**اکوهیدرولوژی**

**دورهٔ ۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴، ص ۳۶۹-۳۵۷**

# بررسی اثرات کاربری اراضی بر تولید رواناب با استفاده از مدل WetSpa

**مجید محمدی[1*]، حسین زینی‌وند[2]، حمیدرضا مرادی[3]، حمیدرضا پورقاسمی[4]، حسن فرازجو[5]**

۱. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان

۳. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور

٤. استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۵. مدیر دفتر مطالعات پایهٔ شرکت آب منطقه‌ای گلستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹٤/۰۵/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹٤/۱۱/۲۲)

## چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر مؤلفه‌های رواناب کل، رواناب سطحی و دبی اوج در حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان در استان گلستان است. نقشهٔ کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳٦۵ و ۱۳۹۱ با استفاده از یک روش ترکیبی و تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شد. با استفاده از مدل WetSpa، شبیه‌سازی رواناب در مقیاس روزانه برای ۸ سال (۵ سال اول برای واسنجی و ۳ سال بعد برای اعتبارسنجی) و برای نقشه‌های کاربری سال ۱۳٦۵ و ۱۳۹۱ انجام شد. برای ارزیابی دقت مدل WetSpa از ضریب نش- ساتکلیف و معیار تجمعی دقت استفاده شد. ضریب نش- ساتکلیف برای دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/٦۱ و ۰/۵٦ به دست آمد. مقدار معیار تجمعی نیز برابر با ۰/٦٤ و ۰/٦۲ برای دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی بود. این معیارها نشان داد مدل WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان مناسب است. درنتیجه تغییرات کاربری از سال ۱۳٦۵ تا ۱۳۹۱، رواناب کل، رواناب سطحی و دبی اوج افزایش یافته است، درصورتی‌که نسبت افزایش در رواناب سطحی نسبت به کل رواناب بیشتر بوده است. رواناب کل و رواناب سطحی برای کاربری اراضی ۱۳٦۵ به‌ترتیب برابر با ٤۳۱/٦۲، ۱۵۸/۷۷ میلیون مترمکعب و دبی اوج ۲۷/٤۵ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. این مقدار برای کاربری اراضی ۱۳۹۱ به‌ترتیب ٤۸۰/۳۱، ۱۸۲/۸٦ و ۳۰/۹٤ است.

**کلیدواژگان:** حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان، رواناب، کاربری اراضی، مدل WetSpa.

* نویسندهٔ مسئول

Email: majid.mohammady@semnan.ac.ir

**مقدمه**

کاربری اراضی موضوع مهمی در مدیریت منابع طبیعی است و امروزه تبدیل منابع طبیعی به زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی به مشکلی بزرگ برای بسیاری از کشورهای دنیا تبدیل شده است. تغییرات کاربری اراضی نتیجهٔ برهم‌کنش انسان و عوامل مؤثر بر محیط است که در مقیاس زمانی و مکانی مطرح است و به‌طور مستقیم بر زندگی بشر تأثیر می‌گذارد [۴]. تغییرات کاربری اراضی فرایندهای هیدرولوژیکی مانند میزان نفوذ، تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی، آب پایه و رواناب سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین گرمایش جهانی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای از تأثیرات جهانی تغییر کاربری به‌شمار می‌رود [۳۳]. درک فرایندهای کاربری اراضی در کشورهای در حال توسعه به اولویتی برای محققان و تصمیم‌گیران با دامنهٔ وسیعی از علایق تحقیقاتی تبدیل شده است. نگرانی برای تخریب جنگل‌ها و سایر منابع طبیعی و نقش آن در تغییرات اقلیمی و تنوع زیستی از مهم‌ترین موضوعات در این زمینه است. کاهش پهنه‌های آبی، کاهش تولیدات گیاهی و مدیریت حوضه‌های آبخیز از دیگر موارد مرتبط با کاربری اراضی است که تصمیم‌گیران سعی می‌کنند ضمن پیشرفت‌های اقتصادی به محیط زیست نیز توجه داشته باشند. با توجه به اهمیت موضوع روش‌های مختلفی به‌منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی و تأثیرات آن بر پدیده‌های مختلف طراحی شده است. یکی از روش‌های موجود، بررسی روند تغییرات و شبیه‌سازی کاربری اراضی برای سال‌های آینده است که ابزار قدرتمندی برای مطالعهٔ تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با عوامل مؤثر بر این تغییرات است [۱۹]. شناخت فرایندهای کاربری اراضی به‌منظور دست‌یابی به نقشه‌های دقیق شبیه‌سازی شده کاربری اراضی برای آینده و کمک به مدیریت پایدار و حفظ چشم‌اندازهای اساسی امری ضروری است [۱۶]. مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی تصمیم‌گیران را از شرایط آیندهٔ کاربری اراضی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف آگاه می‌کند. از طرفی درک و شناخت حوضه‌های آبخیز یکی از اقدامات ابتدایی در مدیریت پایدار این سیستم‌ها محسوب می‌شود. به‌دلیل ناهمگنی موجود در حوضه‌های آبخیز و غیرخطی بودن رفتارهای هیدرولوژیکی و فرسایشی، شناخت کامل روابط موجود در آن‌ها بسیار پیچیده و مشکل است [۲]. معمولاً وجودنداشتن تأسیسات و شبکه‌های منسجم اندازه‌گیری مؤلفه‌های بیلان آبی و فقدان آمار و اطلاعات هرچند به‌صورت نقطه‌ای در حوضه‌های آبخیز از یک طرف و نیاز به داشتن اطلاعات مکانی دقیق و به‌روز برای مدیریت جامع منابع آب حوضه‌های آبخیز، شناخت این پدیده‌ها و نقشه‌بندی آن‌ها را ضروری می‌سازد [۳]. به‌دلیل اهمیت نقش کاربری اراضی در فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز، مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده است.

ترپسترا و مازیک [۳۲] با استفاده از مدل LUCID[1] در حوضهٔ Glatt در هلند، اثر کاربری بر رواناب ماهانه را بررسی کردند. در یک سناریو، کل منطقه به کاربری مسکونی تبدیل شد که میزان رواناب ۳۰ درصد افزایش نشان داد. دی‌رو و همکارانش [۱۰] اثر کاربری اراضی در منطقه‌ای بین چک، لهستان و آلمان را با استفاده از مدل توزیعی LISFlood ارزیابی کردند. نتایج نشان داد اقدامات مدیریتی سیل، میزان دبی اوج را کاهش و افزایش کاربری شهری و تخریب جنگل، میزان رواناب را افزایش داد. لیو و همکارانش [۲۱] در حوضهٔ آبخیز Steinsel در کشور لوکزامبورگ رواناب ناشی از کاربری‌های مختلف را در مقیاس ساعتی و برای ۵۲ ماه بررسی کرد و نتایج نشان داد گسترش اراضی شهری و جنگل‌زدایی سبب افزایش دبی اوج و حجم سیلاب می‌شود. بهره‌مند و همکارانش [۷] تأثیرات سناریوی جنگل‌کاری بر تولید رواناب را با استفاده از مدل WetSpa در حوضهٔ Hornad بررسی کردند. سناریوی طراحی‌شده براساس افزایش ۵۰ درصدی جنگل‌های حوضه از نظر تولید رواناب بررسی شد و در این سناریو، دبی اوج به میزان ۱۲ درصد کاهش داشته و زمان تا اوج نسبت به کاربری فعلی، ۱۴ ساعت افزایش یافته است.

