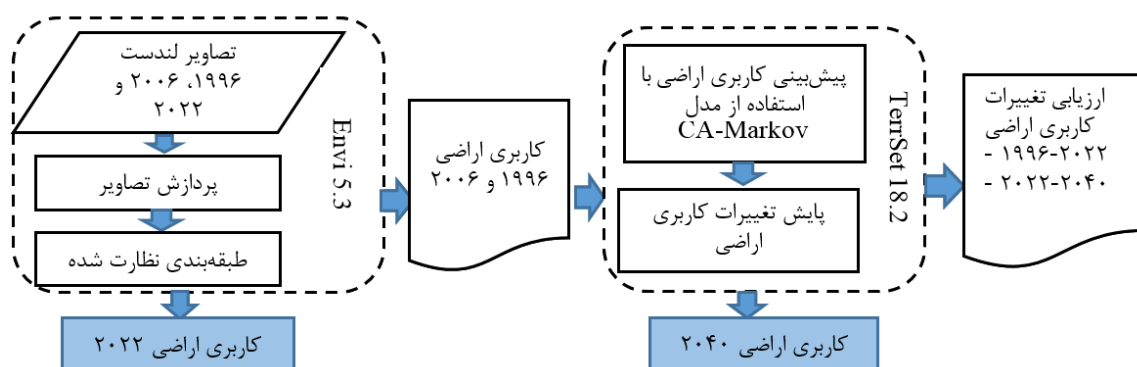
## ۲-۲-۳. ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی شده

پس از اعمال الگوریتم طبقه‌بندی برای ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی شده از ماتریس خطا، دقت کلی و ضریب کاپا استفاده شد. ماتریس خطا از مقایسه بین واقعیت زمینی و تصویر طبقه‌بندی شده محاسبه می‌گردد، در این ماتریس درایه‌هایی که بر روی قطر اصلی واقع شدند، تعداد پیکسل‌هایی هستند که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند و درایه‌های خارج از قطر اصلی تعداد پیکسل‌هایی درست طبقه‌بندی نشده می‌باشد. دقت کلی نیز به وسیله تقسیم مجموع پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده بر مجموع کل پیکسل‌هایی

<sup>1</sup> Crosta

طبقه‌بندی شده به دست می‌آید. پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده، در قطر اصلی ماتریس خطا جای دارند. با این حال معمول‌ترین پارامتر برآورد دقت، شامل دقت کل و ضریب کاپا است (Lu et al., 2004).

از نظر تئوری، احتمالات دقت کل نمی‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی طبقه‌بندی باشد، زیرا در این شاخص، نقش شانس قابل توجه است بنابراین، به دلیل ایرادات وارد بر دقت کل از شاخص کاپا استفاده گردید. ضریب کاپا سلول‌هایی را که در دو نقشه با هم مطابقت ندارند نیز در محاسبه لحاظ می‌کنند. در واقع شاخص کاپا، درصد دقت کلی را با کم کردن سهم برآورد شده توافق شانس، تعدیل می‌کند (Bonyad & Hajy Ghodary, 2007). بنابراین در این تحقیق، برای ارزیابی صحت مدل سلول‌های خودکار مارکوف در شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی از این شاخص‌ها با تاکید بر ضریب کاپا استفاده گردید. ضریب کاپا صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملا تصادفی محاسبه می‌کند. جهت ارزیابی صحت مدل‌سازی از گزینه Post Classification موجود در نرم افزار ENVI 5.3 استفاده گردید (ممبئی و عسگری، ۱۳۹۵). در این مطالعه مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی استفاده شد. این مدل ماتریس‌های انتقال از سال‌های مختلف را برای ارزیابی تغییر کاربری اراضی ایجاد می‌کند. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۲ بر اساس تغییرات سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۰۶ به دست آمد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با مقایسه تصویر طبقه‌بندی شده سال ۲۰۲۲ با تصویر تولید شده از مدل انجام شد و سپس از داده‌ها و نقشه‌های سال ۲۰۰۶ و ۲۰۲۲ برای پیش‌بینی و تهیه نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۴۰ استفاده گردید. در شکل (۲) نحوه پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۲. پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۴۰ (منبع: یافته‌های تحقیق)

## ۲-۲-۴. شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز با مدل SWAT

مدل SWAT اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط جف آرنولد در سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و ارائه شد (Arnold et al., 1998). SWAT یک مدل هیدرولوژیکی فیزیکی، نیمه توزیعی و پیوسته از نظر زمانی می‌باشد و در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و یا طولانی مدت و سالانه اجرا می‌شود و برای تجزیه و تحلیل اثرات برنامه‌ریزی‌های مدیریت زمین بر کیفیت و کمیت منابع آبی در حوضه‌های آبخیز توسعه داده شده است (Arnold et al., 2012; Neitschet et al., 2005; Gassman et al., 2007). از اینرو مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی مولفه‌های هیدرولوژیکی را داراست (Abbaspour et al., 2012; Chemura et al., 2020; Chen et al., 2020) و در مطالعه حاضر نیز از این مدل استفاده گردیده است.

اساس اجرایی مدل تقسیم‌بندی حوضه به زیرحوضه‌هاست. در این تحقیق زیرحوضه‌ها با در نظر گرفتن آستانه ۵ درصد برای کاربری اراضی و ۱۰ درصد برای خاک که توسط وینچل<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۳) توصیه شده است، به یک سری از واحدهای هیدرولوژیکی

<sup>۱</sup> Winchell



(HRUs) تقسیم شد. هر HRU نشان دهنده یک کلاس منحصر به فرد از کاربری زمین، خاک و شیب است (Arnold et al., 2011). این مقادیر حد آستانه با نادیده گرفتن تغییرات جزئی خاک و کاربری اراضی باعث کنترل تعداد HRU ها و کاهش خطا در مدل گردید (Tan et al., 2017). شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT در فاز زمین بر اساس معادله بیلان آبی است که برای هر واحد هیدرولوژیکی به طور جداگانه محاسبه گردید. با تجمیع رواناب حاصل از هر HRU مقدار آب ورودی به کانال اصلی در هر زیرحوضه به دست آمد (Neitsch et al., 2011). بیلان آبی در مدل SWAT بر اساس رابطه بیلان آبی به صورت رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق t زمان (روز)،  $SW_t$  مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)،  $SW_0$  مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)،  $R_{day}$  مقدار بارش در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $Q_{gw}$  مقدار جریان برگشتی در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $E_a$  مقدار تبخیر و تعرق در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب سطحی در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $W_{seep}$  مقدار آبی است که از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع خاک در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر) وارد می‌شود.

## ۲-۲-۵. تهیه و آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی و داده‌ها

مدل سوات به طور کلی در این تحقیق به منظور بررسی مراحل کار بر روی منطقه مطالعاتی نیاز به تصاویر ماهواره‌ای است که از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) به دست آمد. برای مشخص نمودن مرز منطقه برای مطالعات هیدرولوژیکی نیاز به نقشه رقومی ارتفاعی است که از سازمان نقشه‌برداری تهیه گردید. برای ارزیابی کمی مولفه‌های هیدرولوژیکی نیاز به داده‌های مرتبط با آب، خاک و هوا می‌باشد. از اینرو داده‌های اقلیمی میزان بارش روزانه و حداقل و حداکثر دما از سازمان هواشناسی؛ اندازه ذرات، ساختار، بافت، عمق و خصوصیات زهکشی از نقشه جهانی خاک FAO-UNESCO؛ داده‌های هیدرومتری چون دبی ماهانه رودخانه و داده‌های رسوب از شرکت مدیریت منابع آب ایران جمع‌آوری گردید. در ارتباط با داده‌های اقلیمی در مناطقی که ایستگاه‌های کافی وجود نداشت از داده‌های سایت آب، هوا، انرژی و اکوسیستم سوئیس (<https://www.2w2e.com>) استفاده شد. داده‌های کلیدی مورد استفاده در این تحقیق، دقت و منابع آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. داده‌های ورودی، دقت و منابع آنها در مدل SWAT

