

## ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل آباد استان گلستان طی دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی پیش‌بینی شده

حسین سلمانی<sup>۱</sup>، واحد بردی شیخ<sup>۲\*</sup>، عبدالرسول سلمان ماهینی<sup>۳</sup>، مجید اونق<sup>۴</sup>، ابوالحسن فتح‌آبادی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشیار، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. استاد، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۵. استادیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۲/۱۸)

### چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی رواناب و رسوب و دیگر مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل‌آباد طی دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی پیش‌بینی‌شده در نظر گرفته شد. به این منظور، با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MSS (۱۹۸۶)، ETM+ (۲۰۰۰) و OLI (۲۰۱۵) ماهواره Landsat و اطلاعات جانبی منطقه تغییر کاربری اراضی در هفت طبقه تهیه و نقشه کاربری اراضی سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ بر اساس رویکرد مدل‌سازی زنجیره مارکوف و اتومای سلولی پیش‌بینی شد. شبیه‌سازی در پایه زمانی ماهانه در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۴ و با استفاده از مدل SWAT و برنامه SUFI2 انجام پذیرفت. بعد از هر اجرای مدل SWAT بر اساس کاربری آتی، خروجی مدل استخراج و نتایج شبیه‌سازی با مقادیر پایه مقایسه شد. نتایج ارزیابی نقشه کاربری سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ با شاخص کاپای برابر ۰/۹۵۵، ۰/۸۶۵ و ۰/۹۶۱ روند کلی تخریب در منطقه را نشان داد. ارزیابی میزان تطابق بین کاربری اراضی شبیه‌سازی‌شده و واقعی برای سال ۲۰۱۵ ضریب کاپای ۰/۷۹۹ را نشان داد. در مرحله واسنجی ضرایب نش-ساتکلیف، تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا برای مقادیر رواناب ماهانه در خروجی حوضه به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۰ و ۳/۳۲ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۶۱، ۰/۶۱ و ۴/۳۶ به دست آمد. این ضرایب برای غلظت رسوب ماهانه در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۵، ۰/۶۷ و ۱۶۴۳/۲ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۵۷، ۰/۶۱ و ۱۸۶۱/۰۲ به دست آمد. نتایج بررسی نشان داد شبیه‌سازی رواناب ماهانه نسبت به رسوب دقت بیشتری دارد. در تحلیل کاربری اراضی مشخص شد که با تخریب منطقه در جهت قهقرا مقدار رواناب سطحی، رسوب، کل جریان آب، جریان زیرقشری و تبخیر و تعرق افزایش و مقادیر جریان آب زیرزمینی، جریان برگشتی از آبخوان سطحی، تغذیه آبخوان عمیق، نفوذپذیری و آب‌گذری کاهش چشمگیری پیدا می‌کند؛ همچنین مقادیر اوج و میانه جریان بیشتر می‌شود و جریان پایه کاهش می‌یابد. به طور کلی، آثار تغییرات در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۲۵ بیشتر است.

**کلیدواژگان:** تغییرات کاربری اراضی، حوضه آبخیز تیل‌آباد، زنجیره مارکوف-اتومای سلولی، سیکل هیدرولوژیکی، مدل SWAT.

## مقدمه

سطحی و عمیق و تبخیر و تعرق می‌شود. از طرفی، با تخریب منطقه در جهت قهقرا مقدار رواناب افزایش یافت و مقادیر نفوذپذیری، آب‌گذری به آبخوان سطحی و عمیق و تبخیر و تعرق واقعی کاهش چشمگیری پیدا کرد. Bieger و همکارانش [۲] تأثیر تغییر کاربری اراضی بر بیلان آبی و انتقال رسوب حوضه‌ای در چین با مدل SWAT را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با افزایش مناطق جنگلی و باغ‌های میوه و کاهش اراضی زراعی دیم رواناب سطحی، فرسایش خاک و رسوب به ترتیب ۵/۹، ۴۷/۷ و ۴۲/۹ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. Anaba و همکارانش [۹] در بررسی خود در حوضه‌ای در اوگاندا دریافتند که نوع پوشش زمین و تغییرات آن تأثیر مستقیمی بر مقادیر رواناب و رسوب خروجی از حوضه دارند. به طوری که با کاهش ۱۷/۹۶ درصد اراضی جنگلی و افزایش ۱۲/۵۶ درصد اراضی مسکونی مقدار رواناب سطحی و رسوب به ترتیب ۲۶/۷ درصد و ۲۰/۵۰ درصد افزایش یافت. Briones و همکارانش [۴] در ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیزی در فیلیپین در پاسخ به تغییرات کاربری اراضی به این نتیجه رسیدند که با کاهش در اراضی جنگلی و مرتعی و افزایش زراعت و زمین‌های کشاورزی رواناب، جریان پایه و آب زیرزمینی حوضه کاهش یافت. Wang و همکارانش [۱۰] در پژوهشی مشابه با مدل‌سازی اثر گزینه‌های مختلف کاربری اراضی در حوضه‌ای در چین به این نتیجه رسیدند که تبدیل اراضی جنگلی به اراضی مرتعی در حوضه به افزایش میزان رواناب سالانه و کاهش آب زیرزمینی بر اثر کاهش نفوذپذیری خاک و کاهش تعرق حوضه منجر می‌شود. نتایج مطالعات Khoi و Suetsugi [۶] در بررسی اثر تغییر کاربری اراضی حوضه‌ای در ویتنام نشان داد با کاهش ۱۶/۳ درصدی اراضی جنگلی رواناب سطحی ۰/۲ تا ۰/۴ درصد، بار رسوبی ۱/۸ تا ۳ درصد و تبخیر و تعرق ۰/۷ تا ۳/۸ درصد افزایش یافت و به عکس دبی آب زیرزمینی و نفوذپذیری و آب‌گذری کاهش پیدا کرد. همچنین، نتایج تعداد زیادی از مطالعات، که در حوضه‌هایی با ابعاد مختلف انجام گرفت، نشان دادند تغییرات کاربری اراضی به صورت کاهش اراضی جنگلی و افزایش زراعت و مناطق مسکونی به افزایش مقدار رواناب و رسوب حوضه منجر می‌شود [۱۱-۱۳]. پوشش جنگلی حوضه آبخیز تیل‌آباد به شدت در حال تخریب و نابودی است. این عوامل به همراه استفاده نادرست از سطح سرزمین سبب کاهش میزان آب و

چرخه هیدرولوژیکی سیستمی پیچیده و بیان‌کننده چرخش مداوم آب از طریق فرایندهای بارش، رواناب سطحی، نفوذپذیری و تبخیر و تعرق است [۱]. عوامل مختلفی بر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی تأثیرگذارند که در این بین اهمیت کاربری اراضی به دلیل کارکرد مؤثرتر دخالت‌های انسانی در آن چشمگیرتر است [۲]. کاربری اراضی بیان‌کننده استفاده از پوشش فیزیکی سطح زمین در شرایط حاضر است و یک فاکتور محرک در بیلان آبی است و تأثیر مهمی در انتقال آب و کاهش جریان‌های سطحی دارد [۳]. بررسی رابطه بین پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و نوسانات کاربری اراضی برای مدیریت صحیح و بهینه منابع آبی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی ضروری است [۴]. درک رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و عوامل به‌وجودآورنده آن و تأثیرات بعدی آن بر رژیم هیدرولوژیکی، اطلاعات ضروری برای برنامه‌ریزی استفاده از زمین و مدیریت پایدار منابع طبیعی را فراهم می‌کند [۵]. تغییر کاربری اراضی موجب تغییر در چرخه هیدرولوژیکی حوضه آبخیز و در نتیجه برهم‌خوردن تعادل بین بارش، تبخیر و تعرق، نفوذپذیری، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و فرسایش خاک و انتقال رسوب می‌شود [۶]. برای پاسخ به پرسش‌های مربوط به آثار تغییرات کاربری اراضی و مدیریت آبی، مدل‌های هیدرولوژیکی ابزار مفیدی هستند. مدل‌های هیدرولوژیکی برای فهم بهتر فرایندها و عوامل مختلف مؤثر در چرخه هیدرولوژیکی حوضه، مدیریت بهینه منابع آبی، تحلیل جریان رودخانه و ارزیابی آثار تغییرات کاربری اراضی در دوره‌های زمانی مختلف توسعه یافته‌اند [۷]. در این تحقیق از مدل نیمه‌توزیعی-مفهومی و پیوسته SWAT<sup>۱</sup> برای این مقصود استفاده شده است که در مطالعات اخیر به شکل گسترده در سرتاسر دنیا برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی توسط محققان مختلف استفاده شده است. Salmani و همکارانش [۸] تأثیر تغییر کاربری اراضی بر مؤلفه‌های مختلف سیکل هیدرولوژیکی حوضه آبخیز فزاقلی استان گلستان را در چهار سناریو و در دو گرایش مثبت و منفی کاربری اراضی با مدل SWAT بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بهبود کاربری حوضه سبب کاهش مقادیر رواناب و افزایش نفوذپذیری، آب‌گذری به آبخوان

به عنوان ابزاري كليدى براى مديران منابع آبي به منظور مديریت بهتر منابع آبي منطقه استفاده شود.

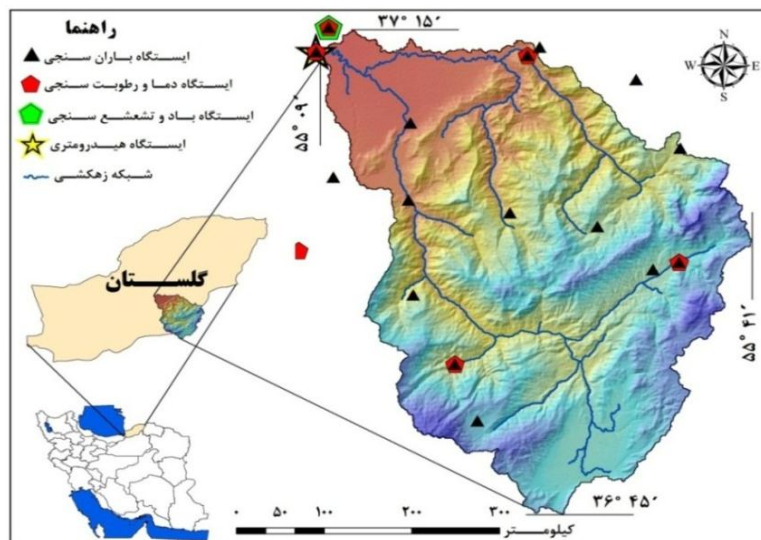
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

حوضه آبخيز تيل آباد با مساحت ۱۵۴۰ كيلومتر مربع بخشى از حوضه آبخيز بزرگ گرگان رود است كه در مختصات جغرافيايى ۱۲° ۰۹' ۵۵" تا ۱۵° ۰۹' ۵۵" طول شرقى و ۱۵° ۴۵' ۳۶" تا ۱۰° ۱۵' ۳۷" عرض شمالى در استان گلستان و در چين خوردگى هاى شمالى سلسله كوه هاى البرز قرار دارد (شكل ۱). اين حوضه از جنوب به حوضه شاهرود، از شرق به اوگان، از غرب به قورچاي و از شمال به بخشى از حوضه بزرگ گرگان رود محدود مى شود. دامنه ارتفاعى اين حوضه از ۲۸۸۹ متر در مناطق كوهستانى تا ۲۸ متر در مناطق دشتى متغير است. بيشتر كاربرى اراضى در حوضه يادشده كاربرى هاى زراعت، جنگل پهن برگ و مرتع - بوته زار به ترتيب با ۲۸/۴۵، ۲۳/۴۵ و ۲۴/۴۱ درصد است. متوسط سالانه دما، رطوبت نسبى و بارش حوضه به ترتيب ۱۴/۱۶°C، ۶۸/۱۹ درصد و ۵۹۷/۱۳ ميلي متر است.