الفرت و بورمن [۱۳] نقش کاربری اراضی در فرایندهای هیدرولوژیکی حوضهٔ Hunte در شمال آلمان را با استفاده از مدل توزیعی WaSim-ETH بررسی کردند و نتایج نشان داد با افزایش مناطق مسکونی، رواناب و جریان رودخانه‌ای افزایش یافته است. توکلی و همکارانش [۳۱] تأثیرات تغییر اقلیم و رشد شهری را با استفاده از مدل WetSpa در حوضهٔ GroteNete در بلژیک بررسی کردند.

1. Land Use Change Impact Determination

نتایج نشان داد اثر هم‌زمان این‌دو عامل تأثیر زیادی در افزایش فراوانی سیلاب‌ها در زمستان و افزایش جریان‌های حد پایین در تابستان دارد.

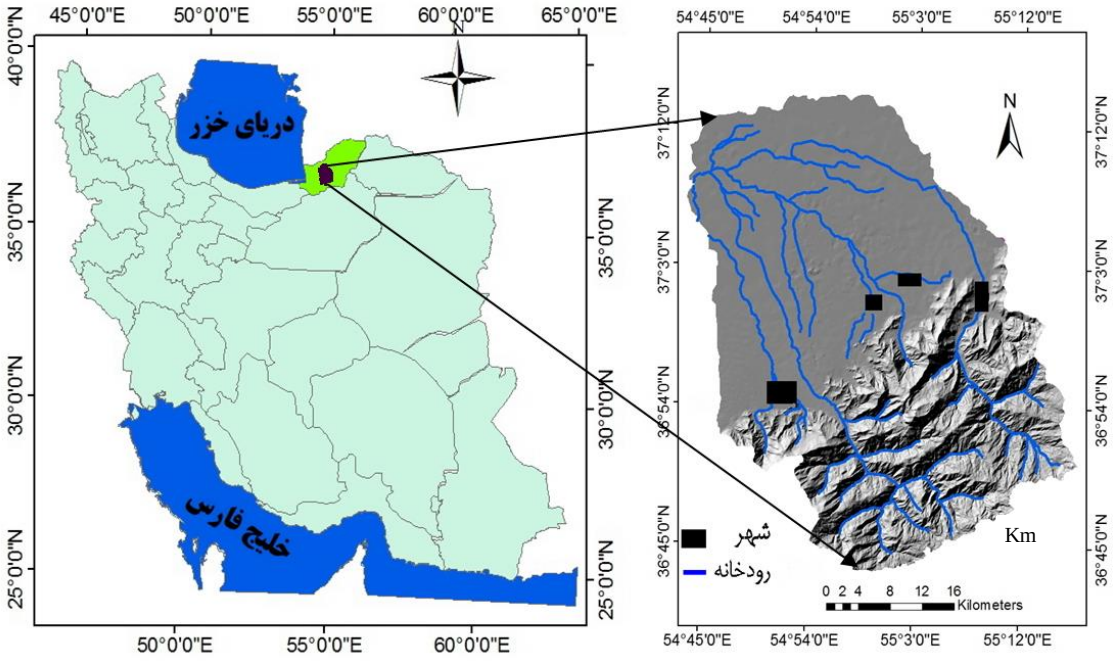
استان گلستان به‌دلیل داشتن شرایط آب و هوایی و زمین‌های مناسب برای کشاورزی همواره در معرض تخریب منابع طبیعی و تبدیل این اراضی به زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی بوده است. حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان به‌دلیل داشتن کاربری اراضی متنوع، وجود ایستگاه‌های هواشناسی با پراکنش مناسب و ایستگاه هیدرومتری در خروجی حوضه با داده‌های روزانه برای انجام این پژوهش انتخاب شد.

هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل WetSpa در حوضهٔ آبخیز مد نظر و نیز بررسی نقش کاربری اراضی بر تولید رواناب است. حوضهٔ مد نظر دو بخش کوهستانی با توپوگرافی پیچیده و بخش مسطح و زمین‌های کشاورزی دارد. اولین هدف ارزیابی مدل WetsPa در حوضه‌ای با این شرایط است. همچنین از روش ترکیبی برای تهیهٔ نقشهٔ کاربری اراضی استفاده می‌شود و ارزیابی دقت این روش نیز مد نظر است. میزان رواناب در کاربری سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ شبیه‌سازی و نتایج مقایسه شد. این امر بیانگر نقش تغییرات کاربری اراضی بر مؤلفه‌های رواناب خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان در شمال ایران و با مساحتی حدود ۱۸۰۰ کیلومترمربع بین عرض‌های "۱۸′ ۴۳ °۳۶ تا "۰۵′ ۱۴ °۳۷ شمالی و طول‌های "۲۴ ′۴۳ °۵۴ تا "۵۲ ′۱۶ °۵۵ شرقی در جنوب استان گلستان واقع شده و بخشی از حوضهٔ آبریز گرگان‌رود است (شکل ۱). ارتفاع حوضه از صفر تا حدود ۲۹۰۰ متر متغیر است، با استفاده از میانگین داده‌های ۳۵ ساله بارندگی متوسط ۶۰۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۸ درجهٔ سانتی‌گراد به دست آمد [۴]. شهرهای علی‌آباد، خان‌ببین، رامیان و دلند و رودخانه‌های شیرآباد، زرین‌گل و کبودوال در آن قرار گرفته است و کاربری متنوعی دارد. از نظر توپوگرافی می‌توان حوضه را به دو بخش اصلی تقسیم کرد، بخش شمالی و پایین‌دست حوضه که سطح وسیعی به‌صورت هموار بوده و کاربری آن بیشتر کشاورزی و مسکونی است. بخش جنوبی و شیب‌دار حوضه که توپوگرافی پیچیده‌تری دارد و بیشتر شامل جنگل و مرتع است.