منبع	دقت	داده‌های ورودی
سازمان نقشه‌برداری کشور <a href="http://www.ncc.ir">http://www.ncc.ir</a>	۳۰ متر	نقشه ارتفاعی رقومی
نقشه جهانی خاک FAO-UNESCO (Abbaspour et al., 2019)	۵ کیلومتر Rasterized to a 30 m grid size ۳ طبقه	نقشه خاک (بافت، عمق و خصوصیات زهکشی)
سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا <a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a> سازمان هواشناسی <a href="http://www.irimo.ir">http://www.irimo.ir</a>	۳۰ متر	نقشه کاربری اراضی
سایت آب، هوا، انرژی و اکوسیستم سوئیس <a href="https://www.2w2e.com">https://www.2w2e.com</a>	۷ ایستگاه	داده‌های اقلیمی (میزان بارش روزانه، حداقل / حداکثر دما، رطوبت، سرعت باد و تشعشعات خورشیدی طی سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۰)
شرکت مدیریت منابع آب ایران <a href="http://www.wrm.ir">http://www.wrm.ir</a>	۴ ایستگاه	داده‌های هیدرومتری (دبی ماهانه رودخانه طی سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۰)
شرکت مدیریت منابع آب ایران <a href="http://www.wrm.ir">http://www.wrm.ir</a>	۴ ایستگاه	داده‌های رسوب (رسوب ماهانه طی سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۰)

<sup>1</sup> Hydrologic Response Units



در مطالعه حاضر به منظور بیکره‌بندی مدل و تولید اطلاعات فیزیوگرافی رودخانه‌ها و زیرحوضه‌ها از نقشه رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر استفاده گردید و با برش مرز منطقه مطالعاتی به مدل معرفی شد. نقشه شیب در چهار طبقه استخراج نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های مختلف ۱۹۹۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۲ و ۲۰۴۰ به مدل وارد شد. برای نقشه خاک و بیان پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک از نقشه جهانی خاک فائو (FAO-UNESCO) با دقت ۵ کیلومتر و در سه کلاس اصلی تهیه گردید. داده‌های هواشناسی از هفت ایستگاه سینوپتیک به نام‌های دهدار، دیزان، گلینک، گنده، جوستان، سکرانچال و طالقان از سازمان هواشناسی به صورت روزانه جمع‌آوری شد. مدل SWAT دارای مولد داده‌های اقلیمی (Weather Generator) بوده که جهت تولید داده‌های روزانه هواشناسی و بازسازی داده‌های مفقود شده استفاده می‌شود. داده‌های هیدرومتری نیز از چهار ایستگاه گلینک، جوستان، دهدار و گنده با داده‌های کاملتر به صورت آمار بلندمدت ماهانه از شرکت مدیریت منابع آب استخراج و طبق فرمت قابل قبول در مدل فراهم و به مدل معرفی گردید.

## ۲-۲-۶. واسنجی، صحت‌سنجی، تجزیه و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل با استفاده از SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2

الگوریتم SUFI-2 یک روش بهینه‌سازی معکوس مبتنی بر چارچوب بی‌زی است که در آن تمام منابع عدم قطعیت شامل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها و متغیرهای ورودی مفهوم‌سازی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در دامنه معرفی شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد (Abbaspour et al., 2004). در این مطالعه ماحصل فرآیند واسنجی مدل هیدرولوژیکی SWAT محدودده‌ای از پارامترها بود که منجر به محدودده‌ای از شبیه‌سازی‌های بهینه توسط مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی گردید (Kouchi et al., 2017).

P-Factor به عنوان درصدی از داده‌های اندازه‌گیری شده که در محدوده ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها PPU95 قرار می‌گیرند، تعریف گردید. دامنه PPU95 بر اساس سطح ۲/۵٪ و ۹۷/۵٪ تابع توزیع تجمعی از متغیرهای خروجی تعریف شد. R-Factor متوسط ضخامت باند PPU95 مشتق شده از انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده نیز مشخص گردید. از نظر تئوری مقدار P-Factor برابر با یک (۱۰۰٪) و R-Factor نزدیک به صفر، نشان دهنده تطابق کامل شبیه با مقادیر مشاهده‌ای است (Abbaspour et al., 2007).

دو نوع تجزیه و تحلیل حساسیت را می‌توان در SWAT-CUP انجام داد: یک بار در یک زمان (OAT) و همه در یک زمان (AAT) (Abbaspour et al., 2017). در AAT، حساسیت پارامترها با استفاده از رگرسیون چندگانه و رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i b_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، g مقدار تابع هدف، a ثابت رگرسیون و b ضریب پارامترها است. علاوه بر این، از آزمون t و مقادیر p برای اندازه‌گیری اهمیت حساسیت پارامترها استفاده شد. از آزمون t برای تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر b استفاده می‌شود. به طور کلی در این تجزیه و تحلیل هرچه مقدار مطلق آزمون t بزرگتر و مقدار p کمتر باشد، پارامتر حساس‌تر است (Abbaspour et al., 2017).

## ۳. یافته‌های پژوهش

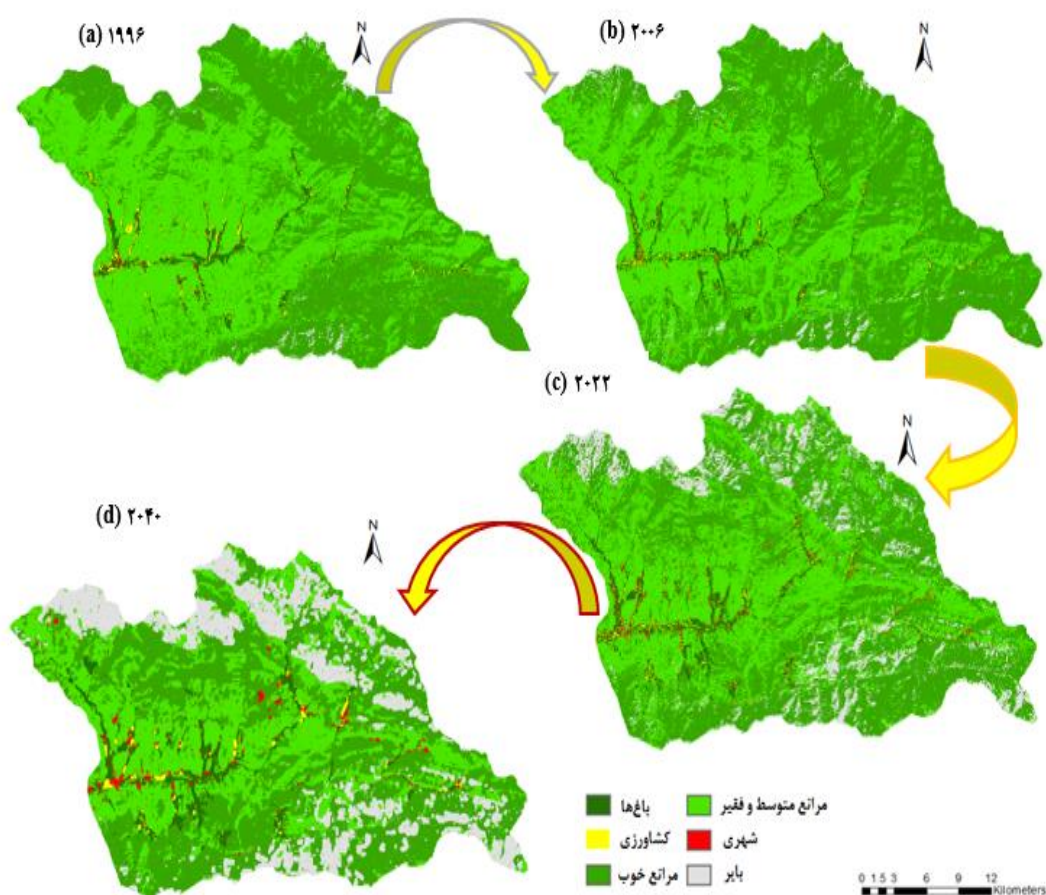
### ۳-۱. تغییر کاربری اراضی در طول سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۴۰