افت كيفيت آب هاى سطحى به صورت افزايش بار رسوبى شده است. از اين رو، لازم است تا منابع تغيير پوشش طبيعى شناسايى شوند و با تبين رابطه آن با رواناب و رسوب راه كارهاى مديرى لازم براى آن ارائه شود. در سال هاى گذشته تغيير منابع آب و بار رسوبى براى حوضه آبخيز تيل آباد مسائل و مشكلات زيادى را به وجود آورده است. تغيير كاربرى اراضى حوضه طى دوره گذشته موجب تغيير در مؤلفه هاى مختلف سيكل هيدرولوژيكي شده است كه مى توان با اجراى برنامه كاربرى مؤثر و كارآمد در سطح حوضه، آن را مديریت كرد.

هدف از اين تحقيق، شبیه سازی هيدرولوژيكي حوضه آبخيز تيل آباد، آشكارسازى تغييرات كاربرى اراضى از گذشته تا حال، پيش بينى كاربرى اراضى براى دوره آتى و بررسى مؤلفه هاى مختلف سيكل هيدرولوژيكي تحت تأثير كاربرى اراضى پيش بينى شده است. همچنين، به عنوان يك رويکرد جديد تأثير كاربرى اراضى دوره آتى بر رفتار هيدرولوژيكي حوضه آبخيز تيل آباد با استفاده از شاخص هيدرولوژيكي مختلف بررسى شد. تحقيق حاضر مى تواند



شكل ۱. موقعیت جغرافيايى حوضه آبخيز تيل آباد در استان گلستان و كشور ايران

ArcSWAT استفاده شد. داده هاى مورد نیاز براى شبیه سازی توسط مدل SWAT شامل مدل رقمى ارتفاع (DEM<sup>۱</sup>)، نقشه شبکه زهكشى، كاربرى اراضى، داده هاى خاك شناسى و اطلاعات هواشناسى است. بعد از ورود داده هاى مربوط به

### روش تحقيق

#### شبیه سازی هيدرولوژيكي

در اين پژوهش براى بررسى تأثير كاربرى هاى اراضى مختلف طى دوره حال و آتى بر مؤلفه هاى مختلف سيكل هيدرولوژيكي، از مدل كاربرى و نيمه توزيعی - فيزيكى

1. Digital Elevation model

فرسایش جهانی خاک. در این بررسی برای روندیابی از روش‌های ماسکینگ، برای محاسبه حجم رواناب سطحی از روش شماره منحنی SCS، برای تعیین حداکثر رواناب از روش استدلالی و برای محاسبه تبخیر و تعرق روش پنمن - مونتیت با توجه به دقت بیشتر برای شبیه‌سازی استفاده شد [۱۶].

بعد از وارد کردن داده‌های اقلیمی که شامل داده‌های ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی، ۱۵ ایستگاه دماسنجی، ۱۲ ایستگاه رطوبت‌سنجی، ۲ ایستگاه بادسنجی و تابش‌سنجی است مدل اجرا شد. شبیه‌سازی در پایه زمانی ماهانه و طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۸ انجام گرفت. با توجه به تعداد زیاد پارامترها در مدل، ممکن نبودن اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از این پارامترها و با توجه به اینکه بسیاری از پارامترها بر اساس پیش‌فرض مدل هستند بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه واقع در خروجی حوضه به عنوان ایستگاه مبنا صورت گرفت [۱۶]. بر اساس مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه در پژوهش‌های مختلف [۱۴ و ۱۵] تعداد ۴۱ پارامتر مهم و تأثیرگذار بر رواناب و رسوب انتخاب و برای حوضه آبخیز تیل‌آباد تنظیم شد. واسنجی مدل به صورت خودکار و با استفاده از برنامه SUFI-2 تحت بسته نرم‌افزاری SWAT CUP صورت گرفت. بعد از بهینه‌سازی پارامترهای طی دوره واسنجی (سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۸)، صحت‌سنجی بر اساس پارامترهای بهینه‌شده برای دوره زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۴ نیز در برنامه SUFI-2 صورت گرفت. همچنین، قابلیت مدل در شبیه‌سازی دبی و رسوب با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی ( $R^2$ )، نش-ساتکلیف ( $E_{NS}$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و PBIAS (درصد اریب) بررسی شد. بعد از اطمینان از دقت مدل، مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی و بار معلق استخراج و تجزیه و تحلیل شد.

آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی طی دوره‌های گذشته و پیش‌بینی آثار آینده تغییرات پوشش

طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای و تولید نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی

آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش اراضی در دادن دید کلی برای مدیریت بهتر منابع طبیعی و حفاظت اراضی و اتخاذ تدابیر سیاست‌های درازمدت بسیار مؤثر است. در این تحقیق ابتدا به منظور دستیابی به تغییرات کمی و

مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ در ۳۰ متر (SRTM) و شبکه زهکشی، حوضه آبخیز تیل‌آباد به چندین زیرحوضه تقسیم شد. آن‌گاه بر اساس نقشه‌های خاک‌شناسی، کاربری اراضی و شیب، بر اساس مقدار آستانه در نظر گرفته‌شده، به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم شد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل شامل بارندگی، کمینه و بیشینه دما، رطوبتی نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد بر پایه زمانی روزانه مربوط به ایستگاه‌های داخل و اطراف حوضه است (شکل ۱). علاوه بر این، از ایستگاه سینوپتیک گنبد و علی‌آباد به عنوان ایستگاه مولد اقلیمی (ایستگاه استفاده‌شده برای بازسازی خلأ آماری) استفاده شد. معادله بیلان آبی در مدل SWAT به صورت رابطه ۱ است [۱۴]:

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

که در آن:  $SW_t$ : مقدار نهایی رطوبت خاک (میلی‌متر آب)  $SW_0$ : مقدار اولیه رطوبت خاک (میلی‌متر آب)،  $t$ : زمان (روز)،  $R_{day}$ : مقدار بارش در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب)،  $Q_{surf}$ : مقدار رواناب سطحی در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب)،  $E_a$ : مقدار تبخیر و تعرق در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب)،  $W_{seep}$ : مقدار تراوش که در روز  $i$  ام از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیراشباع می‌شود (میلی‌متر آب)،  $Q_{gw}$ : مقدار آب برگشتی در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب) است. در مدل SWAT، فرسایشی که به وسیله بارش و رواناب ایجاد می‌شود از رابطه اصلاح‌شده معادله جهانی فرسایش (MUSLE) که توسط ویشمایر و اسمیت ارائه شده است به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$Sed = 11/8 (Q_{surf} q_{peak} A_{hru})^{0.56} K_{usle} C_{usle} P_{usle} L_{usle} F_c \quad (2)$$

که در آن: Sed: بار رسوب (تن در روز)،  $Q_{surf}$ : حجم رواناب سطحی (میلی‌متر بر هکتار)،  $q_{peak}$ : حداکثر دبی (مترمکعب بر ثانیه)،  $A_{hru}$ : مساحت هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی،  $K_{usle}$ : فاکتور فرسایش‌پذیری معادله فرسایش جهانی خاک،  $C_{usle}$ : فاکتور پوشش و مدیریتی معادله فرسایش جهانی خاک،  $P_{usle}$ : فاکتور عملیات حفاظتی خاک،  $L_{usle}$ : فاکتور توپوگرافی معادله فرسایش جهانی خاک،  $F_c$ : فاکتور ذرات درشت خاک در معادله

1. Hydrologic Response Unit

2. Modified Universal Soil Loss Equation

گوگل ارث (Google Earth)، نظرهای کارشناسان و افراد محلی به عنوان اطلاعات جانبی استفاده شد تا در نهایت با دقت بیشتر نقشه‌های کاربری برای منطقه مطالعه شده تهیه شود.

کیفی رخ داده در اکوسیستم بررسی شده، تصاویر سنجنده‌های MSS، ETM+ و OLI ماهواره Landsat متعلق به سه دوره زمانی ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ استفاده شد (جدول ۱). علاوه بر این، از تصاویر به دست آمده از

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده برای منطقه مطالعه شده

تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	ماهواره	سنجنده	ردیف	گذر
۱۹۸۶	۲۹ اردیبهشت / ۱۳۶۵	لندست ۴-۵	TM	۳۴	۱۶۲
۲۰۰۰	۰۵ خرداد / ۱۳۷۹	لندست ۷	ETM	۳۴	۱۶۲
۲۰۱۵	۲۹ اردیبهشت / ۱۳۹۴	لندست ۸	OLI	۳۴	۱۶۲

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد [۱۸]. همچنین، از تفسیر چشمی داده‌های موجود بر اساس شناخت محقق از منطقه (آبخیزنشین) و نرم‌افزار گوگل ارث برای تهیه نقشه‌های با دقت زیاد استفاده شد. بعد از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای دوره‌های زمانی مختلف، ارزیابی نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از نمونه‌های تعلیمی از سطح منطقه، که به صورت تصادفی برداشت شده‌اند و در روند طبقه‌بندی دخالت داده نشده‌اند، انجام گرفت. برای این کار از ضریب کاپا<sup>۲</sup> (رابطه ۳) برای ارزیابی دقت نقشه‌های استخراجی استفاده شد.

$$Kappa = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \times 100 \quad (3)$$

که در این رابطه  $P_o$ : توافق مشاهده شده نسبتی میان ارزیاب‌ها و  $P_c$ : احتمال توافق مورد انتظار است.

#### مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی برای دوره آتی

برای پیش‌بینی روند تغییرات کاربری‌ها در سال‌های آتی از روش زنجیره مارکوف<sup>۳</sup> و مدل اتومای سلولی<sup>۴</sup> در محیط برنامه IDRISI استفاده شد. آنالیز زنجیره مارکوف برای تعیین میزان تغییر کاربری‌های مختلف دو ماتریس تهیه می‌کند تا به وسیله آن شبیه‌سازی تغییرات احتمالی در آینده انجام گیرد. به این منظور، از نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۰۰ برای شبیه‌سازی نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۵ استفاده شد. سپس، برای اعتبارسنجی مدل، نقشه کاربری اراضی شبیه‌سازی شده سال ۲۰۱۵ با

ابتدا کیفیت تصاویر ماهواره‌ای از نظر وجود خطای هندسی، ژئومتری، رادیومتری، پرتوسنجی مانند راه‌راه‌شدگی، زیر هم قرارنگرفتن خطوط اسکن، پیکسل‌های تکراری، خطاهای اتمسفری مانند وجود لکه‌های ابر بررسی شد. برای تفکیک و شناسایی بهتر پدیده‌ها به روش چشمی، تصویر رنگی کاذب برای هر تصویر ماهواره‌ای تهیه شد [۶]. برای بررسی تغییرات کاربری اراضی نقشه کاربری اراضی برای سه بازه زمانی ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ تهیه شد. به منظور تهیه نقشه کاربری نهایی از روش طبقه‌بندی نظارت شده استفاده شد. در این روش نخستین گام معرفی نمونه‌های تعلیمی برای هر طبقه از پوشش است. به این منظور، از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، نقشه‌های کاربری اراضی قدیمی منطقه، باز دیده‌های میدانی و تفسیر بصری تصاویر رنگی کاذب تولید شده بهره گرفته شد [۱۷]. بر اساس هدف تحقیق، کاربری‌های موجود در منطقه و پدیده‌های قابل شناسایی در تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده، هفت کلاس کاربری شامل آب، جنگل سوزنی‌برگ، جنگل پهن‌برگ متراکم، جنگل پهن‌برگ تنک، زراعت، بایر-مرتع و اراضی مسکونی برای منطقه تعریف شد. در این طبقه‌بندی انواع پدیده‌های مسکونی در یک طبقه کاربری و زمین‌های کشاورزی آبی و دیم با همدیگر در یک طبقه قرار گرفته است. پس از مشخص شدن نمونه‌های تعلیمی و کلاس‌های پوشش اراضی از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم بیشترین شباهت<sup>۱</sup> که بسیار معمول است در محیط نرم‌افزار ENVI4.8 برای

2. Kappa coefficient  
3. Markov chain  
4. Cellular Automata

1. Likelihood Maximum

تغییر کاربری اراضی پیش‌بینی شده بر میزان رواناب و بار معلق، درک بهتر رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبخیز و کمی کردن پاسخ هیدرولوژیکی تحت شرایط فعلی و آتی کاربری اراضی، شاخص‌های مختلف ارائه شده در جدول ۲ بررسی شد. شاخص‌های استفاده شده بر اساس تحقیقات [۲۰ و ۲۱] انتخاب شدند. برای محاسبه این شاخص‌ها بعد از استخراج مقادیر دبی و بار معلق مربوط به دوره پایه و آتی، آن‌گاه بر اساس کد نوشته شده در برنامه Matlab منحنی تداوم جریان (FDC<sup>۲</sup>) برای سری‌های زمانی مختلف دبی و بار معلق به دست آمد. آن‌گاه منحنی تداوم جریان به بخش‌های مختلف تقسیم شد و احتمال تجاوز وقوع مختلف صفر تا یک برای سری‌های مختلف به دست آمد. سپس، خصوصیت آن بررسی شد. منحنی FDC سه بخش اصلی دارد: ۱. بخش جریان زیاد (احتمال تجاوز جریان ۰/۰۲ تا صفر) که مشخص‌کننده پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به وقایع بارندگی شدید است؛ ۲. بخش میانی جریان (احتمال تجاوز جریان ۰/۲ تا ۰/۷) که مشخص‌کننده جریان مربوط به وقایع بارندگی با اندازه متوسط و همچنین مربوط به پاسخ آهسته جریان پایه اولیه و ثانویه میان مدت است و ۳. بخش جریان کم (احتمال تجاوز جریان ۰/۷ تا یک) که مربوط به جریان پایدار و درازمدت است که تحت تأثیر واکنش جریان پایه طی دوره‌های خشکسالی طولانی مدت است [۲۰].