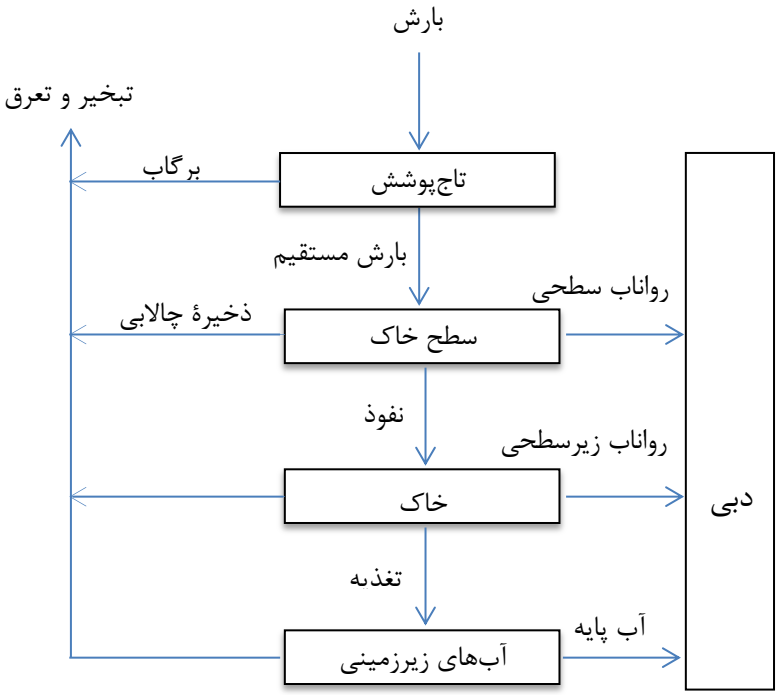



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان گلستان و حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان

## روش پژوهش

### مدل WetSpa

مدل WetSpa یک مدل فیزیکی، توزیعی و پیوسته است که توسط وانگ و همکارانش [۳۵] در سال ۱۹۹۷ تهیه شده و توسط Liu و همکارانش [۲۰] برای پیش‌بینی رواناب و سیل توسعه داده شد. زینی‌وند [۳۶] براساس معادلات فیزیکی، بخش فرسایش و انتقال رسوب را به مدل اضافه کرد که براساس مؤلفه‌های استفاده‌شده در پیش‌بینی سیلاب قابلیت شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب را دارد. پیش‌بینی‌ها در سطح سلول انجام می‌گیرد که برای هر سلول ۴ لایه شامل تاج پوشش گیاهی، منطقهٔ ریشه، منطقهٔ انتقال و منطقهٔ اشباع وجود دارد. شکل ۲ ساختار کلی مدل WetSpa در سطح سلول را نشان می‌دهد.




**شکل ۲. ساختار مدل WetSpa در مقیاس سلول**

یکی از مزایای مدل نیاز به داده‌های کم برای شبیه‌سازی است. نقشهٔ DEM، کاربری اراضی، خاک‌شناسی و همچنین داده‌های مختص به دما، بارش و تبخیر ورودی‌های اصلی مدل است و از داده‌های رواناب نیز برای واسنجی مدل استفاده می‌شود [۷].

### تهیهٔ داده‌ها

داده‌های مختص به رواناب، بارش، تبخیر و دما در مقیاس روزانه و برای ۸ سال (سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۶ برای واسنجی و ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ اعتبارسنجی) از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان و نقشهٔ خاک‌شناسی از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان تهیه شد. نقشهٔ توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ به‌صورت رقومی‌شده از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه و بعد از موزاییک‌کردن شیت‌ها و تبدیل به یک نقشه، نقشهٔ DEM تهیه شد. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های TM و +ETM برای سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ از سازمان نقشه‌برداری تهیه و چند تصویر TM و +ETM نیز از سایت سازمان زمین‌شناسی امریکا دریافت شد. تفکیک مکانی تصاویر یادشده ۳۰ متر بوده و باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ به‌منظور طبقه‌بندی تهیه شد. با توجه به تأکید پژوهش بر نقش کاربری اراضی، تهیهٔ نقشهٔ دقیق آن به‌عنوان اولین گام در اولویت قرار گرفت. با توجه به تنوع کاربری در منطقهٔ مطالعه‌شده و وجود کشاورزی چندزمانه استفاده از روش‌های معمول طبقه‌بندی دقت کافی را ندارد. به این منظور از ۶ تصویر ماهوارهٔ لندست مختص به بهار، تابستان و پاییز در سال ۱۳۹۱ استفاده و نقشه‌ها با هم ترکیب شد. هم‌زمان از روش‌های نظارت‌شده، نظارت‌نشده، شاخص پوشش گیاهی

تفاضلی نرمال‌شده (NDVI)[1] و نقشهٔ کمکی شیب به‌منظور افزایش دقت نقشهٔ کاربری استفاده شد [۲۳].

**واسنجی مدل WetSpa**

واسنجی مدل شامل کنترل و مقایسهٔ رواناب شبیه‌سازی شده با رواناب مشاهداتی است. مدل با تنظیم ورودی‌های آن (پارامترهای عمومی مدل) و ارزیابی خروجی‌ها واسنجی می‌شود. برای واسنجی مدل روش دستی و اتوماتیک وجود دارد. در این پژوهش برای واسنجی از روش ترکیبی اتوماتیک و دستی استفاده شد که این روش در مواقعی که چندین پارامتر وجود دارد، روش مناسبی است [۲۸]. در روش دستی با توجه به نظر کارشناس پارامترها مقادیر متفاوتی می‌گیرد و با روش سعی و خطا به بهترین برازش بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای ختم می‌شود. در این روش با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها تأثیر میزان پارامتر بر خروجی درخور پیگیری و اصلاح است. در روش اتوماتیک از نرم‌افزارهای مختلفی استفاده می‌شود، در این پژوهش از نرم‌افزار PEST[2] استفاده شد [۶]. در استفاده از این روش تابع هدف مجموع مربعات خطاست و سعی شده است که این مقدار به حداقل برسد. درواقع PEST نرم‌افزاری برای بهینه‌سازی و ارزیابی پارامترهای غیرخطی و بهینه‌سازی براساس جست‌وجوی محلی است [۱۱]. در این پژوهش از ترکیب روش دستی و سپس اتوماتیک برای بهینه‌سازی پارامترها و حداقل‌کردن خطا استفاده شد که موجب افزایش تکرارها و درنتیجه دقت بیشتر می‌شود. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های روزانهٔ پنج‌ساله انجام شد.

**ارزیابی دقت شبیه‌سازی**

بعد از اجرای مدل برای بهینه‌کردن پارامترهای مدل، دقت شبیه‌سازی بررسی شد. برای این منظور از ضریب نش‌ـ ساتکلیف[3] براساس رابطهٔ ۱ استفاده شد. این ضریب توانایی بازسازی هیدروگراف جریان را ارزیابی می‌کند [۲۴].

$$NS = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N} (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{N} (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \right] \quad (1)$$

که در آن $Q_{oi}$ و $Q_{si}$ به‌ترتیب دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در گام زمانی i است.