در مدل CA-Markov دقت کلی طبقه‌بندی برای سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۹۴/۴۷، ۹۷/۳۶ و ۹۰/۶۸ با ضرایب کاپا ۰/۸۹، ۰/۹۶ و ۰/۸۵ به دست آمد. در سناریو مبنا در سال ۲۰۱۶، حدود ۰/۸۵٪ از مساحت ۸۰۰ km<sup>2</sup> حوضه آبخیز طالقان پوشیده از مراتع هستند که ۰/۴۷٪ آنها مراتع خوب و ۰/۳۸٪ مراتع متوسط تا ضعیف می‌باشند. در بخش‌های مرتفع‌تر حوضه آبخیز مراتع و زمین‌های بایر

غالب تر بوده و در مرکز آن که ارتفاعات پایین تر را در برمیگیرد؛ سایر کاربری‌های شهری، کشاورزی و باغ‌ها واقع شده‌اند. به طور کلی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲ در سطح حوضه آبخیز طالقان روند کاهشی تدریجی در مراتع مشاهده می‌شود. این در صورتیست که یک روند افزایشی نیز در این مراتع بالاخص مراتع غنی‌تر از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ به وقوع پیوسته که علت آن تمایل مردم محلی به مهاجرت از منطقه به دلیل کمبود فرصت‌های شغلی مناسب بوده است. در این دوره کاهش دامپروران و در نتیجه کاهش تعداد دام‌ها بهبود مراتع را به دنبال داشته است. از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲، میزان تغییر برای مراتع خوب  $۰/۳۲$ ٪ و برای مراتع متوسط تا فقیر  $۱۰/۲۴$ ٪- بوده است. پیش‌بینی می‌شود از سال ۲۰۲۲ تا ۲۰۴۰،  $۴/۴۷$ ٪ از مراتع خوب و  $۵/۳۸$ ٪ از مراتع متوسط تا فقیر از بین روند. در حوضه آبخیز طالقان مساحت باغ‌ها بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲ حدود  $۱/۳۵$ ٪ افزایش داشته است اما انتظار می‌رود تا سال ۲۰۴۰ به  $۰/۹۳$ ٪ کاهش پیدا کند. بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶، درصد افزایش کاربری شهری ثابت و برابر با  $۰/۲۸$ ٪ بوده است. این میزان پس از ساخت سد طالقان از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ به  $۰/۹۲$ ٪ افزایش یافته است. علت آن این است که از سال ۲۰۰۶ به بعد با احداث سد طالقان جمعیت منطقه رشد قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده که یکی از دلایل آن بازگشت قسمتی از جمعیت مهاجر به روستاهای منطقه به دلایلی چون احداث سد، افزایش قیمت زمین، توسعه خدمات وابسته به توریسم و افزایش تنوع مشاغل می‌باشد. در واقع این دلایل عامل اصلی ورود ساکنین جدیدی به منطقه گردیده است. پس از احداث سد طالقان فعالیت‌های ساخت و ساز و رشد شتابان شهرک‌ها و ویلاها در منطقه رونق یافته است به گونه‌ای که میزان تغییرات افزایشی کاربری شهری از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲ به میزان  $۰/۶۴$ ٪ بوده و پیش‌بینی می‌شود با ادامه روند فعلی تا ۲۰۴۰ این میزان به  $۱/۳۲$ ٪ افزایش یابد. کاربری کشاورزی بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲، به دلیل رها کردن زمین‌های کشاورزی و عدم تمایل مردم منطقه به فعالیت‌های کشاورزی و تبدیل بخشی از این زمین‌ها به کاربری شهری و نواحی مسکونی  $۰/۲۳$ ٪ کاهش یافته است اما پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ رشد کمی در آنها در حدود  $۰/۱۹$ ٪ مشاهده شود. روند غالب تغییرات کاربری سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۴۰ تبدیل مراتع به اراضی بایر و غیر قابل استفاده در حدود  $۱۰$ ٪ خواهد بود. زمین‌های بایر  $۸/۸$ ٪ بین سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۲ افزایش یافته و انتظار می‌رود بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۴۰،  $۸/۳$ ٪ افزایش یابد. تخریب اراضی و افزایش زمین‌های بایر و رها شده با کاهش توان اکولوژیکی همراه گردیده و موجب شده است تا زمین‌های این منطقه عاری از پوشش گیاهی و مستعد فرسایش گردند. به طور کلی هر چه از میزان تولید یک کاربری در منطقه کاسته می‌شود تمایل به تغییر در آن نیز کمتر می‌گردد. بنابراین زمین‌های بایر و رها شده در منطقه رو به رشد است. کمترین تغییرات در مساحت کاربری‌ها نیز در کاربری کشاورزی مشخص گردید. این منطقه کوهستانی بوده و به طور کلی برای فعالیت‌های کشاورزی شرایط مناسبی ندارد. در جدول (۲) درصد مساحت کلاس‌های کاربری اراضی ارائه شده است. نقشه‌های کاربری اراضی نیز برای سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۲ و ۲۰۴۰ در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۲. درصد مساحت کلاس‌های کاربری اراضی

کاربری اراضی	درصد مساحت					
	۱۹۹۶	۲۰۰۶	۲۰۲۲	۲۰۴۰	(۱۹۹۶-۲۰۲۲)	درصد تغییرات (۲۰۲۲-۲۰۴۰)
باغ	۲/۰۶	۲/۴۳	۳/۴۱	۴/۳۴	۱/۳۵	۰/۹۳
کشاورزی	۰/۶۰	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۵۶	-۰/۲۳	۰/۱۹
مراتع خوب	۴۷/۸۱	۵۴/۱۶	۴۷/۴۹	۴۳/۰۲	-۰/۳۲	-۴/۴۷
مراتع فقیر	۴۸/۵۵	۴۱/۲۸	۳۸/۳۱	۳۲/۹۳	-۱۰/۲۴	-۵/۳۸
نواحی شهری	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۹۲	۱/۳۲	۰/۶۴	۰/۴
زمین‌های بایر	۰/۷۰	۱/۴۷	۹/۵۰	۱۷/۸۳	۸/۸	۸/۳۳
کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-



شکل ۳. نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۲ و ۲۰۴۰ (منبع: یافته‌های تحقیق)

### ۳-۲. پاسخ هیدرولوژیکی شاخص‌های عملکرد هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز طالقان

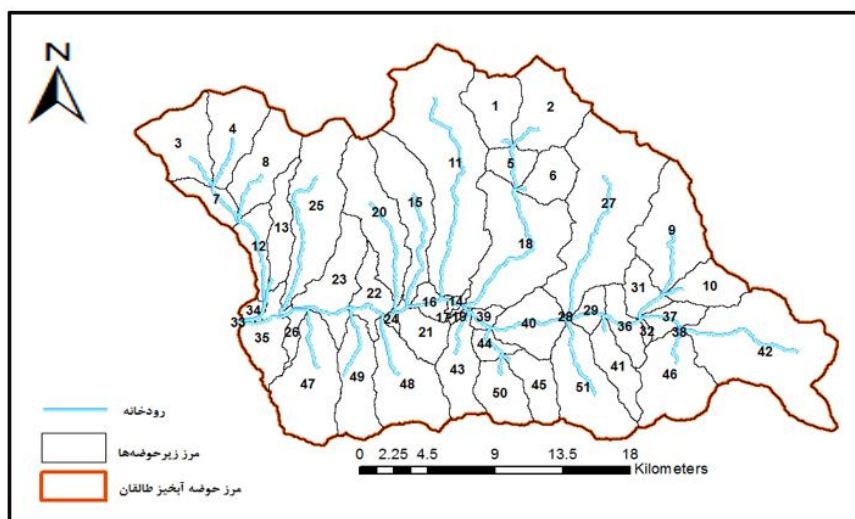
در مدل SWAT حوضه آبخیز طالقان با استفاده از ادغام نقشه رستری شبکه رودخانه‌ای و نقشه رقومی ارتفاع به ۵۱ زیرحوضه تقسیم شد. در شکل (۴) مرز حوضه و زیرحوضه‌های آبخیز طالقان نشان داده شده است. این زیرحوضه‌ها در ادامه به ۷۰۰ واحد پاسخ HRU تقسیم گردیدند.