### بحث و نتایج

#### تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه شده و آشکارسازی تغییرات

نقشه کاربری اراضی برای منطقه مطالعاتی برای سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ میلادی که به روش طبقه‌بندی نظارت شده تهیه شده در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، بر اساس نقشه‌های به دست آمده مساحت هر یک از کاربری‌های مختلف موجود در منطقه و میزان تغییرات طی دوره‌های مختلف محاسبه و در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

نقشه واقعی به دست آمده از طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای همان سال مقایسه شد و ضریب کاپای آن محاسبه شد و سپس نقشه پیش‌بینی برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ به دست آمد.

یک زنجیره مارکوف دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی  $X_1, X_2, X_3, \dots$  است که خاصیت مارکوف دارند (رابطه ۴):

$$P_r(X_{n+1} = x | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = P_r(X_{n+1} = x | X_n = x_n) \quad (4)$$

مقادیر ممکن برای  $X_i$ ، یک مجموعه قابل شمارشی را می‌سازد که فضای حالت نام دارد. زنجیره مارکوف مجموعه‌ای از حالات ممکن تعریف می‌شود که این فرایند از یک وضعیت شروع شده و به طور متوالی از وضعیتی به وضعیت دیگر جابه‌جا می‌شود و هر کدام یک گام تلقی می‌شود. در این مدل دو نقشه مربوط به دو دوره زمانی به صورت ماتریسی با یکدیگر مقایسه می‌شوند، به طوری که بر اساس بیشترین احتمال پیش‌بینی می‌شود که هر پیکسل در هر کلاس با چه احتمالی در همان کلاس می‌ماند یا به کلاس دیگر تبدیل می‌شود [۱۹].

مدل CA-Markov<sup>۱</sup> تلفیقی از سلول‌های خودکار و زنجیره مارکوف است. زنجیره مارکوف و CA هر دو در واقع مدل دینامیک گسسته در زمان و موقعیت‌اند. مشکل ذاتی زنجیره مارکوف این است که اطلاعات و موقعیت مکانی را در نظر نمی‌گیرد. احتمال تبدیل ممکن است برای هر گروه با صحت و دقت همراه باشد اما فاقد دانش و آگاهی از توزیع مکانی تصادفی درون هر گروه کاربری زمین است. به بیانی، مؤلفه مکانی در خروجی مدل وجود ندارد. به همین دلیل از CA برای اضافه کردن مشخصه مکانی به مدل استفاده می‌شود. در این مدل پروسه زنجیره مارکوف تغییرات زمانی را در میان کلاس کاربری/ پوشش زمین بر اساس احتمالات تبدیل کنترل می‌کند در حالی که تغییرات مکانی به وسیله قوانین محلی تعیین شده از فیلتر مکانی CA یا نقشه شایستگی کنترل می‌شود [۱۹].

شاخص‌های آماری استفاده شده برای بررسی اثر تغییر کاربری اراضی طی دوره آتی بر رفتار هیدرولوژیکی در این مطالعه به عنوان یک رویکرد جدید برای بررسی اثر

جدول ۲. شاخص‌های آماری استفاده‌شده برای بررسی اثر تغییر کاربری اراضی طی دوره آتی بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه تیل آباد

ردیف	نام شاخص	نام شاخص	فرمول
۱	درصد اریب ضریب رواناب (رسوب)	$SF Coef$	$SF Coef = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{\sum_{i=1}^N P_i}, i = 1, 2, \dots, N$ , $\% \Delta SF Coef = \frac{SF Coef (FDC_2) - SF Coef (FDC_1)}{SF Coef (FDC_1)} \times 100$
۲	درصد اریب میانگین رواناب (رسوب)	$BiasRR$	$Mean SF = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}, i = 1, 2, \dots, N$ , $BiasRR = \frac{Mean SF(FDC_2) - Mean SF(FDC_1)}{Mean SF(FDC_1)} \times 100$
۳	درصد اریب چولگی رواناب (رسوب)	$SF Skew$	$SF Skew = Mean SF - SF Med$ , $\% \Delta SF Skew = \frac{SF Skew (FDC_2) - SF Skew (FDC_1)}{SF Skew (FDC_1)} \times 100$
۴	درصد اریب تغییرپذیری رواناب (رسوب)	$SF CV$	$SF CV = std (FDC_i) - Mean SF(FDC_i)$ , $\% \Delta SF CV = \frac{SF CV(FDC_2) - SF CV(FDC_1)}{SF CV(FDC_1)} \times 100$
۵	درصد اریب شیب قطاع میانی	$BiasFDCmidslope$	$BiasFDCmidslope = \frac{(\log(FDC_{2,0.2}) - \log(FDC_{2,0.7})) - (\log(FDC_{1,0.2}) - \log(FDC_{1,0.7}))}{(\log(FDC_{1,0.2}) - \log(FDC_{1,0.7}))} \times 100$
۶	درصد اریب مقادیر جریان در قطاع بالا (اریب جریان بالا)	$BiasFHV$	$BiasFHV = \frac{\int_0^{0.02} FDC_{2,p} dp - \int_0^{0.02} FDC_{1,p} dp}{\int_0^{0.02} FDC_{1,p} dp} \times 100$
۷	درصد اریب مقادیر جریان در قطاع پایین (اریب جریان پایین)	$BiasFLV$	$BiasFLV = \frac{\int_{0.7}^1 (\log(FCD_{2,p}) - \log(Q_{min})) dp - \int_{0.7}^1 (\log(FCD_{1,p}) - \log(Q_{min})) dp}{\int_{0.7}^1 (\log(FCD_{1,p}) - \log(Q_{min})) dp} \times 100$
۸	درصد اریب قطاع میانی سطوح جریان (میانه جریان)	$BiasFMM$	$BiasFMM = \frac{SF Med(FDC_2) - SF Med(FDC_1)}{SF Med(FDC_1)} \times 100$

در این روابط  $Q_i$  رواناب ماهانه در زمان  $i$  ( $m^3/s$ )؛  $P_i$  بارندگی ماهانه در زمان  $i$  (mm)؛  $N$  تعداد مشاهدات؛  $\Delta$  درصد تغییرات؛  $std$ : انحراف معیار؛  $SF Med$ : میانه مقادیر جریان؛  $Mean SF$ : میانگین مقادیر جریان؛  $FDC_{i,p}$ : رواناب با احتمال تجاوز از  $p$  شماره  $i$  منحنی تداوم جریان (FDC)؛  $Q_{min}$ : مقدار حداقل جریان از بین همه مقادیر منحنی تداوم جریان شماره  $i$  ( $FCD_{i,p}$ )

در یک بررسی کلی روند تغییرات کاربری اراضی/پوشش زمین حوضه آبخیز تیل‌آباد طی ۳۰ سال بررسی شده نشان می‌دهد طبقه جنگل سوزنی با بیشترین افزایش درصد مساحت روبه‌رو بوده است، ولی مساحت این کاربری در برابر سایر کاربری‌ها ناچیز است. افزایش این نوع کاربری به علت کاشت درختان سوزنی‌برگ و غیر بومی در منطقه طی این بازه زمانی است. مناطق مسکونی نیز با روندی تقریباً یکنواخت در حال افزایش است که این افزایش طی ۳۰ سال برابر با ۱۰۶/۲۱ درصد بوده است. همچنین، کاربری زراعت به شدت در این بازه زمانی افزایش یافته است (به مقدار ۸۷/۶۴۰ درصد). از طرف دیگر، کاربری جنگل پهن‌برگ تُنک با مقدار کاهشی ۴۶/۵۰ درصدی بیشترین کاهش مساحت را داشته که وسعتی برابر با ۱۵۰۵۲/۰۸ هکتار از مساحت آن کاهش پیدا کرده است. کاهش مساحت کاربری‌های جنگل پهن‌برگ متراکم و مرتع در رتبه‌های بعدی قرار دارند و در طی سی سال ۳۰/۱۸ و ۱۶/۸۹ درصد از مساحت آنها کم شده است. نتایج مربوط به برآورد دقت طبقه‌بندی‌ها نیز در جدول ۳ ارائه شده است. دقت طبقه‌بندی‌ها به طور کلی بیش از ۷۵ درصد و برای استفاده در مدل مارکوف مناسب است [۱۸]. بر این اساس، شاخص کاپا برای کاربری‌های سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ به ترتیب برابر ۰/۹۵۵، ۰/۸۶۵ و ۰/۹۶۱ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت خوب روش الگوریتم حداکثر احتمال برای طبقه‌بندی رقومی تصاویر ماهواره‌ای برای منطقه مطالعه شده دارد که با نتایج Karimi و Komaki [۱۸]؛ Heidarizadi و Mohamadi [۱۹] و Sang و همکارانش [۲۲] مطابقت دارد.

#### مدل‌سازی تغییرات به وسیله مدل سلول‌های خودکار- مارکوف در سال‌های آتی

پس از بررسی نتایج به دست آمده از صحت مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی/پوشش زمین در سال ۲۰۱۵، از مدل سلول‌های خودکار مارکوف با ضریب کاپای معادل ۰/۷۹۹ برای پیش‌بینی میزان تغییرات تا سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ استفاده شد. در جدول‌های ۳ و ۴ میزان مساحت هر یک از طبقات کاربری اراضی و میزان تغییرات آنها نسبت به دوره پایه (سال ۲۰۰۰) ارائه شده است.