همچنین از معیار تجمعی[4] (AM) نیز برای ارزیابی دقت استفاده شد که هیدروگراف را از جهات مختلف مانند شکل و اندازه براساس روابط ۲ تا ۴ ارزیابی می‌کند.

$$AM = \frac{r_{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \quad (2)$$

$$MB = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N} (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^{N} Q_{oi}} \right] \quad (3)$$

$$r_{mod} = \left[ \frac{\min(\sigma_o, \sigma_s)}{max(\sigma_o, \sigma_s)} * r \right] \quad (4)$$

در روابط بالا $\sigma_s$ و$\sigma_o$ انحراف استاندارد[5] رواناب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. ضریب r، ضریب همبستگی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای و N تعداد مشاهدات در دورهٔ شبیه‌سازی است [۴، ۲۸].

هنریکسن و همکارانش [۱۵] برای بررسی میزان نش‌ـ ساتکلیف و اندرسن و همکارانش [۵] برای معیار تجمعی دقت، ۵ طبقه ارائه کرده‌اند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

با استفاده از جدول ۱ میزان کارایی مدل براساس دو معیار یادشده ارزیابی شد. به‌طورکلی، در شبیه‌سازی توزیع مکانی، مؤلفه‌های بیلان آبی و سپس جریان رودخانه در یک حوضهٔ آبخیز با پیچیدگی‌های طبیعی خاص آن، رسیدن به دقت‌های بالای ۵۵ درصد، رضایت‌بخش است [۲۸].

**اعتبارسنجی مدل WetSpa**

بعد از تأیید دقت شبیه‌سازی با استفاده از روش‌هایی که بیان شد و بهینه‌شدن پارامترها، داده‌های سه سال برای واسنجی استفاده نشد و برای اعتبارسنجی کنار گذاشته شد. مدل برای سه سال اجرا و شاخص‌های ارزیابی محاسبه شد. در صورت زیادبودن دقت مدل براساس شاخص‌های نش‌ـ ساتکلیف و معیار تجمعی دقت در این مرحله پارامترهای بهینه‌شدهٔ قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Parameter ESTimation
3. Nash-Sutcliffe
4. Aggregation Measure
5. Standard Deviations

جدول ۱. طبقات مربوط به میزان نش‌ـ ساتکلیف و معیار تجمعی دقت

| طبقات | خیلی ضعیف | ضعیف | خوب | خیلی خوب | عالی |
|---|---|---|---|---|---|
| نش‌ـ ساتکلیف | <۰/۲۰ | ۰/۲۰ – ۰/۵۰ | ۰/۵۰ – ۰/۶۵ | ۰/۶۵ – ۰/۸۵ | >۰/۸۵ |
| میزان تجمعی | <۰/۴۰ | ۰/۴۰ – ۰/۵۵ | ۰/۵۵ – ۰/۷۰ | ۰/۷۰ – ۰/۸۵ | >۰/۸۵ |

**اجرای مدل با استفاده از نقشهٔ کاربری ۱۳۶۵**

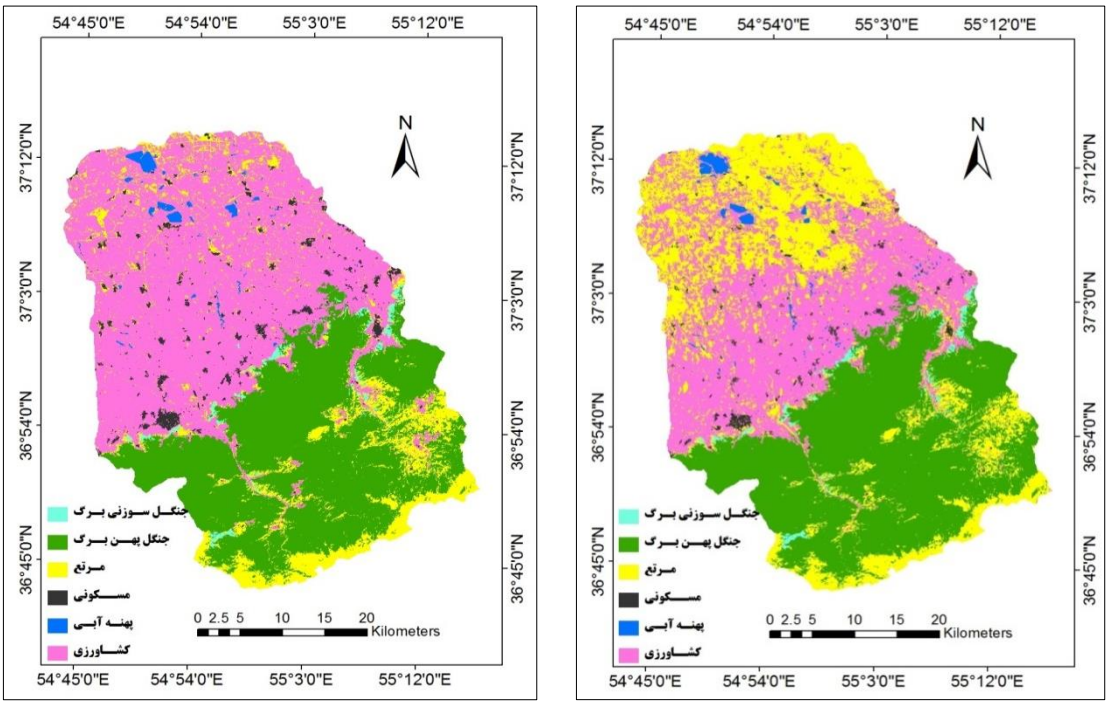
در مراحل قبل، اجرای مدل با استفاده از نقشهٔ کاربری سال ۱۳۹۱ صورت گرفت. برای بررسی نقش کاربری اراضی در تولید رواناب، تمام داده‌ها و نقشه‌های استفاده‌شده در مدل ثابت بود و فقط کاربری سال ۱۳۶۵ به مدل وارد شد. ثابت‌بودن سایر داده‌ها نقش کاربری اراضی را به‌خوبی نمایان می‌سازد. مانند حالت قبل برای نقشهٔ کاربری ۱۳۶۵ نیز رواناب کل و رواناب سطحی محاسبه شد.

**تهیهٔ نقشه‌های مکانی جریان سطحی**

یکی از مزایای استفاده از مدل‌های توزیعی مانند WetSpa قابلیت تهیهٔ نقشه‌های مکانی بیلان آبی در حوضهٔ آبخیز است. مدل میزان رواناب در سطح حوضه و زیرحوضه‌هایی که در مرحلهٔ اجرای مدل تعریف شده‌اند را برای هر روز شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به اینکه در بحث منابع طبیعی رواناب سطحی تأثیر مهمی در مدیریت حوضهٔ آبخیز دارد، یک واقعهٔ بارش انتخاب و جریان سطحی ناشی از آن در سطح حوضه به‌صورت مکانی تهیه شد. درواقع در این روش در تمام زیرحوضه‌ها رواناب شبیه‌سازی و به‌صورت نقشه ارائه می‌شود. داشتن نقشهٔ مکانی رواناب نقش مهمی در شناسایی مناطق حساس از نظر تولید رواناب دارد و می‌توان در فعالیت‌های مدیریتی به این مناطق توجه بیشتری داشت.