با اجرای مدل جامع حوضه آبخیز SWAT مقادیر مولفه‌های بیلان آبی به عنوان شاخص‌های هیدرولوژیکی در این حوضه آبخیز به‌دست آمد. در جدول (۳) متوسط سالانه مقادیر مولفه‌های بیلان آبی در سطح حوضه آبخیز طالقان در سناریو پایه و سناریو (۱) به‌دست آمده از مدل SWAT ارائه شده است. از آنجائیکه تنها نقشه کاربری اراضی به سال ۲۰۴۰ تغییر یافته لذا میزان بارش در هر دو سناریو مینا و سناریو (۱) یکسان و برابر ۶۲۹ میلی‌متر در سال می‌باشد. تجزیه و تحلیل اثر تغییر کاربری اراضی بر مولفه‌های بیلان آبی حاکی از افزایش ۲٪ در WYLD به میزان ۵/۲۷ میلی‌متر و کاهش ۱٪ در  $ET^1$  به میزان ۵/۲ میلی‌متر تا سال ۲۰۴۰ است.

علت افزایش WYLD در سناریو (۱) نسبت به سناریو مینا می‌تواند به دلیل افزایش کاربری شهری و ایجاد سطوح نفوذناپذیر بیشتر و نیز کاهش پوشش گیاهی مراتع و افزایش زمین‌های بایر در ارتفاعات بالاتر با شیب بیشتر باشد که نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهد.

<sup>1</sup> Evapotranspiration

این عوامل سبب افزایش رواناب از ۹۹ میلی‌متر به ۱۱۶ میلی‌متر و همچنین کاهش جریان آب زیرزمینی از ۶۵ میلی‌متر به ۵۹ میلی‌متر از سال ۲۰۲۲ به ۲۰۴۰ خواهد گردید. به طور کلی تغییر کاربری اراضی سبب افزایش ۱۷٪ رواناب سطحی و کاهش ۱۱٪ شارژ مجدد آب زیرزمینی می‌شود. جریان جانبی و جریان مویرگی از آبخوان کم عمق به منطقه ریشه (Revap) نیز به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ کاهش می‌یابد. میزان SYLD در سناریو (۱) نسبت به سناریو مبنا در حدود ۱۱ برابر افزایش خواهد داشت.



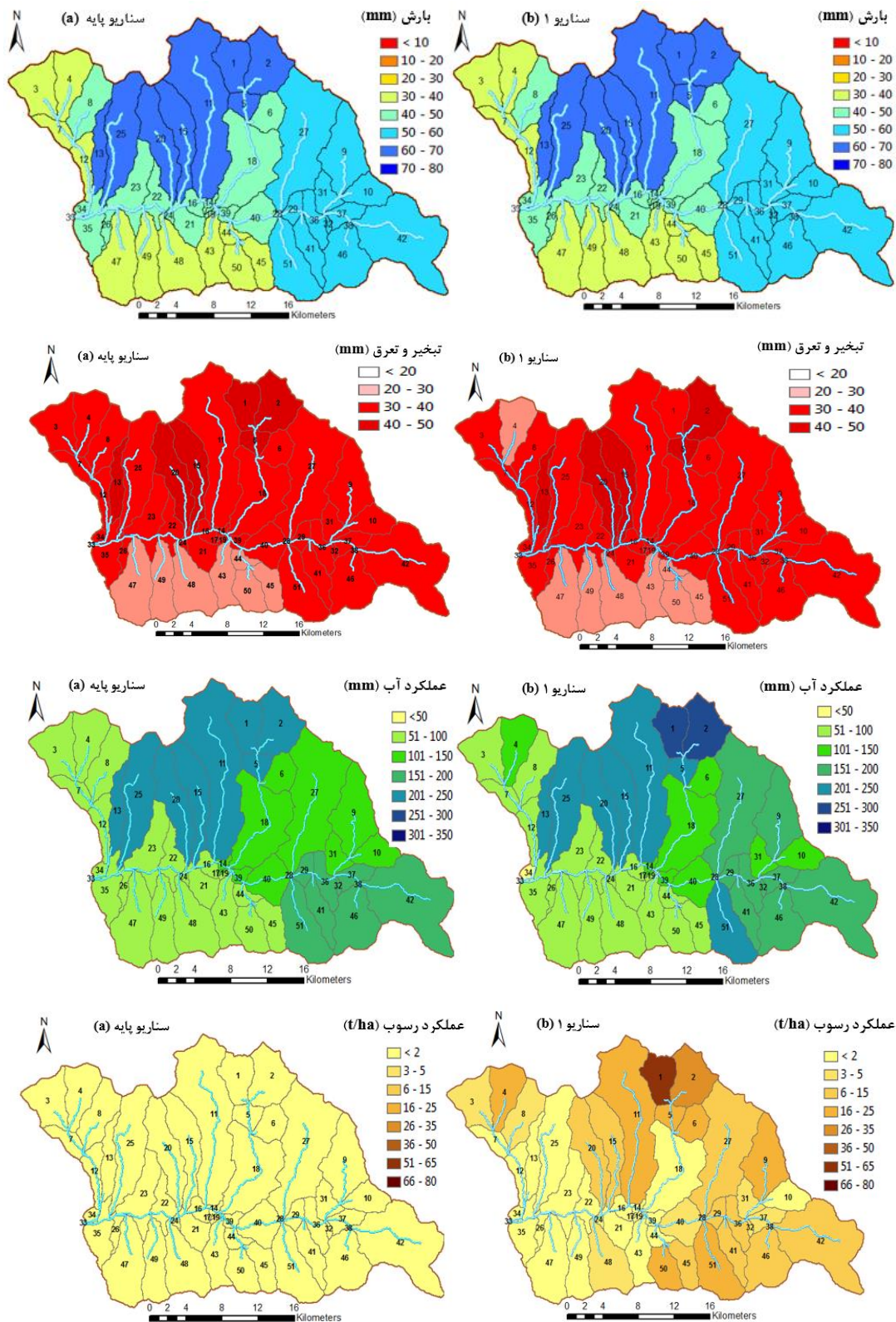
شکل ۴. مرز حوضه و زیرحوضه‌های آبخیز طالقان (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول ۳. متوسط سالانه مولفه‌های بیلان آبی در حوضه آبخیز طالقان

مؤلفه	سناریو مبنا	سناریو تغییر کاربری اراضی (سناریو ۱)	درصد تغییرات
بارش (mm)	۶۲۹	۶۲۹	(۰٪)
تبخیر و تعرق (mm)	۳۵۸	۳۵۳	(-۱٪)
رواناب سطحی (mm)	۹۹	۱۱۶	(۱۷٪)
جریان آب زیرزمینی (mm)	۶۵	۵۸	(-۱۱٪)
جریان جانبی (mm)	۱۰۶	۱۰۱	(-۵٪)
Revap (mm)	۳۴	۳۱	(-۱۰٪)
عملکرد آب (mm)	۲۷۰	۲۷۵	(۲٪)
عملکرد رسوب (t/ha)	۱/۲	۱۲/۷	(۹۴۸٪)

در شکل (۵) دامنه متوسط تغییرات سالانه شاخص‌های هیدرولوژیک بارش، ET، WYLD و SYLD در زیرحوضه‌های مختلف حوضه آبخیز طالقان در سناریوهای مطالعاتی نشان داده شده است. در سناریو (۱)، میانگین سالانه WYLD از ۲۷۰ به ۲۷۵ میلی‌متر از سال ۲۰۲۲ به ۲۰۴۰ در کل حوضه آبخیز طالقان به دلیل تغییر کاربری اراضی افزایش یافته است. در سال ۲۰۴۰، دامنه تغییرات WYLD در همه زیرحوضه‌ها به استثنای زیرحوضه‌های ۳۳ و ۳۴ بالاتر یا مشابه با مقادیر ۲۰۲۲ به دست آمده است. مناطق با WYLD بالاتر عمدتاً در زیرحوضه‌های ۱ و ۲ در بازه‌ای بین ۲۵۱ تا ۳۰۰ میلی‌متر هستند. میزان تبخیر و تعرق در سناریو (۱) و سناریو مبنا تقریباً مشابه بوده و تنها در دو زیرحوضه ۱ و ۴ کاهش داشته است. میانگین سالانه SYLD در سال ۲۰۴۰، ۱۳ تن در هکتار تخمین زده می‌شود. این در صورتیست که میزان SYLD از ۲ تا ۶۵ تن در هکتار در زیرحوضه‌های مختلف متغیر است. بیشترین میزان SYLD در سناریو (۱) مربوط به زیر حوضه شماره ۱ می‌باشد.