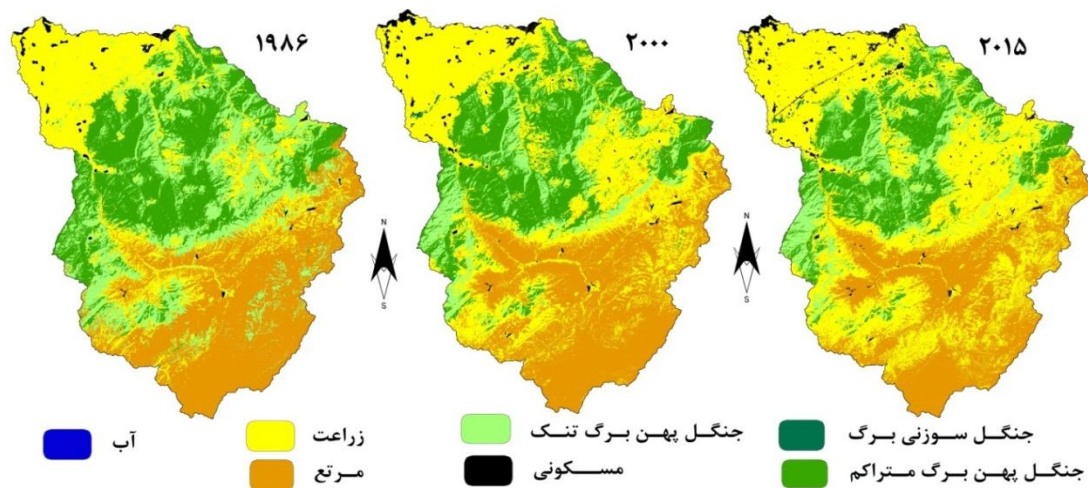
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۰ بیشترین افزایش وسعت مساحت مربوط به کاربری جنگل سوزنی‌برگ با مقدار ۹۶/۱۸ درصد است. به طوری که مساحت این کاربری اراضی از ۱۳۲/۴۹ هکتار در سال ۱۹۸۶ به ۲۵۹/۹۱ هکتار در سال ۲۰۰۰ افزایش پیدا کرده است. بعد از طبقه جنگل سوزنی‌برگ، طبقه زراعت با آهنگ افزایش ۵۳/۵۹ درصدی در جایگاه دوم قرار دارد. مساحت این کاربری از ۳۷۱۲۰/۴۹ هکتار در سال ۱۹۸۶ به ۵۷۰۱۱/۷۸ هکتار در سال ۲۰۰۰ تغییر یافته است. مناطق مسکونی با افزایش ۴۷/۱۳۸ درصدی سومین کاربری است که طی این بازه زمانی افزایش مساحت یافته است. مساحت این کاربری از ۱۲۸۹/۵۳ هکتار در سال ۱۹۸۶ به ۱۸۹۷/۳۹ هکتار در سال ۲۰۰۰ افزایش یافته است. همچنین، در این بازه زمانی مساحت کاربری‌های آب، جنگل پهن‌برگ متراکم، جنگل پهن‌برگ تُنک و مرتع کاهش یافته است. بیشترین آهنگ کاهشی مربوط به کاربری‌های جنگل پهن‌برگ تُنک و جنگل پهن‌برگ متراکم با کاهش ۵۰/۱۳ و ۹/۵۷ درصدی است.

بر اساس جدول‌های ۳ و ۴ در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۵ روند افزایشی کاربری‌های مسکونی، جنگل سوزنی‌برگ و زراعت ادامه پیدا کرده است. در این بازه زمانی مساحت جنگل پهن‌برگ تُنک نیز ۷/۲۸ درصد افزایش یافته است که علت آن مربوط به تغییر انواع دیگر کاربری اراضی از جمله کاربری جنگل پهن‌برگ متراکم به این نوع کاربری است. در این بازه زمانی بیشترین افزایش وسعت مربوط به کاربری مسکونی به مقدار ۴۰/۱۴ درصد است که در سال ۲۰۱۵ مساحتی برابر ۲۶۵۹/۰۸ هکتار از حوضه را می‌پوشاند که مقدار درخور توجهی است. گسترش طبقه آب و زراعت به عنوان دومین و سومین کاربری در حال افزایش طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ معادل ۲۸/۲۱ و ۲۲/۱۷ درصد است. همچنین، مساحت کاربری‌های جنگل پهن‌برگ متراکم و مرتع همانند بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۰ کاهش یافت. آهنگ کاهشی این تغییرات برای کاربری‌های یادشده به ترتیب ۲۲/۸۰ و ۱۵/۲۵ درصد است. به طور کلی، در کاربری اراضی سال ۱۹۸۶ بیشترین مساحت حوضه به کاربری‌های جنگل پهن‌برگ متراکم، زراعت و مرتع و در سال ۲۰۰۰ به کاربری‌های زراعت، مرتع و جنگل پهن‌برگ متراکم اختصاص دارد. در نقشه کاربری سال ۲۰۱۵ نیز بخش زراعت به شدت افزایش یافته و کاربری مرتع دومین کاربری حوضه از نظر مساحت است.



بیشترین مساحت حوضه را (۴۹/۱۹ درصد) شامل می‌شود. همچنین، کاربری آب (استخرهای روباز) با رشد ۲۲/۶۱ درصدی در سال ۲۰۲۵ مساحتی حدود ۲۵/۸۲ هکتار را شامل می‌شود. همچنین، جنگل پهن برگ تُنک و جنگل سوزنی‌برگ به ترتیب رشد ۶/۲۹ و ۵/۸۲ درصدی خواهند داشت. طی دوره آتی ۲۰۲۵ بیشترین کاهش مساحت مربوط به طبقه جنگل پهن برگ متراکم است که ۳۳/۸۲ درصد از مساحت آن کاسته می‌شود (۱۱۶۰۶/۷۳ هکتار) و در سال ۲۰۲۵ مساحت آن به ۲۲۷۰۹/۵۲ هکتار می‌رسد. همچنین، طبقه مرتع نیز ۲۱/۰۷۴ درصد کاهش می‌یابد و مساحت آن ۲۲/۷۲ درصد حوضه را شامل خواهد شد.

همچنین، در شکل ۳ نقشه پیش‌بینی شده برای دوره‌های آتی ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آشکارسازی تغییرات پوشش برای سال‌های آتی به گونه‌ای است که در صورت ادامه روند موجود در منطقه مساحت طبقات آب، جنگل سوزنی‌برگ، زراعت و مناطق مسکونی طی هر دو دوره آتی افزوده خواهد شد و مساحت کاربری‌های جنگل پهن برگ متراکم، جنگل پهن برگ تُنک و مرتع کم خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌بینی کاربری اراضی برای دوره آتی ۲۰۲۵ نشان می‌دهد با ادامه روند موجود بیشترین افزایش مربوط به طبقه مسکونی به میزان ۶۲/۰۳ درصد است و میزان مساحت آن به ۳۰۷۴/۳۳ هکتار خواهد رسید. همچنین، طبقه زراعت با رشد ۳۲/۸۶۷ درصدی در سال ۲۰۲۵



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی / پوشش زمین به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ میلادی

۲۰۰۰ به ۱۹۵۲۲/۳۹ هکتار در سال ۲۰۴۰ می‌رسد که بیان‌کننده کاهش ۴۳/۱۱ درصدی است. همچنین، بر اساس پیش‌بینی مدل کاربری جنگل پهن برگ تُنک و مرتع به‌ترتیب ۲۹/۸۷ و ۲۷/۵۳ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج Karimi و Komaki [۱۸]؛ ؛ Heidarizadi و Mohamadi [۱۹]؛ Sang و همکارانش [۲۲] و Chang و Chang [۲۳] در توانایی مدل مارکوف برای پیش‌بینی تغییرات پوشش اراضی، هم‌سو است و با نتایج Farajollahi و همکارانش [۲۴] که کاهش اراضی جنگلی، مرتع و افزایش مناطق مسکونی و زراعت را برای دوره آتی در استان گلستان پیش‌بینی کرده‌اند همخوانی دارد.

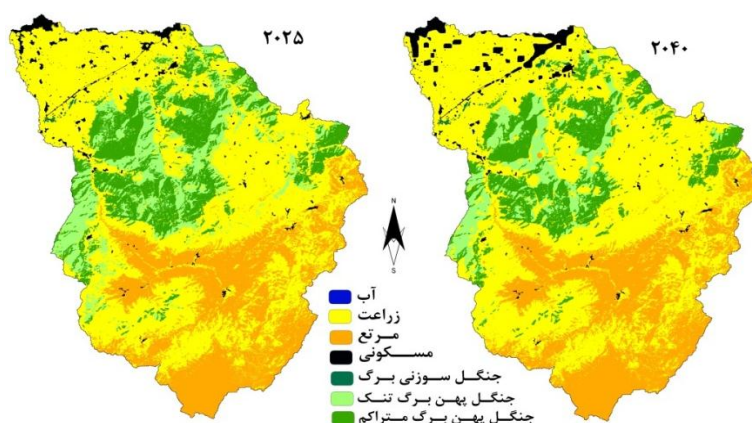
روند تغییرات طبقات مختلف کاربری طی دوره آتی ۲۰۴۰ نیز تا حدود زیادی مانند دوره پیش‌بینی آتی ۲۰۲۵ است. با ادامه روند موجود در منطقه طبقه مسکونی به‌شدت افزایش می‌یابد و آهنگ صعودی ۱۲۹/۴۴ درصدی دارد و مساحت آن به ۴۳۵۳/۳۴ هکتار می‌رسد. در این سال بیش از نیمی از مساحت حوضه اختصاص به کاربری زراعت خواهد داشت و با رشد ۵۱/۳۲ درصدی مساحت آن به ۸۶۲۷۱/۱۱ هکتار می‌رسد. همچنین، مساحت کاربری جنگل سوزنی‌برگ و آب نیز به ترتیب ۴۰/۱۹ و ۲۳/۳۷ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین میزان کاهشی مربوط به کاربری جنگل پهن برگ متراکم است که احتمالاً مساحت آن از ۲۶۴۹۳/۰۱ هکتار در سال

جدول ۳. روند تغییرات کاربری اراضی طی دوره مطالعاتی

کاربری	مساحت ۱۹۸۶		مساحت ۲۰۰۰		مساحت ۲۰۱۵		کاربری اراضی پیش‌بینی‌شده	
	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار
آب	۰/۰۱۳۹	۲۱/۳۳	۰/۰۱۳۷	۲۱/۰۶	۰/۰۱۷۵	۲۷/۰۰	۰/۰۱۶۹	۲۵/۹۸
جنگل سوزنی	۰/۰۱۵۹	۱۳۲/۴۹	۰/۱۶۸۸	۲۵۹/۹۱	۰/۱۷۰۹	۲۶۳/۱۶	۰/۱۷۸۶	۳۶۴/۳۸
جنگل پهن	۲۴/۶۴۱	۳۷۹۴۵/۴۶	۲۲/۲۸۴	۳۴۳۱۶/۲۵	۱۷/۲۰۴	۲۶۶۹۳/۰۱	۱۴/۴۷۷	۱۹۵۲۲/۳۹
متراکم	۲۱/۰۲۱	۳۲۳۷۱/۵۷	۱۰/۴۸۴	۱۶۱۴۴/۶۹	۱۱/۲۴۷	۱۷۳۱۹/۴۹	۱۱/۱۴۴	۱۱۳۲۲/۷۰
جنگل تنک	۲۴/۱۰۵	۳۷۰۱۲/۴۹	۳۷/۰۲۲	۵۷۰۱۱/۷۸	۴۵/۲۳۱	۶۹۶۵۲/۹۹	۴۹/۱۹۰	۸۶۲۷۱/۱۱
زراعت	۲۹/۳۶۵	۴۵۲۲۱/۰۶	۲۸/۷۹۵	۴۴۳۴۲/۸۶	۲۴/۴۰۳	۳۷۵۷۹/۱۸	۲۲/۷۲۷	۳۲۱۳۴/۰۹
بایر- مرتع	۰/۸۳۷	۱۲۸۹/۵۳	۱/۳۳۲	۱۸۹۷/۳۹	۱/۷۲۷	۲۶۵۹/۰۸	۱/۹۹۶	۴۳۵۲/۳۴
مسکونی	۱۰۰	۱۵۳۹۹۳/۹	۱۰۰	۱۵۳۹۹۳/۹	۱۰۰	۱۵۳۹۹۳/۹	۱۰۰	۱۵۳۹۹۳/۹
مجموع	۰/۹۵۵۳	۱۵۳۹۹۳/۹	۰/۸۶۵۵	۱۵۳۹۹۳/۹	۰/۹۶۱۲	۱۵۳۹۹۳/۹	۰/۷۹۹۳	۱۵۳۹۹۳/۹
کاپا								