**یافته‌ها**

دقت نقشهٔ کاربری اراضی تهیه‌شده به‌عنوان مهم‌ترین ورودی مدل بررسی شد. ضریب کاپا و دقت کلی برای نقشهٔ سال ۱۳۹۱ برابر ۰/۹۵ و ۹۶/۷۸ درصد به‌دست آمد که بیانگر مناسب‌بودن روش ترکیبی طبقه‌بندی در منطقه است. با توجه به تأیید دقت روش یادشده، برای سال ۱۳۶۵ نیز با استفاده از این روش نقشهٔ کاربری تهیه شد. شکل ۳ نقشه‌های کاربری اراضی را نشان می‌دهد.



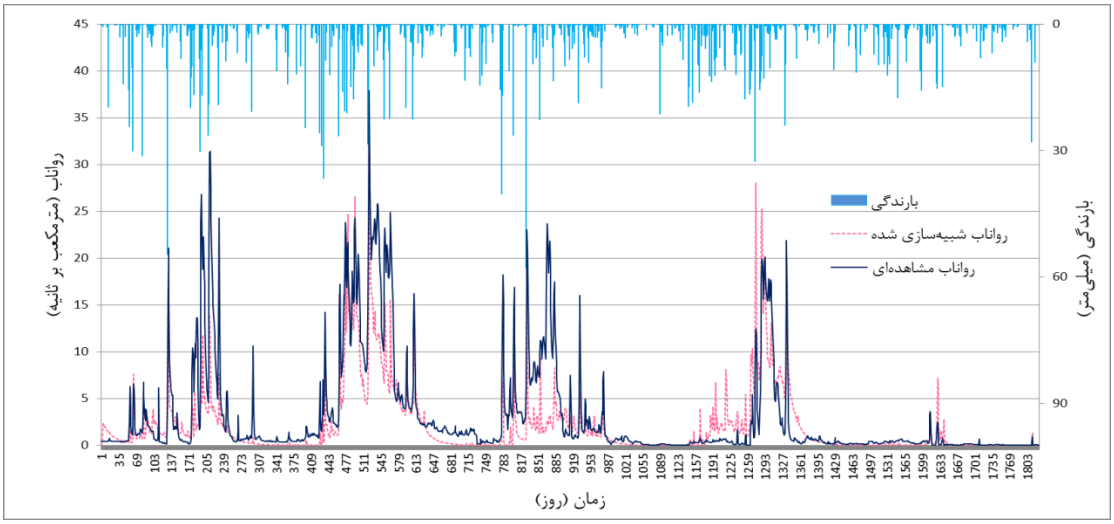

شکل ۳. نقشهٔ کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۱۳۶۵ (راست) و ۱۳۹۱ (چپ)

مقایسهٔ مساحت کاربری‌ها نشان می‌دهد طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۱ مساحت کاربری کشاورزی از ۶۰۰ کیلومترمربع به حدود ۸۹۰ کیلومترمربع و مناطق مسکونی از ۲۰ کیلومترمربع به حدود ۴۰ کیلومترمربع رسیده است. در ازای این افزایش‌ها سطح جنگل‌ها و مراتع کاهش یافته است.

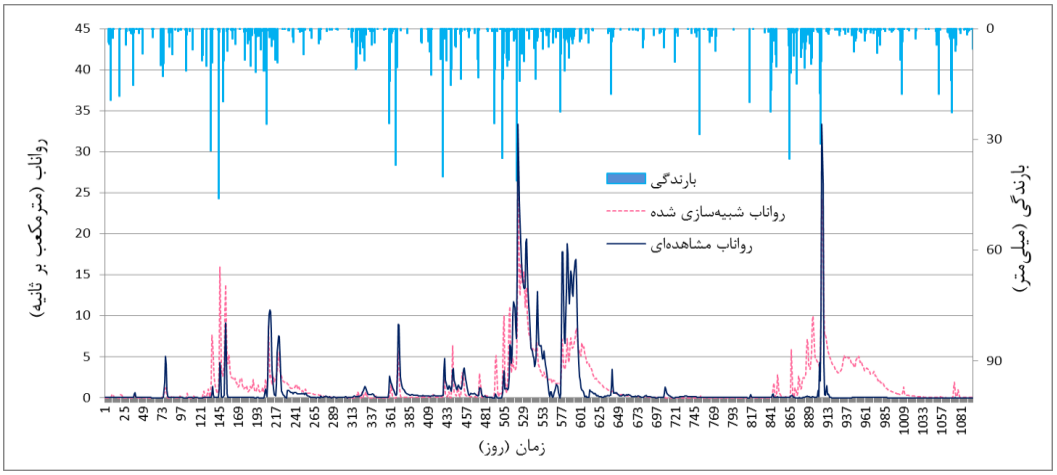
همان‌طور که بیان شد برای واسنجی مدل از داده‌های روزانه ۵ سال استفاده شد. شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی رواناب مدل در دورهٔ واسنجی و مقایسهٔ آن با داده‌های رواناب مشاهده‌ای روزانه در حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود رواناب شبیه‌سازی شده به‌خوبی با بارش همخوانی دارد. همچنین روند رواناب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای مشابه و بیانگر شبیه‌سازی مناسب است. برای ارزیابی میزان دقت شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل، از ضریب نش- ساتکلیف و معیار تجمعی دقت استفاده شد. نرم‌افزار به‌طور خودکار ضریب نش- ساتکلیف و معیار تجمعی را برابر با ۶۱ و ۶۴ درصد محاسبه کرد. نتایج با استانداردهای ارائه‌شده توسط هنریکسن و همکارانش [۱۵] و اندرسن و همکارانش [۵] بررسی شد (جدول ۱) که براساس آن‌ها دقت مدل‌سازی در طبقهٔ خوب قرار گرفت.

بعد از اطمینان از دقت شبیه‌سازی، مدل با استفاده از داده‌های سه سال دوباره اجرا و دقت شبیه‌سازی این دوره نیز محاسبه شد. میزان ضریب نش- ساتکلیف و معیار تجمعی به‌ترتیب ۵۶ و ۶۲ درصد به‌دست آمد که دقت شبیه‌سازی را در طبقهٔ خوب قرار می‌دهد. شکل ۵ داده‌های شبیه‌سازی‌شده این دوره را در برابر داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد.