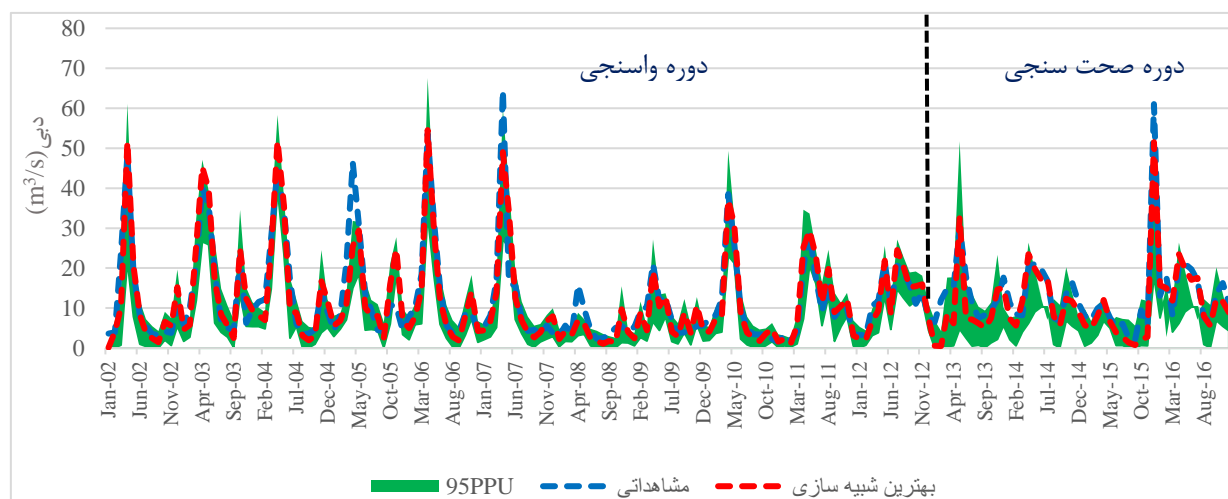


شکل ۵. دامنه تغییرات متوسط سالانه شاخص‌های هیدرولوژیکی بارش، ET، WYLD و SYLD در زیرحوضه‌های آبخیز طالقان (منبع: یافته‌های تحقیق)

حوضه آبخیز طالقان در منطقه‌ای گرم و خشک با نرخ بالای ET واقع شده است. در هر دو سناریو مبنا و سناریو (۱)، بارش بهاره از ابتدای مارس آغاز می‌شود. در این منطقه کوهستانی برف‌ها با افزایش دما در ارتفاعات بالاتر ذوب شده و جاری شدن سیلاب در بهار باعث افزایش رواناب سطحی می‌گردد. در نتیجه میزان WYLD در آوریل به بالاترین حد خود در حدود ۵۰ میلی‌متر می‌رسد. در دماهای بالاتر در تابستان میزان WYLD کاهش می‌یابد اما در سناریو مبنا ۷ میلی‌متر و در سناریو (۱) در حدود ۸ میلی‌متر از جولای تا سپتامبر که بارندگی ناچیز می‌باشد حفظ می‌شود. در سناریو مبنا بیشترین میزان SYLD در آوریل (۰/۴ تن در هکتار) و فوریه (۰/۲۶ تن در هکتار) به دست آمد. این میزان در ماه‌های دیگر قابل اغماض بود. در سناریو (۱)، SYLD از ۰/۹۶ تن در هکتار در ژانویه به ۴/۲۲ تن در هکتار در آوریل افزایش یافته اما در ماه می به ۳/۲ تن در هکتار کاهش پیدا کرده است و در ماه‌های جون تا اکتبر نزدیک به صفر بوده است. سپس یک افزایش تدریجی از ماه سپتامبر تا ژانویه رخ داده است.

### ۳-۳. نتایج واسنجی، صحت‌سنجی، تجزیه و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل SWAT

نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های مشاهداتی در چهار ایستگاه هیدرومتری که موقعیت آنها در شکل (۱) مشخص شده است واسنجی و صحت‌سنجی شد. در این مطالعه دوره واسنجی (۲۰۱۲-۲۰۰۲) و دوره صحت‌سنجی (۲۰۱۶-۲۰۱۳) مشخص و دو سال ابتدایی از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ نیز به عنوان دوره Warm-up در مدل در نظر گرفته شد. در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SUFI-2 واسنجی و صحت‌سنجی صورت گرفت. در شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی برای برآورد رواناب، دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در دوره زمانی واسنجی و صحت‌سنجی در ایستگاه گلینک به عنوان خروجی حوضه نشان داده شده است. دامنه مقادیر پارامترها به طور مداوم بر اساس حساسیت نسبی پارامترهای رواناب تعدیل می‌شود تا مجموعه‌ای از پارامترهای مناسب برای دستیابی به نتایج شبیه‌سازی بهتر به دست آید. توزیع رواناب‌های ماهانه اندازه‌گیری شده در دوره واسنجی نزدیک به مقادیر شبیه‌سازی شده بود و توزیع‌ها از همبستگی بالایی برخوردار بودند.



شکل ۶. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و باند عدم قطعیت در ایستگاه گلینک (منبع: یافته‌های تحقیق)

برای هر نقطه واسنجی مقدار نش سانتکلیف  $NSE < 1$  و  $0.75 < NSE$  و عملکرد با درجه بالا و معتبر مشخص گردید. ضریب تعیین هم‌چنین برای هر نقطه واسنجی مناسب و در بازه  $0.75 < R^2 < 1$  قرار دارد. نسبت انحراف معیار مشاهدات به ریشه میانگین مربعات خطا برای نقاط مختلف واسنجی بین ۰/۳۱ تا ۰/۴۰ به دست آمد. این در صورتی است که بهترین بازه  $0.5 < RSR < 0.7$  در نظر گرفته می‌شود. درصد

اریبی نیز در بازه‌ای بین ۳-٪ و ۳+٪ تغییر کرد این در صورتیست که مناسب‌ترین مقادیر برای آن  $RSR < +10 < -10$  می‌باشد. بر این اساس نتایج به‌دست آمده از مدل معتبر رزیابی شد. کارایی شبیه‌سازی در طول دوره صحت‌سنجی مطلوب بود زیرا همبستگی و خطاهای نسبی در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده قابل قبول بود. مقدار NSE در گته‌ده ۰/۶۹، در دهدار ۰/۶۳، در جویستان ۰/۷۵ و در گلینک ۰/۸۰ به دست آمد. مقدار NSE برای ایستگاه‌های جویستان و گلینک در دامنه عملکرد بالا  $NSE < 1$  و در ایستگاه گته‌ده در محدوده عملکرد خوب  $0.65 < NSE < 0.75$  و در ایستگاه دهدار در محدوده عملکرد مطلوب  $0.5 < NSE < 0.65$  قرار داشت. بنابراین، مقدار NSE نشان‌دهنده همبستگی نزدیک بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بود. مقادیر  $R^2$  برای هر نقطه واسنجی در یک دامنه معتبر بیشتر از ۰/۷۷ و RSR بین ۰/۴۵ تا ۰/۶۱ و PBIAS بین ۲/۳- تا ۱۹/۷- قرار داشت. بنابراین کلیه مقادیر در محدوده قابل قبول هستند و هیچ یک از آنها در محدوده نامناسب قرار ندارند. جدول (۴) ضرایب ارزیابی عملکرد مدل را در چهار ایستگاه هیدرولوژیکی حوضه آبخیز طالقان و جدول (۵) مقیاس عملکرد مدل را نشان می‌دهد (Moriasi et al., 2007). در این مطالعه عملکرد شاخص نش سانکلیف به عنوان تابع هدف بررسی گردید.