جدول ۴. درصد تغییرات مساحت کاربری اراضی طی دوره مطالعاتی مختلف

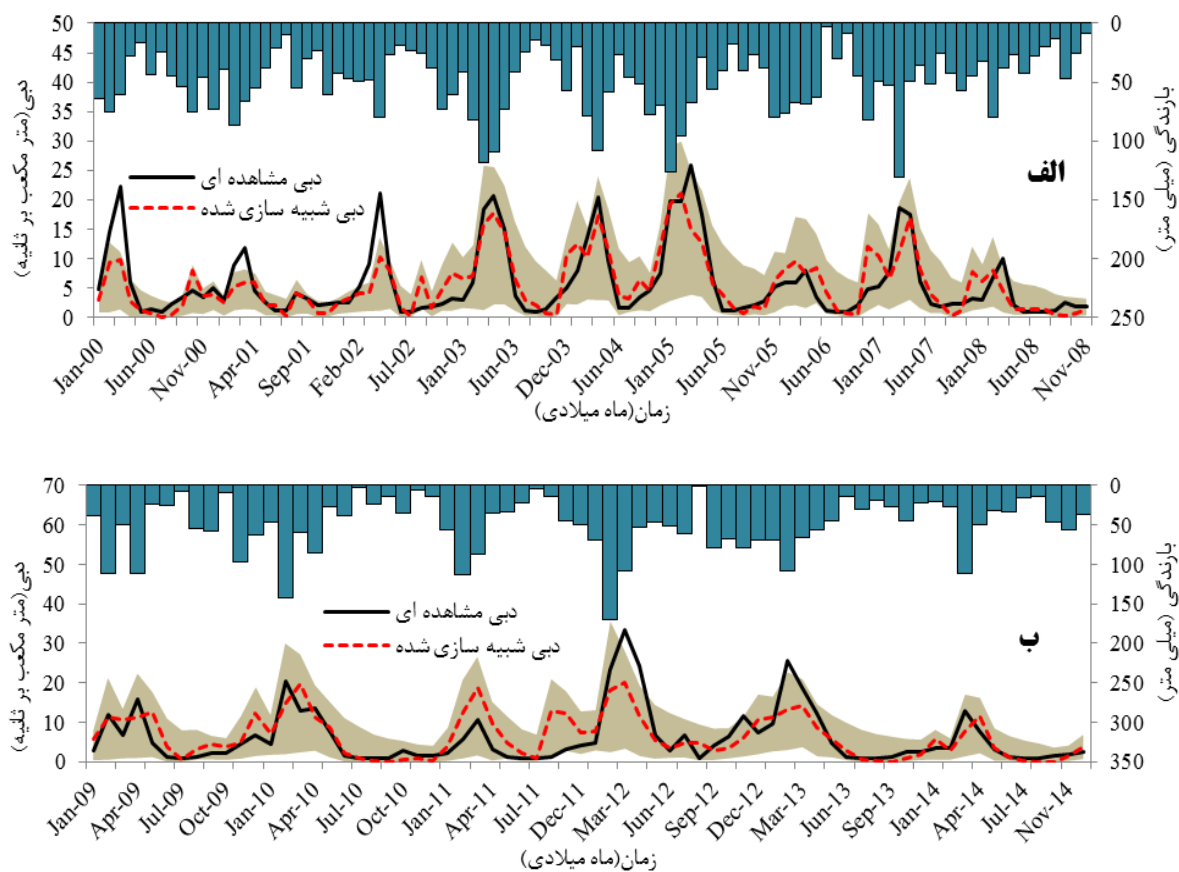
کاربری اراضی	۱۹۸۶-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۲۰۱۵	۲۰۱۵-۱۹۸۶	۲۰۱۵-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۲۰۴۰
آب	-۱/۲۶۶	۲۸/۲۰۵	۲۶/۵۸۲	۲۲/۶۱۸	۲۳/۳۷۴
جنگل سوزنی	۹۶/۱۷۶	۱/۲۵۰	۹۸/۶۲۹	۵/۸۲۳	۴۰/۱۹۵
جنگل پهن متراکم	-۹/۵۶۴	-۲۲/۷۹۷	-۳۰/۱۸۱	-۳۳/۸۲۳	-۴۳/۱۱۱
جنگل پهن تنک	-۵۰/۱۲۷	۷/۲۷۷	-۴۶/۴۹۸	۶/۲۹۷	-۲۹/۸۶۷
زراعت	۵۳/۵۸۶	۲۲/۱۷۳	۸۷/۶۴۰	۳۲/۸۶۷	۵۱/۳۲۲
بایر- مرتع	-۱/۹۴۲	-۱۵/۲۵۳	-۱۶/۸۹۹	-۲۱/۰۷۴	-۲۷/۵۳۳
مسکونی	۴۷/۱۳۸	۴۰/۱۴۴	۱۰۶/۲۰۵	۶۲/۰۲۹	۱۲۹/۴۳۸



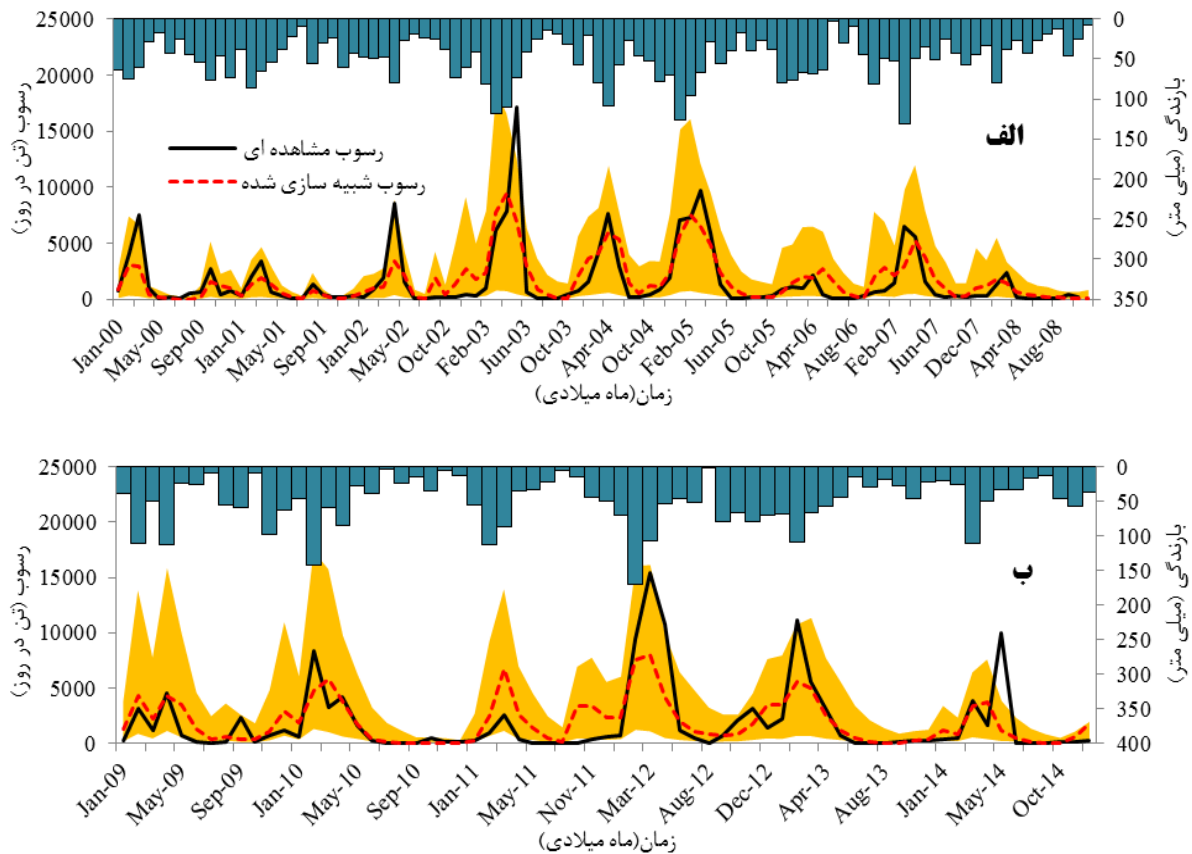
شکل ۳. نقشه کاربری اراضی / پوشش زمین شبیه‌سازی‌شده در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ میلادی

تیل آباد طی دوره واسنجی دبی، مقدار P\_factor برابر ۰/۹۲ و R\_factor برابر ۱/۳۷ است. مقادیر این دو فاکتور برای دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۴ و ۱/۵۴ به دست آمدند. همچنین، نتایج شبیه‌سازی رسوب نشان داد مقادیر ضرایب  $R^2$ ، ENS، PBIAS و RMSE برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۵، ۰/۸- و ۱۶۴۳/۲ است. مقادیر این ضرایب برای دوره اعتبارسنجی نیز ۰/۶۱، ۰/۵۷، ۰/۴- و ۲۰۷۳/۷ به دست آمد. همچنین، درجه عدم قطعیت مدل توسط دو فاکتور P-factor و R-factor برای رسوب طی دوره واسنجی ۰/۹۷ و ۱/۵۱ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۹۱ و ۱/۴۳ به دست آمد (جدول ۴) که با توجه به دامنه‌های تفسیری استفاده‌شده در تحقیقات گذشته، قابل قبول ارزیابی شد.

شبیه‌سازی رواناب و رسوب خروجی از حوضه طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در شکل‌های ۴ و ۵ در مقیاس زمانی ماهانه نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۵ شاخص‌های ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب و رسوب ماهانه حوضه آبخیز تیل آباد ارائه شده است. شبیه‌سازی دبی ماهانه حوضه آبخیز تیل‌آباد در دوره واسنجی نشان داد مقدار ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برابر ۰/۷۰، ضریب راندمان نش- ساتکلیف  $E_{NS}$  (۰/۷۱)، درصد اریب (PBIAS) ۳/۹ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۳/۳۲ است. مقادیر این ضرایب برای دوره صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۶۱، ۲/۱- و ۴/۳۶ به دست آمدند. همچنین، درجه عدم قطعیت مدل توسط دو فاکتور P-factor و R-factor محاسبه شد. برای حوضه آبخیز



شکل ۴. سری زمانی منتخب دبی ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه در مرحله واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب)



شکل ۵. سری زمانی منتخب رسوب ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری اراز کوسه در مرحله واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب)

داد کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب بیشتر از شبیه‌سازی بار رسوب است که با نتایج تحقیقات قبلی Bieger و همکارانش [۲]؛ Huang و Lo [۱۱]؛ Zuo و همکارانش [۱۲]؛ Ngo و همکارانش [۱۴] و Gebremicael و همکارانش [۲۵] دارد. دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی ضعیف‌تر رسوب نسبت به رواناب کمبود داده‌های مشاهداتی رسوب برای واسنجی مناسب پارامترها رسوب و همچنین ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر در حوضه مطالعه شده است. یکی دیگر از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی نکردن رسوب به ناتوانی مدل در شبیه‌سازی بسیار خوب جریان مرتبط است. از علت‌های دیگر ضعف مدل صحت کم داده‌های رسوب استفاده شده و مهم‌تر از همه پیوسته نبودن اطلاعات رسوب اشاره کرد.

نتایج آنالیز حساسیت نیز نشان داد حساس‌ترین پارامترهای مؤثر بر دبی جریان  $CH\_N2$  (ضریب مانینگ رودخانه اصلی)، REVAPMN (کمترین مقدار ذخیره آب در سفره که برای شروع تبخیر آب زیرزمینی از طریق موینگی یا

همان طور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی انطباق زیادی بین مقادیر اوج بارندگی و دبی و رسوب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود دارد و در ایام بدون بارندگی مقادیر شبیه‌سازی شده صفر است که علت آن مربوط به نادیده گرفتن جریان آب پایه و آب زیرزمینی برای حوضه آبخیز تیل‌آباد توسط مدل است. همچنین، در جدول ۵ مقادیر متوسط رواناب و رسوب و مقادیر انحراف طی هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده است. مقادیر زیاد ضرایب  $R^2$  و  $E_{NS}$  و مقادیر کم PBIAS و RMSE طی هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان‌دهنده دقت زیاد مدل SWAT طی هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی است. مقادیر نسبتاً زیاد p-factor و کم  $R\_factor$  در این حوضه در پایه زمانی ماهانه بیان‌کننده دقت زیاد مدل در شبیه‌سازی و عدم قطعیت کم پیش‌بینی‌هاست به طوری که بیشتر داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، نتایج نشان

هر كيلومتر از بازه)، PRF (فاكتور تعديل ميزان اوج براى روندپايى رسوب در كانال)، SPEXP (ضريب re-entrainment خطى براى روندپايى رسوب كانال) و USLE\_K (فاكتور فرسايش پذيرى در معادله USLE) هستند.