**شکل ۴. مقایسهٔ رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده روزانه در دورهٔ واسنجی در حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان**

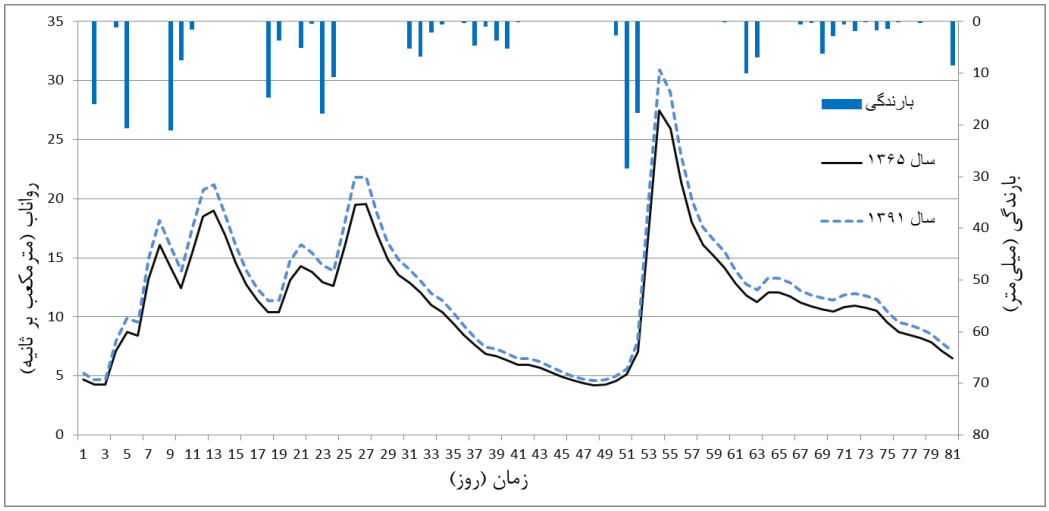



**شکل ۵. مقایسهٔ رواناب روزانهٔ مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده دورهٔ اعتبارسنجی در حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان**

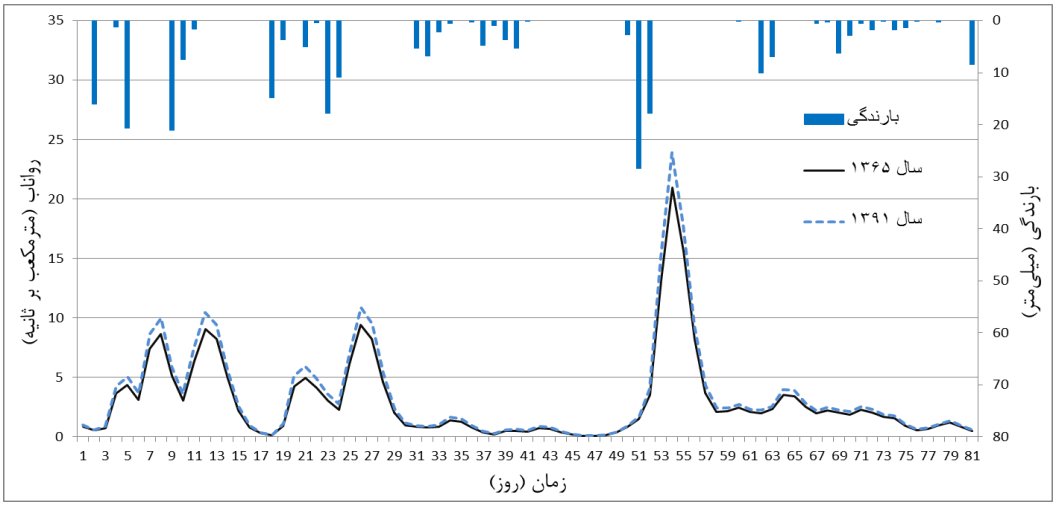
مطابق شکل بالا در دورهٔ اعتبارسنجی نیز رواناب شبیه‌سازی‌شده با بارش و رواناب مشاهده‌ای همخوانی دارد. البته میزان همخوانی رواناب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای در اواخر دوره کمتر است که می‌تواند بر اثر یک رگبار شدید باشد که در میزان بارش روزانه دیده نشده است. دقت در شکل بالا نشان می‌دهد بارش و رواناب شبیه‌سازی‌شده در آخر دوره همخوانی دارد و شبیه‌سازی به‌خوبی صورت گرفته است. برای اطمینان از این موضوع، بارش متناظر با رواناب شبیه‌سازی مقایسه شد و نتایج نشان داد همخوانی خوبی بین بارش و رواناب شبیه‌سازی شده وجود دارد.

همان‌طور که بیان شد مدل با نقشهٔ کاربری سال ۱۳۹۱ و ۱۳۶۵ اجرا و نتایج با هم مقایسه شد. به‌منظور نمایش گرافیکی بهتر، داده‌های مربوط به ۸۰ روز انتخاب و نمودار مربوط به آن ترسیم شد (شکل ۶). با توجه به اهمیت جریان سطحی، در حوضه‌های آبخیز مد نظر جریان سطحی برای دو کاربری نیز مقایسه شد (شکل ۷).

برای بررسی نقش کاربری در حجم رواناب، برای دو کاربری موجود حجم رواناب در کل دورهٔ شبیه‌سازی محاسبه شد. حجم رواناب برای کاربری سال ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ به‌ترتیب برابر با ۴۳۱/۶۲ و ۴۸۰/۳۱ میلیون مترمکعب به دست آمد. همچنین دبی اوج در کل دوره برای کاربری ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ برابر با ۲۷/۴۵ و ۳۰/۹۴ مترمکعب بر ثانیه است. مشخصات مختص به رواناب سطحی نیز مطابق رواناب کل محاسبه شد. حجم رواناب سطحی برای کاربری سال ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ به‌ترتیب ۱۵۸/۷۷ و ۱۸۲/۸۶ میلیون مترمکعب و دبی اوج ۲۰/۹۶ و ۲۳/۸۸ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد.

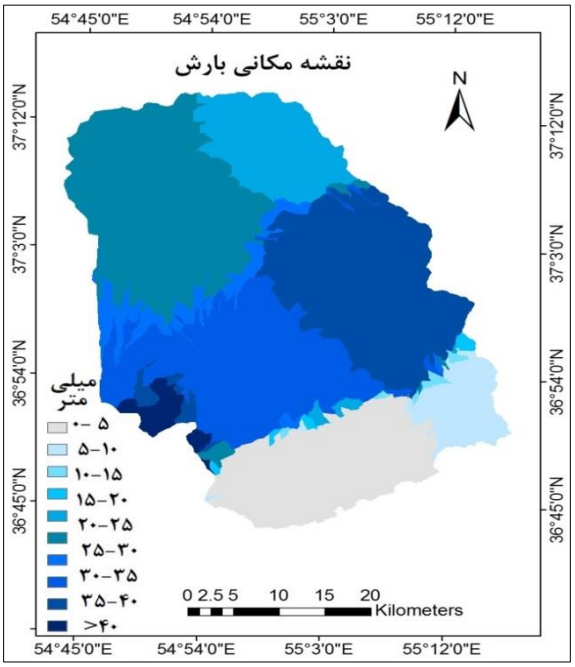



**شکل ۶. مقایسهٔ رواناب کل شبیه‌سازی‌شده مختص به نقشه‌های کاربری حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان**