جدول ۴. ضرایب ارزیابی عملکرد مدل در چهار ایستگاه هیدرولوژیکی حوضه آبخیز طالقان

دوره	ایستگاه‌های هیدرولوژیکی	$R^2$ *	NSE**	RSR***	PBIAS**** (%)
واسنجی (۲۰۱۲-۲۰۰۰)	گته‌ده	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۳۱	-۸/۹
	دهدار	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۳۱	۳
	جویستان	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۴۰	-۳
	گلینک	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۳۹	۲/۹
صحت‌سنجی (۲۰۱۶-۲۰۱۳)	گته‌ده	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۵۵	-۲/۳
	دهدار	۰/۷۷	۰/۶۳	۰/۶۱	-۱۱/۶
	جویستان	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۵۰	۲۴/۲
	گلینک	۰/۸۷	۰/۸۰	۰/۴۵	۱۹/۷

\* $R^2$ : Coefficient of determination

\*\*NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency

\*\*\*RSR: RMSE-Observations Standard Deviation Ratio

\*\*\*\*PBIAS: Percent bias

جدول ۵. مقیاس عملکرد مدل (Moriasi et al., 2007)

عملکرد	NSE	$R^2$	RSR	PBIAS (%)
خیلی خوب	$0.75 < NSE < 1$	$0.85 < R^2 < 1$	$0.50 < RSR < 0.60$	$PBIAS < \pm 10$
خوب	$0.65 < NSE < 0.75$	$0.75 < R^2 < 0.85$	$0.60 < RSR < 0.70$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
رضایت‌بخش	$0.50 < NSE < 0.65$	$0.60 < R^2 < 0.75$	$0.70 < RSR < 0.80$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$
نامطلوب	$NSE < 0.50$	$R^2 < 0.60$	$RSR > 0.80$	$PBIAS > \pm 25$

مقادیر R-factor به ترتیب در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر ۰/۶۱ و ۰/۶۳ در گته‌ده، ۰/۸۰ و ۰/۶۱ در دهدار، ۰/۹۲ و ۰/۶۹ در جویستان و ۰/۸۰ و ۰/۹۱ در گلینک مشخص شد. مقادیر P-factor به ترتیب در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی ۰/۶۴ و ۰/۶۷ در گته‌ده، ۰/۶۰ و ۰/۶۷ در دهدار، ۰/۷۰ و ۰/۵۵ در جویستان و ۰/۸۶ و ۰/۹۷ در گلینک به‌دست آمد. به طور خلاصه، شبیه‌سازی دبی ماهانه در حوضه آبخیز طالقان با استفاده از مدل SWAT نتایج بسیار خوبی را در بر داشت. واسنجی و صحت‌سنجی داده‌های رسوب به دلیل خطاهای بزرگتر در اندازه‌گیری‌ها و ناهماهنگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در منطقه دشوارتر بود. مقادیر NSE



برای رسوب از ۰/۵۲ تا ۰/۵۸ برای دوره واسنجی و از ۰/۴۸ تا ۰/۵۵ برای دوره صحت‌سنجی متغیر به‌دست آمد. در جدول (۶) تجزیه‌وتحلیل حساسیت پارامترهای SWAT شامل رتبه‌بندی حساسیت، توصیف پارامتر، دامنه پارامتر، بهترین مقدار واسنجی شده و درجه حساسیت نشان داده شده است.

جدول ۶. تجزیه‌وتحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT

رتبه‌بندی حساسیت	کد پارامتر	شرح	محدوده پارامتر	بهترین مقدار واسنجی شده	درجه حساسیت
۱	CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel ضریب مانینگ رودخانه اصلی	- ۰/۰۱-۰/۳	۰/۰۷۱۷	۱۳/۵۵
۲	CN2.mgt	SCS runoff curve number شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	- ۰/۵-۰/۵	-/۲۳۰	۸/۱۲
۳	CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel (mm/h) alluvium هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	- ۰/۰۱-۵۰۰	۲۲۰/۳۳۳	۷/۵۲
۴	GW_REVAP.gw	Groundwater "Revap" coefficient ضریب Revap برای آب زیرزمینی	۰/۰۲-۰/۲	-/۱۶۵	۲/۱۴
۵	SOL_BD.sol	Moist bulk density (mg/m <sup>3</sup> or g/cm <sup>3</sup> ) چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی	۰/۹-۲/۵	-/۹۱۱	۱/۸۸
۶	SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer (mm H <sub>2</sub> O/mm soil) ظرفیت آب قابل دسترس خاک در لایه سطحی	۰-۱	-/۰۰۲	۱/۵۱
۷	GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm) آستانه عمق آب در جریان زیرسطحی	--۵۰۰	۱۱۷۵	۱/۴۰
۸	GW_DELAY.gw	Groundwater delay (days) زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی	۰-۵۰۰	۸/۳۳۳	۱/۰۹
۹	ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor (days) ضریب آلفای جریان مینا	۰-۱	-/۲۷۶	۱/۰۶
۱۰	ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor ضریب جبران تبخیر خاک	۰-۱	-/۹۲۹	۰/۸۵
۱۱	REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm) آستانه عمق آب در جریان زیرسطحی برای Revap	۰-۵۰۰	۴۲۳/۱۶۳	۰/۵۲
۱۲	OV_N.hru	Manning's "n" value for overland flow ضریب مانینگ جریان سطحی	-/۰۱-۱	-/۱۹۵	۰/۴۲
۱۳	SURLAG.hru	Surface runoff lag time ضریب تأخیر رواناب سطحی	-/۰۵-۲۴	۲۳/۵۶۶	--/۵۷

نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل حساسیت با روش AAT نشان داد که ضریب مانینگ رودخانه اصلی (CH\_N2)، شماره منحنی (CN2) و هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی (CH\_K2) به ترتیب سه پارامتر حساس‌تر برای جریان بودند. برای رسوب نیز حساس‌ترین پارامتر، عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک (USLE\_P) و به دنبال آن عامل تعدیل اوج جریان برای روندیابی رسوب در شاخه‌های فرعی (ADJ\_PKR)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (USLE\_K) مشخص شدند.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز طالقان از تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه سنجش از دور استفاده گردید زیرا داده‌های سنجش از دور توانایی بالایی در استخراج انواع نقشه‌های کاربری اراضی و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی دارند. پس از تهیه نقشه کاربری اراضی هر دوره نقشه کاربری اراضی آتی این حوضه آبخیز تهیه شد. با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۲۲ که از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست آمد و با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و CA مارکوف، نقشه کاربری اراضی مربوط به سال ۲۰۴۰ پیش‌بینی شد. در این تحقیق از الگوریتم حداکثر احتمال برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده گردید. ضرایب صحت به دست آمده نشان دهنده دقت بالای این طبقه‌بندی است. کاربری اراضی پیش‌بینی شده سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد در صورت ادامه یافتن روند تغییرات کاربری اراضی مطابق سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۶ حوضه آبخیز طالقان شاهد کاهش حدوداً ۱۰ درصد از مساحت مراتع و به دنبال آن افزایش ۸/۵ درصدی زمین‌های بایر و غیر قابل استفاده خواهیم بود. به علاوه عدم استفاده از قوانین توسعه خود می‌تواند یکی دیگر از علل افزایش زمین‌های بایر و رها شده در مدل سال ۲۰۴۰ باشد. افزایش ناچیزی نیز در مساحت کاربری‌های کشاورزی، شهری و باغ‌ها رخ خواهد داد. با توجه به اختلاف ناچیز بین نتایج پیش‌بینی و نقشه‌های موجود که به منظور بررسی دقت پیش‌بینی مدل CA مارکوف استفاده گردید، این مدل دارای قابلیت مناسبی در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی است.