تغذيه سفره عميق لازم است)، SLSUBBSN (متوسط طول شيب زمين در هر HRU) و SURLAG (ضريب تاخير رواناب سطحى) و حساس ترين پارامترهاى مؤثر بر رسوب، پارامترهاى CH\_COV (ضريب ثابت زمان ذخيره براى جريان حداقل براى

جدول ۵. ضرايب آمارى ارزيابى دقت مدل در شبیه‌سازى رواناب و رسوب ماهانه طى دوره‌هاى واسنجى و صحت‌سنجى

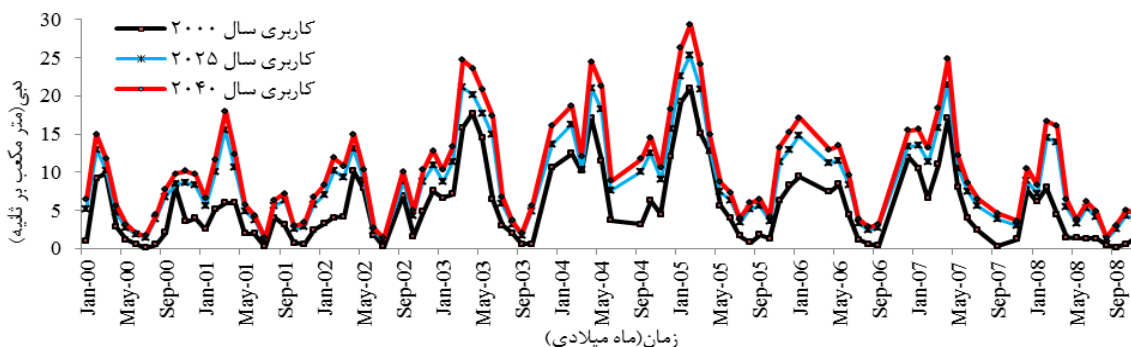
شاخص دوره	NS	R2	p_factor	r_factor	RMSE	PIBIAS	میانگین مقادیر مشاهدات	میانگین مقادیر شبیه‌سازى	انحراف معيار مشاهداتى	انحراف معيار شبیه‌سازى
واسنجى دبی	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۹۲	۱/۳۷	۳/۳۲	۳/۹	۵/۷۹	۵/۵۴	۶/۰۳	۴/۹۴
اعتبارسنجى دبی	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۹۴	۱/۵۴	۴/۳۶	-۲/۱	۶/۱۳	۶/۳۷	۶/۸۸	۵/۴۲
واسنجى رسوب	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۹۷	۱/۵۱	۱۶۴۳/۲	-۰/۸	۱۶۳۵/۲۱	۱۷۰/۱/۲۱	۲۷۷۱/۳۲	۱۹۶۴/۷۹
اعتبارسنجى رسوب	۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۹۱	۱/۴۳	۲۰۷۳/۷	-۲/۴	۱۸۶۱/۰۲	۱۹۴۳/۲۹	۳۱۵۵/۶۶	۱۹۶۹/۳۱

شبیه‌سازى رواناب و رسوب تحت تأثیر کاربرى اراضى پيش‌بینى شده

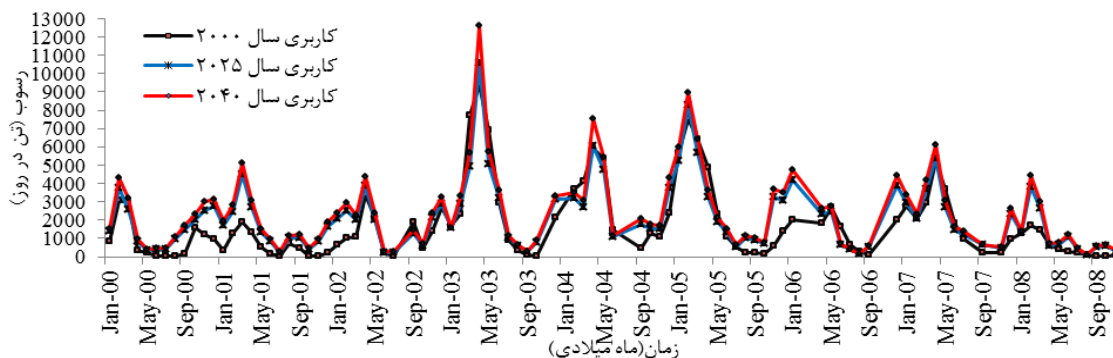
در اين مطالعه علاوه بر نقشه کاربرى اراضى سال ۲۰۰۰ به عنوان کاربرى فعلى که با استفاده از آن مدل واسنجى و اعتبارسنجى شد، براى دو دوره ديگر نيز نقشه‌هاى کاربرى اراضى با استفاده از تصاویر ماهواره‌اى تهیه شد و به مدل معرفى شد. به اين صورت پس از اطمینان از قابليت مدل در شبیه‌سازى دبی حوضه آبخيز تيل آباد با ثابت در نظر گرفتن همه پارامترها به غير از کاربرى اراضى مدل بار ديگر براى شرايط کاربرى‌هاى جديد اجرا شد و تغييرات رواناب و رسوب خروجى مدل با رسم هیدروگراف مربوط به آن بررسى شد و در هر حالت رواناب و رسوب شبیه‌سازى شده با شاهد (شبیه‌سازى شده در کاربرى فعلى) مقايسه شد. متغيرهاى بررسى شده شامل رواناب سطحى، جريان زیر قشرى، جريان برگشتى از آبخوان سطحى، آب گذرى به آبخوان سطحى و نفوذپذيرى، آب گذرى به آبخوان عميق، مقدار کل آب (مجموع رواناب سطحى، جريان زیرقشرى و زیرزمینى و جريان برگشتى از آبخوان سطحى)، آب گذرى آب از داخل

خاک، تبخیر و ترقق واقعى و مقادیر متوسط روزانه و ماهانه رواناب و رسوب براى هر یک از کاربرى‌هاست. در شکل‌هاى ۶ و ۷ هیدروگراف رواناب و رسوب متوسط ماهانه براى هر یک از کاربرى‌ها و در جدول ۶ نيز خروجى‌هاى به‌وجودآمده در گزینه‌هاى مختلف مدیریتی ارائه شده است.

با نگاهی اجمالى به شکل‌هاى ۶ و ۷ و جدول ۶ می‌توان دریافت که مقادیر رواناب و رسوب طى هر دو دوره آتى افزایش می‌یابد که اين روند افزایشى در دوره آتى دورتر (سال ۲۰۴۰) شديدتر است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، تغيير کاربرى اراضى از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۲۵ در منطقه مطالعه شده موجب افزایش دبی متوسط روزانه به میزان ۵۹/۴۷ درصد و افزایش رسوب متوسط روزانه به میزان ۲۴/۵۱ درصد می‌شود. اين افزایش دبی متوسط روزانه براى سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۰۰ شديدتر است و برابر ۸۵/۹۱ درصد است. همچنين، مقادیر رسوب متوسط روزانه نيز به میزان ۴۲/۲۳ درصد نسبت به سال ۲۰۰۰ افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقایسه بین رواناب شبیه‌سازى شده طى دوره‌هاى آتى و شاهد



شکل ۷. مقایسه بین رسوب شبیه‌سازی شده طی دوره‌های آبی و شاهد

جدول ۶. مقایسه اثر کاربری اراضی پیش‌بینی شده طی دوره آبی بر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی

مؤلفه کاربری	بارندگی متوسط (میلی‌متر)	رواناب سطحی (میلی‌متر)	جریان زیرقشری (میلی‌متر)	جریان آب زیرزمینی (میلی‌متر)	جریان برگشتی از آبخوان سطحی (میلی‌متر)	تغذیه آبخوان عمیق (آب‌گذری به آبخوان عمیق) (میلی‌متر)
کاربری سال ۲۰۰۰	۵۹۷/۱	۵۱/۰۷	۱۳۷/۴۴	۴۲/۹۹	۳۳/۶	۷۲/۲۸
کاربری سال ۲۰۲۵	۵۹۷/۱	۸۳/۸۹	۲۶۵/۹۸	۱۵/۳۸	۴/۱۱	۳۶/۱۲
درصد تغییرات	.	۶۴/۲۶	۹۳/۵۲	-۶۴/۳۳	-۸۷/۷۷	-۵۰/۰۳
کاربری سال ۲۰۴۰	۵۹۷/۱	۸۶/۹۷	۲۸۱/۷۲	۹/۸۵	۳/۵۳	۲۷/۰۹
درصد تغییرات	.	۷۰/۳۰	۱۰۴/۹۸	-۷۷/۰۹	-۸۹/۴۹	-۶۲/۵۲

مؤلفه کاربری	مقدار کل آب (میلی‌متر)	آب‌گذری به آبخوان سطحی و نفوذپذیری (میلی‌متر)	تراوش یا آب‌گذری آب از داخل خاک (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر)	دبی متوسط روزانه (مترمکعب بر ثانیه)	رسوب متوسط روزانه (تن در روز)
کاربری سال ۲۰۰۰	۲۳۱/۳۷	۲۶۱/۹۹	۲۴۹/۵۵	۱۵۸/۲	۵/۵۴	۱۷۰/۱۳۱
کاربری سال ۲۰۲۵	۳۶۴/۹۱	۷۹/۳	۷۸/۶	۱۶۷/۸	۸/۸۴	۲۱۱۸/۲۷
درصد تغییرات	۵۷/۷۲	-۶۹/۷۳	-۶۸/۵۰	۶/۰۷	۵۹/۴۷	۲۴/۵۲
کاربری سال ۲۰۴۰	۳۷۸/۲۳	۵۹/۴۷	۵۸/۸۱	۱۶۹/۲	۱۰/۳۱	۲۴۱۹/۷۶
درصد تغییرات	۶۳/۴۷	-۷۷/۳۰	-۷۶/۴۳	۶/۹۵	۸۵/۹۱	۴۲/۲۴

جریان آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان عمیق و آب‌گذری دانست. کاهش پوشش به واسطه تخریب سبب افزایش رواناب از طریق کاهش مقادیر نفوذپذیری در حوضه مطالعه شده می‌شود. تغییر رواناب طی سال با تغییر تعادل آبی سبب افزایش خطر وقایعی مانند سیلابی شدن و خشکسالی در حوضه آبخیز می‌شود، بنابراین برای غلبه بر این مشکلات باید که مدیریتی منظم و برنامه‌ریزی شده اعمال شود.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد طی دوره‌های آبی با تغییر نوع کاربری اراضی رواناب سطحی، مقدار کل آب، رسوب، جریان زیرقشری و تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد و به‌عکس جریان آب زیرزمینی، جریان برگشتی از آبخوان سطحی، تغذیه آبخوان عمیق، آب‌گذری به آبخوان سطحی و نفوذپذیری و آب‌گذری آب از داخل خاک کاهش می‌یابد. یکی از دلایل افزایش رواناب را می‌توان کاهش نفوذپذیری،

[۸] در خصوص تغيير كاربرى از جنگل و مرتع به كاربرى كشاورزى و Wang و همكارانش [۱۰] در خصوص اثر تبديل اراضى جنگلى به اراضى مرتعى به منظور افزايش رواناب، و رسوب، كاهش آب زيرزمينى، كاهش نفوذپذيرى، كاهش آب گذرى و كاهش جريان پايه مطابقت دارد. همچنين، با نتايج مطالعات Khoi و Suetsugi [۶] كه بيان كردند كاهش اراضى جنگلى سبب افزايش تبخير و تعرق مى‌شود، مطابقت دارد؛ و با نتايج Wang و همكارانش [۱۰] در تبديل اراضى جنگلى به اراضى مرتعى، كه موجب افزايش تبخير و تعرق شد، مطابقت ندارد.

#### ارزىابى شاخص‌هاى مختلف هيدرولوژيكي

نتايج مربوط به ارزىابى سرى‌هاى زمانى رواناب و رسوب بر اساس شاخص‌هاى مختلف هيدرولوژيكي ارائه شده در جدول ۲ در شكل‌هاى ۸ و ۹ نشان داده شده است. بر اساس نتايج ارائه شده مقادير درصد اريب ضريب رواناب ( $SF Coef$ )، درصد اريب ميانگين مقادير ( $BiasRR$ )، درصد اريب مقادير جريان در قطاع بالا يا اريب جريان بالا ( $BiasFHV$ ) و درصد اريب قطاع ميانى سطوح جريان يا اريب ميانه جريان ( $BiasFMM$ ) براى هر دو متغير رواناب و رسوب طى هر دو دوره آتى نسبت به دوره پايه افزايش يافتند. به عكس مقادير شاخص‌هاى درصد اريب چولگى رواناب ( $SF Skew$ )، درصد اريب تغييرپذيرى رواناب ( $SF CV$ )، درصد اريب شيب قطاع ميانى ( $BiasFDCmidslope$ ) و درصد اريب مقادير جريان در قطاع پايين يا اريب جريان پايين ( $BiasFLV$ ) در دوره‌هاى آتى براى هر دو متغير رواناب و رسوب نسبت به دوره پايه كاهش يافتند.