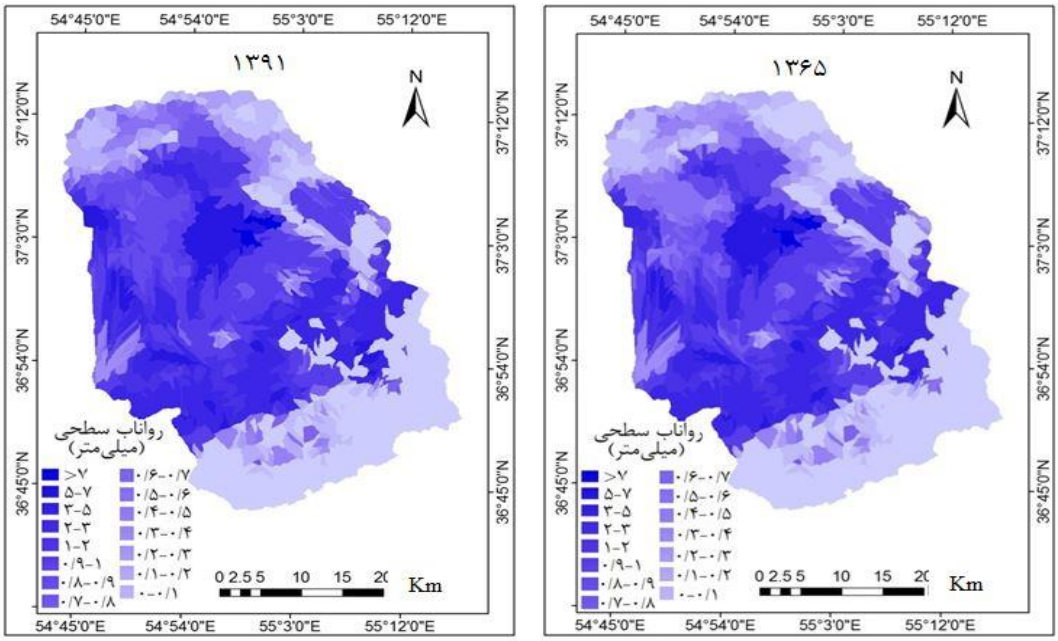



**شکل ۷. مقایسهٔ رواناب سطحی شبیه‌سازی‌شده مختص به نقشه‌های کاربری حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان**

به‌منظور نمایش نقش زیرحوضه‌های مختلف در تولید رواناب سطحی، نقشهٔ توزیع مکانی رواناب تهیه شد. برای مقایسهٔ دو وضعیت کاربری اراضی نقشهٔ بارش و نقشهٔ توزیع مکانی میزان رواناب سطحی در یک روز در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. شایان ذکر است تهیهٔ این نقشه‌ها برای تمام روزهای شبیه‌سازی امکان‌پذیر بود و به‌عنوان نمونه برای یک روز تهیه و نمایش داده شد. با توجه به ثابت‌بودن سایر شرایط، مناطقی که تغییرات کاربری وجود داشته به افزایش تولید رواناب سطحی منجر شده است. به‌طور نمونه در قسمت‌های غربی تبدیل مراتع به زمین‌های کشاورزی وجود داشته که به افزایش رواناب سطحی منجر شده است.




**شکل ۸. نقشهٔ بارش حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان**




**شکل ۹. نقشهٔ رواناب کاربری‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان**

**بحث و نتیجه‌گیری**

همان‌طور که در کشور و به‌ویژه مناطق شمالی انتظار می‌رود تخریب منابع طبیعی شامل جنگل و مرتع و تبدیل آن‌ها به کاربری کشاورزی و مسکونی مهم‌ترین تغییر اراضی در منطقه باشد. افزایش جمعیت حوضهٔ یادشده نیز به افزایش تغییر کاربری اراضی در منطقه منجر شده است. مدل در مقیاس روزانه شبیه‌سازی شده که این مقیاس از نظر تفکیک زمانی مشکلاتی را به‌دنبال دارد و دقت را کاهش می‌دهد. علت اصلی آن جابه‌جایی زمانی در داده‌های هواشناسی و رواناب به‌ویژه در حوضه‌هایی با مقیاس متوسط است [۸]. با وجود این مدل دقت قابل قبولی در منطقهٔ مطالعه‌شده داشت. در این پژوهش ضریب نش- ساتکلیف و معیار تجمعی برابر با ۶۱ و ۶۴ درصد در مرحلهٔ واسنجی و ۵۶ و ۶۲ درصد در مرحلهٔ اعتبارسنجی مدل را در طبقهٔ خوب براساس استانداردهای موجود قرار داد [۱۵، ۲۸].

با توجه به اینکه نقشهٔ کاربری به‌عنوان ورودی مهم در مدل، با استفاده از روش ترکیبی با بیشترین دقت تهیه شد انتظار دقت بیشتری در شبیه‌سازی بود. شاید یکی از دلایل اصلی کم‌بودن دقت مدل، وجودنداشتن نقشهٔ دقیق برای خاک‌شناسی و DEM باشد. همچنین منطقهٔ مطالعه‌شده از نظر توپوگرافی شرایط خاصی دارد و ارتفاع آن بین صفر تا حدود ۲۹۰۰ متر متغیر است. حدود ۶۰۰ کیلومترمربع از منطقه تقریباً حالت مسطح دارد و کاربری عمدهٔ آن کشاورزی است. نقشهٔ توپوگرافی در کشور به‌طورکلی دقت کمی دارد، ولی در مناطق مسطح به‌دلیل تغییرات بیشتر در سطح زمین و به‌روزرسانی نشدن نقشه‌ها، این مسئله بیشتر نمود دارد. همچنین در مدل WetSpa کاربری کشاورزی به شکل کلی در نظر گرفته می‌شود و کشت‌های مختلف با نیاز آبی متفاوت تفکیک نمی‌شود. همچنین به میزان استفاده از رواناب سطحی و آب‌های زیرزمینی در کشاورزی منطقه توجه نمی‌شود که موجب ممکن‌نبودن شبیه‌سازی دقیق در این مناطق می‌شود.