در گذشته در ارتفاعات پایین دست حوضه آبخیز طالقان به دلیل وجود مناطق کم شیب، کشاورزی رونق بسیار داشته به طوری که اکثر دامنه‌های کوه‌های همجوار روستاها توسط کشاورزان به زیر کشت دیم رفته و در ارتفاعات بالاتر به واسطه عدم وجود زمین‌های مناسب برای کشاورزی و به دلیل پر شیب بودن منطقه، دامداری رونق بسیار داشته است. امروزه نیز در برخی موارد شغل اصلی مردم مناطق مرتفع دامداری است، ولی در مناطق پایین دست کشاورزی رونق گذشته را نداشته و عموماً باغداری گسترش یافته است، دیمزارها نیز جای خود را به اراضی بایر داده‌اند. در بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز طالقان کاهش تدریجی در مراتع از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۲ کاملاً مشهود است. به دلیل تبدیل بخش قابل توجهی از مزارع دیم به مراتع از ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ و رها کردن زمین‌های کشاورزی به طور فزاینده مردم محلی در جستجوی مشاغل بهتر مهاجرت کردند. از سال ۲۰۰۶ پس از احداث سد طالقان برخی از مردم بازگشتند که منجر به کاهش بیشتر کیفیت مراتع و تبدیل آنها به سکونتگاه‌های انسانی شد. علاوه بر این زمین‌های کشاورزی به دلیل عدم تمایل مردم به این شغل نیز کاهش یافت و این زمین‌ها به مناطق مسکونی تبدیل گردید. این نتایج در تطابق با مطالعه قربانی و همکاران (۱۳۸۹) است که در تحقیق خود بیان نمودند گرایش غالب روند تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز طالقان پس از احداث سد روند منفی داشته است. آنها بیان نمودند که بیشترین روند تخریبی مربوط به تبدیل اراضی مرتعی به اراضی بایر و غیر قابل استفاده است. این مسئله بیانگر این واقعیت است که شتاب روند تخریب با کاهش توان اکولوژیکی شدت یافته است. تبدیل اراضی دیم به بایر نیز درصد قابل توجهی را به خود اختصاص داده است. آنها مشخص نمودند که بیشترین درصد عدم تغییر کاربری مربوط به اراضی بایر و کمترین آن مربوط به اراضی کشاورزی است.

نتایج به دست آمده در این تحقیق حاکی از افزایش سکونتگاه‌ها و شهرنشینی در حوضه آبخیز طالقان منجر به ایجاد رواناب بیشتر، WYLD و SYLD در همان شرایط بارندگی شده است. این یافته‌ها با نتایج در مطالعات دیگری چون تحقیق ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. آنها نشان دادند که که تبدیل زمین‌های جنگلی و کشاورزی به زمین‌های شهری منجر به افزایش جریان سطحی، کاهش شارژ آب زیرزمینی و افزایش حمل رسوب به دلیل کاهش در سطوح غیر قابل نفوذ می‌شود. در این مطالعه، زیرحوضه‌های ۱ و ۲ بیشترین میزان WYLD را در همه سناریوها داشتند. این افزایش تنها به دلیل تغییرات اقلیمی نیست بلکه به دلیل تبدیل بخش‌های بزرگی از مراتع با کیفیت به زمین‌های بایر در اثر چرای بیش از حد دام و برداشت بیش از حد گیاهان مراتع نیز می‌باشد. تبدیل مراتع به زمین‌های بایر منجر به افزایش WYLD می‌شود. این نتایج مطابق با یافته‌های کمور<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد که گزارش کردند

<sup>1</sup> Zhang

<sup>2</sup> Chemura

کاهش پوشش گیاهی موجب افزایش جریان سطحی و بالطبع آن افزایش WYLD می‌شود. قسمت اعظم حوضه آبخیز طالقان با خاک‌های لومی شنی با فرسایش پذیری بالا پوشیده شده است (Hosseini & Ashraf, 2015). در سناریو مبنا میزان SYLD در همه زیرحوضه‌ها کمتر از ۲ تن در هکتار است. نتایج مدل SWAT نشان داد که تغییر کاربری اراضی منجر به افزایش تقریباً ۱۱ برابری SYLD تا سال ۲۰۴۰ خواهد شد. یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش SYLD در منطقه‌ای مانند حوضه آبخیز طالقان از بین رفتن پوشش گیاهی افزایش مساحت کاربری شهری و کاهش زمین‌های کشاورزی است. با کاهش پوشش گیاهی، این مناطق بیشتر در معرض فرسایش آب و باد قرار می‌گیرند. افزایش بارندگی و کاهش نفوذپذیری خاک باعث افزایش رواناب سطحی می‌شود و در نتیجه فرسایش خاک و SYLD افزایش می‌یابد. یاء<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) هم‌چنین دریافتند که شهرنشینی سطح نفوذ ناپذیر را گسترش، ضریب رواناب را افزایش، زمان غلظت را کاهش و اوج جریان و تواتر سیل را افزایش داده است.

قابل توجه است که در همه سناریوها دقیقاً زیرحوضه‌هایی که بالاترین میزان WYLD را داشتند مانند زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۱۱ و ۵۱ دارای بالاترین میزان SYLD نیز بودند. در تابستان هنگامی که میزان بارندگی بسیار ناچیز است WYLD و SYLD به طور قابل توجهی کاهش می‌یابند. کارا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) ارتباط مثبت و همسویی بین WYLD و SYLD را در حوضه آبخیز کوچکی واقع در شرق آلاباما ایالات متحده آمریکا گزارش کردند. عوامل اصلی کاهش WYLD در زیرحوضه‌ها به افزایش زمین‌های جنگلی، مراتع و مناطق شهری و کاهش زمین‌های بایر مرتبط است. این نتایج با سایر مطالعات مطابقت دارد. به عنوان مثال، کندو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷) رواناب سطحی نسبتاً بیشتر و WYLD بالاتری را به دلیل وجود زمین‌های بایر، کاربری شهری و سکونتگاه‌ها نشان دادند. نتایج این مطالعه مشخص نمود ارتباط بین WYLD و SYLD مستقیم و سینرژیک است. این نشان می‌دهد که با افزایش WYLD، میزان فرسایش خاک افزایش می‌یابد و کارایی تنظیم فرسایش مختل می‌شود. زو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۸) افزایش شار رسوبات در حوضه آبخیز رودخانه یانگتسه را به عنوان پاسخ به تغییرات بارندگی و دما به عنوان مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر WYLD برآورد کردند. با این حال، هویر و چانگ<sup>۵</sup> (۲۰۱۴) دریافتند که تخمین‌های WYLD به ویژه به تغییرات اقلیمی حساس هستند، در حالی که پیش‌بینی می‌شود حمل رسوبات با افزایش میزان بارندگی در اثر فرسایش بالادست افزایش یابد.

بر مبنا اطلاع از نسبت کاربری‌ها و نحوه تغییرات آن در گذر زمان می‌توان تغییرات آبی را پیش‌بینی و اقدامات مقتضی برای بهبود کیفیت منابع طبیعی را اتخاذ نمود. در یک اکوسیستم طبیعی بهره‌برداری از زمین و ایجاد تغییر در شرایط محیطی به ویژه پوشش گیاهی و کاربری اراضی آن اکوسیستم، بر پاسخ‌های هیدرولوژی مانند جاری شدن سیلاب و میزان فرسایش و رسوب منطقه تأثیرگذار می‌باشد. زیرا نوع کاربری اراضی و بررسی تغییرات آن یکی از عوامل اصلی در مطالعات منابع آب و فرسایش و رسوب حوضه آبخیز می‌باشند. تغییر در ساختار یک سرزمین و بسته به مقیاس آن به وضوح اثرات خود را بر عملکردهای آن سرزمین می‌گذارد. در این تحقیق مشخص گردید تغییرات کاربری اراضی به عنوان نوعی از تغییرات ساختاری در سرزمین اثرات مشهودی را بر عملکردها و پاسخ‌های هیدرولوژیک حوضه آبخیز خواهد داشت. با توجه به ضعف مدل‌های تجربی در برآورد رواناب و رسوب و کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری در اکثر حوضه‌های آبخیز ایران به ویژه حوضه‌های آبخیز کوهستانی لازم است از مدل‌هایی که مبنای فیزیکی دارند مانند مدل SWAT بهره گرفته شود. نتایج حاصل جهت درک اثرات بالقوه تغییرات کاربری اراضی بر منابع هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه مفید هستند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به ارائه راهکارهای سازگار در جهت کاهش اثرات منفی تغییرات کاربری اراضی و جهت‌دهی اثرات مثبت آنها در حوضه آبخیز کارا باشد. علاوه بر آن نتایج حاصل امکان برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر مخزن سد طالقان در شرایط تحت مطالعه را ممکن می‌سازد.