$SF Coef$ ، بيان كننده تغيير ضريب رواناب و  $BiasRR$  بيان كننده درصد اريب ميانگين مقادير سرى زمانى دوره آتى نسبت به دوره پايه يا به بيانى بيان كننده اختلاف در ميانگين‌ها و بالانس‌هاست [۲۱]. مقدار اين شاخص‌ها براى رواناب در سال ۲۰۲۵ نسبت به دوره پايه ۵۹/۴۸ درصد و براى سال ۲۰۴۰ برابر ۸۵/۹۲ درصد به دست آمد. همچنين، مقادير اين شاخص‌ها براى رسوب در سال ۲۰۲۵ برابر ۲۴/۵۲ درصد و براى سال ۲۰۴۰ برابر ۴۲/۲۴ درصد به دست آمد كه بيان كننده آن است كه مقادير ميانگين رواناب و رسوب در دوره‌هاى آتى نسبت به دوره پايه به اندازه مقادير يادشده افزايش يافته است. مقادير درصد اريب تغييرپذيرى رواناب

میزان تغییرات طی سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۲۵ شدیدتر است. به طوری که رواناب سطحی در سال ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ نسبت به سال پایه به ترتیب ۶۴/۲۶ و ۷۰/۳۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار کل آب (مجموع رواناب سطحی، جريان زیرقشری و زیرزمینی و جريان برگشتی از آبخوان سطحی) نیز به ترتیب ۵۷/۷۲ و ۶۳/۴۷ درصد نسبت به دوره پايه بیشتر شده است. جريان زیرقشری نیز به ترتیب ۹۳/۵۲ و ۱۰۴/۹۸ درصد و تبخير و تعرق نیز ۶/۰۷ و ۶/۹۵ درصد بیشتر شده است. يکى از دلایل افزايش میزان تبخير و تعرق را مى‌توان به افزايش كاربرى آب (استخرهاى رو باز) در منطقه و كاهش كاربرى اراضى جنگلى پهن برگ و مرتع اشاره کرد، در اين صورت سطح بیشتری در معرض نور مستقیم خورشيد قرار مى‌گیرد و میزان تبخير و تعرق واقعی بیشتر مى‌شود. با كاهش میزان نفوذپذيرى و آب گذرى آب از داخل خاک به میزان ۶۹/۷۳ درصد و ۶۸/۵۰ درصد براى سال ۲۰۲۵ و كاهش میزان نفوذپذيرى و آب گذرى آب از داخل خاک به میزان ۷۷/۳۰ و ۷۶/۴۳ درصد براى سال ۲۰۴۰ میزان جريان آب زيرزمينى، تغذيه آبخوان عميق و جريان برگشتی از آبخوان سطحی نیز كاهش مى‌یابد. میزان آهنگ كاهشى براى مؤلفه‌هاى يادشده براى سال ۲۰۲۵ به ترتیب برابر ۶۴/۲۳، ۸۷/۷۷ و ۵۰/۰۳ درصد و براى سال ۲۰۴۰ به ترتیب ۷۷/۰۹، ۸۹/۴۹ و ۶۲/۵۲ درصد است.

نتايج مربوط به شبیه‌سازى رواناب و رسوب تحت كاربرى اراضى مختلف در اين مطالعه در راستای مطالعات Bieger و همكارانش [۲]؛ Anaba و همكارانش [۹]؛ Lo و Huang [۱۱]؛ Zuo و همكارانش [۱۲]؛ Ngo Aghabeighi Amin و همكارانش [۱۳] و Ngo و همكارانش [۱۴] و Vafakhah و همكارانش [۲۶] است كه بيان كردند با تغيير كاربرى اراضى در جهت قهقرا (افزايش زراعت، مناطق مسكونى و كاهش مرتع و اراضى جنگلى) میزان رواناب سطحی و رسوب نیز بیشتر مى‌شود. همچنين، نتايج اين تحقيق با نتايج مطالعات محققان مختلف درباره اثر تغيير نوع كاربرى اراضى بر مؤلفه‌هاى مختلف سيكل هيدرولوژيكي از جمله مطالعات Briones و همكارانش [۴] در خصوص تأثير تغيير كاربرى اراضى از جنگلى و مرتعى به زراعت؛ Palamuleni و همكارانش [۵] در خصوص اثر تغيير كاربرى از جنگل به مرتع، زراعت و مناطق مسكونى؛ Khoi و Suetsugi [۶] در خصوص اثر كاهش اراضى جنگلى؛ Salmani و همكارانش

سال ۲۰۲۵ برابر ۳/۹۷ و در سال ۲۰۴۰ برابر ۱۹/۳۸ درصد است. همچنین، برای رسوب برای هر دو مقطع زمانی آتی به ترتیب ۲۲۷/۵۳ و ۲۱۶/۸۱ درصد است. مقادیر مثبت این شاخص نشان می‌دهد در دوره آتی نسبت به دوره پایه مقادیر دبی و رسوبها شدید و سیلابی افزایش یافته است یا به بیانی دبی‌ها افزایش یافته است. افزایش مقادیر دبی‌های سیلابی سبب افزایش شدید بار رسوبی شده است به طوری که مقادیر بار رسوبی زیاد نیز به شدت افزایش یافته است.

*BiasFLV* بیان کننده درصد اریب مقادیر جریان در قطاع پایین منحنی تداوم جریان (مقادیر با احتمال تجاوز بین ۰/۷ تا ۱) یا اریب جریان پایین است که مربوط به جریان پایه و آب زیرزمینی در درازمدت است. مقدار منفی این شاخص در منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد با تغییر کاربری اراضی طی دوره‌های آتی مقدار آب پایه نسبت به دوره مبنا در حوضه به شدت کاهش یافته است [۲۰ و ۲] مقدار این شاخص برای رواناب در سال ۲۰۲۵ برابر ۵۸/۰۹- درصد و برای رسوب ۴۵/۷۸- درصد نسبت به دوره پایه است. مقدار این شاخص برای رواناب و رسوب در سال ۲۰۴۰ نیز به ترتیب ۵۷/۸۰- و ۴۶/۳۹- درصد به دست آمد. Palamuleni و همکارانش [۵] و Ahmadvand Kahrizi و همکارانش [۲۷] در مطالعات خود به نتایج مشابهی دست یافتند که بر اساس مطالعات آنها با تخریب کاربری جنگل و افزایش مناطق مسکونی و زراعت، مقدار آب پایه کاهش یافت و مقادیر پیک جریان بیشتر شدند.

یا *SF CV* و درصد اریب چولگی رواناب یا *SF Skew* در دوره آتی کاهش پیدا کردند. مقدار تغییرات چولگی رواناب در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه ۲۲/۲۱- و ۲۲/۴۱- به دست آمد. همچنین، مقدار تغییرپذیری رواناب نسبت به دوره پایه برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ برابر ۲۹/۰۹- و ۲۹/۳۰- به دست آمد. مقدار درصد تغییرات چولگی رسوب در سال‌های آتی ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ برابر ۱۶/۰۴- و ۱۵/۸۳- و مقدار تغییرپذیری رسوب به ترتیب برابر ۲۶/۰۹- و ۲۵/۳۱- درصد به دست آمد.

*BiasFMM* درصد اریب قطاع میانی سطوح جریان یا اریب میانه جریان (p=0.5) است [۲۰] که برای رواناب و رسوب برای هر دو بازه زمانی به شدت افزایش یافت. مقدار آن برای رواناب در سال ۲۰۲۵ برابر ۱۰۵/۰۲ و برای سال ۲۰۴۰ برابر ۱۳۹/۶۳ است. همچنین، مقدار این شاخص برای رسوب در سال ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ به ترتیب برابر ۴۸/۲۴ و ۶۸/۸۶ درصد به دست آمد. مقادیر مثبت این شاخص بیان کننده افزایش مقادیر میانه جریان در حوضه مطالعه شده است که تحت تأثیر نوسانات بلندمدت بیلان آبی هستند [۲۱]. شاخص درصد اریب شیب قطاع میانی یا *BiasFDCmidslope* مقادیری با احتمال تجاوز بین ۰/۲ تا ۰/۷ را شامل می‌شود. مقدار این شاخص برای رواناب ۴۱/۸۶- و ۴۲/۳۴- و برای رسوب ۳۵/۳۸- و ۳۶/۴۳- برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ به دست آمد. درصد اریب مقادیر جریان بالا یا *BiasFHV*، بیان کننده مقادیر با احتمال تجاوز کمتر از ۰/۰۲ است. این شاخص کاملاً حساس به دوره‌های سیلابی شدید است و مقادیر دبی‌های اوج جریان را مقایسه می‌کند [۲۱]. مقدار این شاخص برای رواناب در



شکل ۸. مقادیر شاخص‌های دبی طی دوره‌های آتی نسبت به دوره زمانی پایه





شکل ۹. مقادیر شاخص‌های رسوب طی دوره‌های آتی نسبت به دوره زمانی پایه

زراعت و جنگل پهن‌برگ از پویاترین کاربری‌های منطقه خواهند بود. نتایج به‌دست‌آمده از آشکارسازی تغییرات در سال ۲۰۲۵ به گونه‌ای است که در صورت ادامه روند موجود در منطقه ۶۲/۰۳ درصد به طبقه مسکونی و ۳۲/۸۷ درصد به طبقه زراعت افزوده خواهد شد. میزان تغییر این کاربری‌ها برای سال ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۲۹/۴۴ و ۵۱/۳۲ درصد است که کاربری زراعت ۵۶/۰۲۲ درصد منطقه را در بر خواهد گرفت. همچنین، بیشترین روند کاهش مربوط به کاربری جنگل پهن متراکم است که در سال ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۳۳/۸۲ و ۴۳/۱۱ درصد کاهش خواهد یافت.

پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های مختلف با در نظر گرفتن نقشه سال ۲۰۰۰ به عنوان نقشه پایه مدل SWAT اجرا شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و برنامه SUFI2 و داده‌های مشاهداتی دبی و رسوب ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه برای سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۸ واسنجی شد و مقادیر بهینه پارامترها برای منطقه مطالعه شده به دست آمد و سپس با استفاده از داده‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۴ به صورت ماهانه صحت‌سنجی شد. دبی با ضریب  $E_{NS}$  برابر ۰/۷۱،  $R^2$  برابر ۰/۷۰، RMSE برابر ۳/۳۲ و PBIAS برابر ۳/۹ واسنجی و با ضریب  $E_{NS}$  برابر ۰/۶۱،  $R^2$  برابر ۰/۶۱، RMSE برابر ۴/۳۶ و PBIAS برابر ۲/۱- صحت‌سنجی شد. همچنین، رسوب با ضرایب  $E_{NS}$ ،  $R^2$ ، RMSE و PBIAS به ترتیب برابر ۰/۶۵، ۰/۶۷، ۱۶۴۳/۲، ۰/۸- و واسنجی و با ضرایب  $E_{NS}$ ،  $R^2$ ، RMSE و PBIAS به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۶۱، ۱۸۶۱/۰۲، ۴/۴- صحت‌سنجی شد. ارزیابی کارایی مدل SWAT نشان‌دهنده دقت بیشتر شبیه‌سازی دبی نسبت به رسوب در منطقه مطالعه شده است. مقادیر نسبتاً زیاد p-factor و کم R\_factor