<sup>1</sup> Yaa

<sup>2</sup> Kara

<sup>3</sup> Kundu

<sup>4</sup> Zhu

<sup>5</sup> Hoyer & Chang

## ۵. سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۴۶۳۹" انجام شده است.

## References

- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333, 413-430.
- Abbaspour, K.C. (2012). SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual. EAWAG: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., & Van Genuchten, M.T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose zone journal*, 3(4), 1340-1352.
- Abbaspour, K.C., Vaghefi, S.A., Srinivasan, R. (2017). A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water*, 10 (1):6.
- Ansari, M.R., Gorji, M., Sayad, G.A., Shorafa, M., & Hemadi, K. (2016). Simulation of Runoff in Rood Zard Basin using Arc Swat Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 97-107. (In Persian)
- Armin, M., rouhipour, H., Ahmadi, H., Salajegheh, A., Mahdian, M.H., & Kheybari, V. (2016). Relationship between Aggregate Stability and Selected Soil Properties in Taleghan Watershed. *Journal of Range and Watershed Managment*, 69(2), 275-295. (In Persian)
- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., & Neitsch, S.L. (2011). *Soil and water assessment tool input-output file documentation*. Soil and Water Research Laboratory, Grassland, 808 East Black Land Road, Temple, Texas.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., van Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., & Jha, M.K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., & Williams, J.R., (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73-89.
- Artimani, M.M., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., & Hgizadah, A. (2017). SWAT model assessment to determine determination of water balance components of Gamasiab basin. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 5(2), 51-64. (In Persian)
- Bazab Consulting Engineers. (2015). Comprehensive environmental impact assessment studies of Taleghan reservoir dam and Sangban underground power plant. Tehran, Iran. (In Persian)
- Chemura, A., Rwasoka, D., Mutanga, O., Dube, T., & Mushore, T. (2020). The impact of land-use/land cover changes on water balance of the heterogeneous Buzi sub-catchment, Zimbabwe. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100292.
- Chen, M., Gassman, P.M., Srinivasan, R., Cui, Y., & Arritt, R. (2020). Analysis of alternative climate datasets and evapotranspiration methods for the upper Mississippi river basin using SWAT within HAWQS. *Science of the Total Environment*, 720, 137562.
- Comprehensive studies of Taleghan basin. (1993). College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran. (In Persian)
- Darabi, H., Shahedi, K., Solaimani, K., & Klöve, B. (2018). Hydrological Indices Variability Based on Land Use Change Scenarios. *Jwmseir*, 12(40), 81-93.
- Dibaba, W.T., Demissie, T.A., & Miegel, K. (2020). Watershed hydrological response to combined landuse/land cover and climate change in Highland Ethiopia: Fincha catchment. *Water*, 12, 1801.
- Eastman, J.R. (2015). TerrSet manual. Accessed in TerrSet version, 18, 1.
- Farina, A. (1998). *Principles and methods in landscape ecology*. London: New York Chapman & Hall.
- Forman, R.T., & Godron, M. (1986). *Landscape ecology*. Jhon Wiley & Sons, New York, 619 pp.
- 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. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.

- Ghorbani, M., Nazari Samani, A.A., Kohbanani, H.R., Akbari, F., & Jalili, Z. (2010). Application of image processing & GIS to detecting landuse changes (case study: taleghan basin). *4th International Congress of the Islamic World Geographers*, Zahedan, Iran, April, 14-15, 1-7. (In Persian)
- Githui, F., Gitau, W., Mutua, F., & Bauwens, W. (2009). Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(12), 1823-1834.
- Goodchild, M. F., & Quattrochi, D. A. (Eds.). (2023). *Scale in remote sensing and GIS*. Taylor & Francis.
- Hosseini, M., & Ashraf, M.A. (2015). *Application of the SWAT model for water components separation in Iran*. Springer, Japan.
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S. H., Khalili, D., & Abbaspour, K. C. (2017). Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms. *Water*, 9(6), 384.
- Hoyer, R., & Chang, H. (2014). Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization. *Applied Geography*, 53, 402-416.
- Kara, F., Loewenstein, E., & Kalin, L. (2012). Changes in sediment and water yield downstream on a small watershed. *Ekoloji*, 21(84), 30-37.
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance. *Ecological Engineering*, 105, 42-57.
- Liu, Z., Rong, L., & Wei, W. (2023). Impacts of land use/cover change on water balance by using the SWAT model in a typical loess hilly watershed of China. *Geography and Sustainability*, 4(1), 19-28.
- Mombeni, M., & Asgari, H. (2018). Monitoring, assessment and prediction of spatial changes of Land Use /Cover using Markov Chain Model (Case study: Shushtar- Khuzestan). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(105), 35-47. (In Persian)
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, 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.
- Myint, S. W., & Wang, L. (2006). Multicriteria decision approach for land use land cover change using Markov chain analysis and a cellular automata approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(6), 390-404.
- 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, Thechnical report No. 406.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Willams, J.R. (2005). Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. Blackland Research Center. *Texas Agricultural Experiment Statio*, 494 p.
- Osei, M.A., Amekudzi, L.K., Wemegah, D.D., Preko, K., Gyawu, E.S., & Obiri-Danso, K. (2019). The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100620.
- Ozesmi, S.L., & Bauer, M.E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and management*, 10, 381-402.
- Pandi, D., Kothandaraman, S., & Kuppusamy, M. (2023). Simulation of water balance components using SWAT model at sub catchment level. *Sustainability*, 15(2), 1438.
- Pikounis, M., Varanou, E., Baltas, E., Dassaklis, A., & Mimikou, M. (2013). Application of the SWAT model in the Pinios river basin under different land-use scenarios. *Global Nest: the Int. J*, 5(2), 71-79.
- Richards, J.A., Xiuping, J. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, 4<sup>th</sup> Edition, Springer.
- Risser, P. G., Karr, J. R., & Forman, R. T. T. (1984). Landscape ecology: directions and approaches. Illinois Natural History Survey, Special Publication Number. *Champaign: Illinois Nat-ural History Survey*.
- Rouholahnejad Freund, E., Abbaspour, K.C., & Lehmann, A. (2017). Water resources of the Black Sea catchment under future climate and landuse change projections. *Water*, 9(8), 598.
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938-943.
- Tan, M.L., Yusop, Z., Chua, V.P., & Chan, N. W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189, 1-10.
- Turner, M. G. (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual review of ecology and systematics*, 20(1), 171-197.

- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., & Arnold, J. (2013). ArcSWAT interface for SWAT2012: user's guide. Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, College Station, 1-464.
- Woyessa, Y. E., & Welderufael, W. A. (2021). Impact of land-use change on catchment water balance: a case study in the central region of South Africa. *Geoscience Letters*, 8, 1-10.
- Yaa, L. I. U., Youpeng, X. U., & Yi, S. H. I. (2012). Hydrological effects of urbanization in the Qinhuai River Basin, China. *Procedia Engineering*, 28, 767-771.
- Zhang, H., Wang, B., Li Liu, D., Zhang, M., Leslie, L. M., & Yu, Q. (2020). Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 585, 124822.
- Zhu, Y.M., Lu, X.X., & Zhou, Y. (2008). Sediment flux sensitivity to climate change: A case study in the Longchuanjiang catchment of the upper Yangtze River, China. *Global and Planetary Change*, 60(3-4), 429-442.