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر تغییرات کاربری اراضی پیش‌بینی شده طی دوره‌های آتی بر میزان رواناب و رسوب و دیگر مؤلفه‌های سیکل هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز تیل‌آباد با مساحت ۱۵۴۰ کیلومترمربع بررسی شد. به‌منظور ارزیابی تغییرات کاربری اراضی طی دوره گذشته تا حال از تصاویر ماهواره‌اندست برای سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ و برای طبقه‌بندی تصاویر از نرم‌افزار ENVI و روش بیشترین احتمال استفاده شد. در نهایت، منطقه به هفت کلاس کاربری شامل آب، جنگل سوزنی‌برگ، جنگل پهن‌برگ متراکم، جنگل پهن‌برگ تنک، زراعت، مرتع-بایر و اراضی مسکونی تقسیم شد. نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی طی ۳۰ سال نشان داد مساحت کاربری‌های جنگل سوزنی‌برگ، مناطق مسکونی، آب و زراعت افزایش یافته و کاربری‌های جنگل پهن‌برگ تنک، جنگل پهن متراکم و مرتع آهنگ کاهش یافتند که بیان‌کننده روند کلی تخریب در منطقه است. این رخداد بدون شک ناشی از دخالت‌های انسان و شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه است. همچنین، تهیه نقشه کاربری اراضی از روی تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ با شاخص کاپای برابر ۰/۹۵۵، ۰/۸۶۵ و ۰/۹۶۱ ارزیابی شد. پس از بررسی نتایج به‌دست‌آمده از صحت‌مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی/ پوشش زمین در سال ۲۰۱۵، از رویکرد مدل‌سازی زنجیره مارکوف و اتومای سلولی با ضریب کاپای معادل ۰/۷۹۹ در نرم‌افزار IDRISI وضعیت طبقات کاربری اراضی سال‌های آینده ۲۰۲۵ و ۲۰۴۰ پیش‌بینی شد و اندازه تغییرات آن از طریق داده‌های سنجش از دور بررسی شد. نتایج نشان داد طی دوره‌های آتی کاربری‌های مسکونی،

هیدرولوژیکی هستند به طوری که نتایج نشان داد طی دوره‌های آبی میزان رواناب سطحی، مقدار کل آب، رسوب، جریان زیرقشری و تبخیر و تعرق افزایش و به عکس جریان آب زیرزمینی، جریان برگشتی از آبخوان سطحی، تغذیه آبخوان عمیق، آب‌گذری به آبخوان سطحی و نفوذپذیری و آب‌گذری آب از داخل خاک کاهش می‌یابد. کاهش جریان آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان عمیق، آب‌گذری به آبخوان سطحی و نفوذپذیری و افزایش مقادیر رواناب سبب افزایش وقایع سیلابی و آبی می‌شود که در این صورت مقادیر اوج جریان افزایش یافته و جریان پایه کاهش می‌یابد. این وقایع سیلابی مقادیر زیادی بار رسوبی با خود حمل می‌کنند که سبب افزایش مقادیر میانه و اوج رسوب نیز شده‌اند. بنابراین، برای غلبه بر مشکلات مربوط به تغییر سیکل هیدرولوژیکی، افزایش رواناب، رسوب و افزایش مقادیر جریان سیلابی تحت تأثیر کاربری اراضی لازم است که در منطقه مطالعه شده مدیریتی منظم و برنامه‌ریزی شده اعمال شود. در این تحقیق اثر کاربری اراضی پیش‌بینی شده روی سیکل هیدرولوژیکی تجزیه و تحلیل شد برای برنامه‌ریزی دقیق و جامع‌تر و مدیریت بهینه منابع آبی بهتر است که دیگر عوامل مؤثر از جمله آثار اقلیمی و افزایش جمعیت که بر میزان کمیت و کیفیت آب آبی حوضه بررسی شده تأثیرگذارند نیز بررسی شود.

#### منابع

- [1]. Jaehak J, Narayanan K, Jeff Arnold R, Glick LG, Raghavan S. Development and Integration of Sub-hourly Rainfall-Runoff Modeling Capability within a Watershed Model. *Water Resources Management*. 2010. 24(15): 4505-4527.
- [2]. Bieger K, Hormann G, Fohrer N. The impact of land use change in the Xiangxi Catchment (China) on water balance and sediment transport. *Regional Environmental Change*. 2015. 15(3): 485-498.
- [3]. Tadesse W, Whitaker S, Crosson W, Wilson C. Assessing the Impact of Land-Use Land-Cover Change on Stream Water and Sediment Yields at a Watershed Level Using SWAT. *Open Journal of Modern Hydrology*. 2015. 5: 68-85.
- [4]. Briones RU, Ella VB, Bantayan NC. Hydrologic Impact Evaluation of Land Use and Land Cover Change in Palico Watershed, Batangas, Philippines Using the SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Management*. 2016. 19(1): 96-107.

نشان داد بیشتر داده‌های شبیه‌سازی در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار دارند. پس از حصول اطمینان از قابلیت زیاد مدل در شبیه‌سازی دبی و رسوب حوضه و رسیدن به مقادیر بهینه پارامترها، مدل به تعداد نقشه‌های موجود طی دوره آبی اجرا شده و میزان دبی و بار معلق و دیگر مؤلفه‌های سیکل هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده برای هر کاربری به دست آمد. چگونگی اجرای مدل به گونه‌ای بود که در هر بار اجرای مدل همه پارامترها و ورودی‌های مدل ثابت در نظر گرفته می‌شد و فقط نقشه کاربری به عنوان ورودی متغیر به مدل وارد می‌شد.

نتایج به دست آمده از اجرای مدل تحت کاربری‌های اراضی مختلف در سال‌های آبی نشان داد میزان تغییرات دبی، رسوب و دیگر مؤلفه‌های سیکل هیدرولوژیکی در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۲۵ شدیدتر است. با تخریب کاربری اراضی میزان دبی و رسوب نیز افزایش می‌یابد. که در سال ۲۰۲۵ دبی و رسوب متوسط روزانه به ترتیب ۵۹/۴۷ و ۲۴/۵۲ درصد برای کل حوضه افزایش خواهد یافت و در سال ۲۰۴۰ نیز افزایش دبی و رسوب متوسط روزانه به ترتیب ۸۵/۹۱ و ۴۲/۲۴ درصد مشاهده شد. به طور کلی، میزان دبی متوسط روزانه از ۵/۵۴ مترمکعب بر ثانیه در سال ۲۰۰۰ به ۸/۸۴ مترمکعب بر ثانیه در سال ۲۰۲۵ و ۱۰/۳۱ مترمکعب بر ثانیه در سال ۲۰۴۰ افزایش یافت. همچنین، رسوب متوسط روزانه از ۱۷۰۱/۲۱ تن در روز در سال ۲۰۰۰ به ۲۱۱۸/۲۷ تن در روز در سال ۲۰۲۵ و ۲۴۱۹/۷۶ تن در روز در سال ۲۰۴۰ تغییر می‌یابد.

در این تحقیق به عنوان رویکردی جدید تأثیر کاربری اراضی آبی بر هیدروگراف دبی و رسوب با استفاده از شاخص‌های مختلف هیدرولوژیکی ارزیابی شد. برای این کار منحنی تداوم جریان برای سری‌های زمانی مختلف دبی و رسوب طی دوره آبی و پایه در برنامه Matlab کدنویسی و استخراج شد و احتمال تجاوز وقوع در محدوده صفر تا یک به دست آمد. نتایج نشان داد با تغییر کاربری اراضی طی دوره آبی مقدار جریان پایه برای هر دو متغیر دبی و رسوب طی دوره آبی نسبت به زمان پایه کاهش می‌یابد. این جریانات تحت تأثیر آب زیرزمینی در درازمدت هستند. به عکس جریان‌های حجم میانه و زیاد جریان که تحت تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت و میان‌مدت و جریان‌های سیلابی هستند به شدت افزایش یافته‌اند. نتایج به دست آمده به منظور تغییر مؤلفه‌های مختلف سیکل

- [5].Palamuleni LG, Ndomba PM, Annegarn HJ. Evaluating land cover change and its impact on hydrological regime in Upper Shire river catchment, Malawi. *Journal of Regional Environmental Change*. 2011. 11(4): 845-855.
- [6].Khoi DN, Suetsugi T. The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam. *Hydrological Processes*. 2014. 28(3): 640-652.
- [7].Schmalz B, Fohrer N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the eco hydrological SWAT model. *Advances in Geosciences*. 2009. 21: 91-98.
- [8].Salmani H, Mohseni Saravi M, Rouhani H, Salajeghe A. Evaluation of Land Use Change and its Impact on the Hydrological Process in the Ghazaghli Watershed, Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*. 2012. 3(6): 43-60. [Persian].
- [9].Anaba LA, Banadda N, Kiggundu N, Wanyama J, Engel B., Moriasi D. Application of SWAT to Assess the Effects of Land Use Change in the Murchison Bay Catchment in Uganda. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*. 2017. 6: 24-40.
- [10]. Wang S, Kang S, Zhang L, Li F. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. *Journal of Hydrological Processes*. 2008. 22: 2502-2510.
- [11]. Huang TCC, Lo KFA. Effects of Land Use Change on Sediment and Water Yields in Yang Ming Shan National Park, Taiwan. *Environments*. 2015. 2: 32-42.
- [12]. Zuo D, Xu Z, Yao W, Jin S, Xiao P, Ran D. 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*. 2016. 544: 238-250.
- [13]. Aghabeighi Amin S, Ildromi A, Nouri HR, Hghighi Kermanshahi A. The impact of suspended sediment from land use changes in the watershed Dinawar Kermanshah Province. 2016. *Journal of Ecohydrology*. 3(4):611-621. [Persian].
- [14]. Ngo TS, Nguyen DB, Shrestha RP. Effect of land use change on runoff and sediment yield in Da River Basin of Binh province, Northwest Vietnam. *Journal of Mountain Science*. 2015. 12(4): 1051-1064.
- [15]. Da Silva VDP, Silva MT, De Souza EP. Influence of Land Use Change on Sediment Yield: A Case Study of the Sub-Middle of the São Francisco River Basin. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*. 2016. 36(6): 1005-1015.
- [16]. Saleh DK, Kratzer CR, Green CH, Evans DG. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to Simulate Runoff in Mustang Creek Basin, California, Scientific Investigations Report 2009-5031, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, the American water resources association. 2009. 44(1): 48-61.
- [17]. Iranmehr M, Pourmanafi S, Soffianian A. Ecological Monitoring and Assessment of Spatial-Temporal Changes in Land Cover with an Emphasis on Agricultural Water Consumption in Zayandeh Rood Region. 2015. *Journal of Ecohydrology*. 2(1):23-38. [Persian].
- [18]. Karimi K, Komaki CB. Monitoring, assessment and prediction of spatial changes of land use /cover using Markov chain model (Case study: Bostagh Plain - South Khorasan). *RS & GIS for Natural Resources*. 2015. 6(2): 75-88. [Persian].
- [19]. Heidarizadi Z, Mohamadi A. Predicting the Land Use Change Using Markov- Cellular Automata Model in Mehran Plain. *Desert Ecosystem Engineering Journal*. 2016. 5(10): 57-68. [Persian].
- [20]. Yilmaz KK, Gupta HV, Wagener T. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resour. Res*. 2008. 44(9). W09417. DOI: 10.1029/2007WR006716.
- [21]. Casper MC, Grigoryan G, Gronz O, Gutjahr O, Heinemann G, Ley R, Rock A. Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2012. 16: 409-421.
- [22]. Sang L, Zhang C, Yang J, Zhu D, Yun W. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*. 2011. 54(3): 938-943.
- [23]. Chang CL, Chang JC. Markov model and cellular automata for vegetation. *Journal of Geographical Research*. 2006. 45: 45-57.
- [24]. Farajollahi A, Asgar HR, Ownagh M, Mahboubi MR, Salman Mahini R. Monitoring and prediction of spatial and temporal changes of landuse/ cover (Case study: Marave Tappeh region, Golestan). *RS & GIS for Natural Resources*. 2016. 6(4): 1-14. [Persian].

- [25]. Gebremicael TG, Mohamed YA, Betrie GD, Zaag P, Teferi E. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: a combined analysis of statistical tests, physically-based models and landuse maps. *Hydrology*. 2013. 482: 57–68.
- [26]. Vafakhah M, Javadi, MR, Najafi Majd J. Effect of Land Use Changes on Runoff Depth in Chalousrud Watershed. 2015. *Journal of Ecohydrology*. 2(2):211-220. [Persian].
- [27]. Ahmadvand Kahrizi M. Modeling the effects of climate change on runoff and sediment Arazkoseh watershed, Golestan Province. Master's thesis Watershed Management, Gonbad University. 154 pp. [Persian].