شبیه‌سازی حجم رواناب برای سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۹۱ نشان‌دهندهٔ افزایش حجم رواناب بر اثر تغییرات کاربری است. تغییرات عمدهٔ کاربری در حوضهٔ مطالعه‌شده تخریب جنگل‌ها و مراتع و تبدیل به کشاورزی و مناطق مسکونی است. جنگل‌ها با سطح تاج‌پوشش بیشتر، سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر و وجود لایه‌های هوموس سبب افزایش برگاب و نفوذپذیری و درنتیجه کاهش رواناب می‌شود [۱۴، ۲۵]. میزان زیاد تبخیر و تعرق از جنگل‌ها به‌دلیل داشتن پوشش برگی بیشتر و همچنین وجود ریشه‌های عمیق و تسهیل در میزان نفوذ و جریان آب در لایه‌های پایین‌تر خاک از دلایل کاهش رواناب است [۱۷]. پژوهشگران دیگری از جمله ادوارد [۱۲]، لل [۱۸]، کورنیش [۹]، شاهین و هال [۳۰]، اوت و اوهلنبروک [۲۶]، ثقفیان و همکارانش [۲۹]، فندر ولد و همکارانش [۳۴] نیز بر نقش تخریب جنگل بر افزایش رواناب تأکید داشته‌اند. تغییر دیگری که در منطقه وجود دارد، تبدیل مراتع به زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی است. کاهش سطح مراتع به افزایش مناطق با آبگذری کمتر، کاهش تبخیر، کاهش نفوذ، افزایش سطح خاک لخت، کاهش مادهٔ آلی منجر می‌شود و درنتیجه افزایش رواناب را به‌دنبال خواهد داشت [۱۷، ۲۲].

نتایج این پژوهش بیانگر افزایش دبی اوج درنتیجهٔ تغییرات کاربری است. تبدیل جنگل و مرتع به اراضی کشاورزی و به‌ویژه مناطق مسکونی سبب افزایش تولید رواناب و کاهش زمان تمرکز می‌شود، درنتیجه دبی اوج افزایش می‌یابد.

بررسی رواناب سطحی در کاربری‌های مختلف نیز بیانگر افزایش رواناب سطحی در نتیجهٔ تغییرات کاربری در منطقهٔ مطالعه‌شده است. معمولاً افزایش رواناب کل موجب افزایش رواناب سطحی نیز می‌شود، اما نتایج نشان داد تغییرات کاربری، رواناب سطحی را بیشتر از رواناب کل تحت تأثیر قرار می‌دهد. نکته‌ای که باید به آن توجه شود رواناب زیرسطحی است. این بخش از رواناب ممکن است در بسیاری از حوضه‌ها نقش کمی داشته باشد، اما در حوضه‌های جنگلی نقش آن برجسته‌تر است [۲۷]. پوشش جنگلی و مراتع سبب کاهش سرعت رواناب، افزایش نفوذ و درنتیجه کاهش رواناب سطحی و افزایش رواناب زیرسطحی می‌شود. وجود شیب ملایم‌تر در شاخه خشکیدگی هیدروگراف در کاربری سال ۱۳۶۵ نیز بیانگر نقش جریان زیرسطحی در حوضه و تأخیر در رسیدن این جریان به خروجی حوضه است. به‌طورکلی، با افزایش پوشش گیاهی و سطح اراضی جنگلی می‌توان دبی اوج را کاهش داد و به تأخیر انداخت که این امر نقش مهمی در کاهش خطر سیلاب و تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی دارد [۱].

تغییرات کاربری در حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان زیاد است، اما مساحت مناطق مسکونی نسبت به مساحت کل حوضه بسیار کم است و میزان افزایش آن نیز بسیار کمتر از کشاورزی است. بیشتر تغییرات منطقه مربوط به کشاورزی در پایین‌دست با توپوگرافی هموار اتفاق افتاده است. عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات هیدرولوژیکی و رواناب علاوه بر کاربری، خصوصیات توپوگرافی و خاک است. افزایش کشاورزی ممکن است خاک را حساس کند و سطح نفوذپذیری را کاهش دهد. ولی در عوض با توجه به اینکه بخشی از کشاورزی منطقه به‌صورت آبی است موقتاً حجمی از رواناب را از رودخانهٔ اصلی به زمین‌های کشاورزی منتقل می‌کند. با توجه به شیب کم مناطق کشاورزی بخش زیادی از آب در این مناطق تبخیر و بخشی هم نفوذ می‌کند و اثری که زمین‌های کشاورزی در بالادست بر رواناب دارند در این منطقه بسیار کمتر است. نتایج نشان می‌دهد اثر کاربری اراضی باید با توجه به سایر شرایط منطقهٔ مد نظر قرار گیرد. به‌طور مثال انتظار می‌رود تبدیل مراتع به کشاورزی تأثیر زیادی بر تولید رواناب داشته باشد، ولی با توجه به مسطح‌بودن مناطق کشاورزی این اثر زیاد نیست.

تهیهٔ نقشه‌های مکانی رواناب نقش مهمی در بررسی تغییرات موضعی رواناب دارد. همان‌طور که در قسمت‌های قبل مشاهده شد در این نقشه‌ها رواناب مختص به یک روز در سطح زیرحوضه‌های کوچک شبیه‌سازی شده و نقش هر زیرحوضه در تولید رواناب مشخص می‌شود. وجود چنین نقشه‌هایی به مدیران در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برای شروع عملیات مدیریتی کمک می‌کند. با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان مناطق را برای کارهای اصلاحی اولویت‌بندی و بیشتر بر زیرحوضه‌های با رواناب زیاد تمرکز کرد.

## منابع


[۱]. بیات، باقر، ۱۳۸۹، شبیه‌سازی جریان رودخانه و تحلیل تأثیرات تغییر کاربری روی آن با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز مرک، استان کرمانشاه)، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۴۴ صفحه.

[۲]. خلیقی سیگارودی، شهرام؛ زینتی شعاع، طیبه؛ سلاجقه، علی؛ کهندل، اصغر؛ مرتضایی فریزهندی، قاسم، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی بارش رواناب به روش نیمه‌توزیعی در حوضه‌های آبخیز با آمار کم (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز لتیان)، مجموعه مقالات پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، صص ۱۸۰-۱۸۸، اردیبهشت‌ماه، گرگان، ایران

[۳]. متکان، علی‌اکبر؛ زینی‌وند، حسین؛ بیات، باقر؛ غفوری، عبدالمحمد؛ میرباقری، بابک، ۱۳۹۰، مدل‌سازی تغییرات مکانی- زمانی جریان زیرسطحی و نفوذ با استفاده از مدل WetSpa و GIS (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز مرک، استان کرمانشاه)، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربری منابع آب ایران، اردیبهشت‌ماه، ایران

[۴]. محمدی، مجید، ۱۳۹۳، پیش‌بینی اثر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب با استفاده از مدل‌های CLUE-s و WetSpa به‌منظور مدیریت حوضهٔ آبخیز باغه‌سالیان در استان گلستان، رسالهٔ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکدهٔ منابع طبیعی، ۱۰۸ صفحه.

[5]. Andersen, Jens Christian, Refsgaard, Jens Christian, and Jensen, Karsten Hogh, 2001, Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin-model construction and validation. Journal ofHydrology, vol 247, pp. 200–214.

[6]. Bahremand, Abdolreza., and De Smedt, Florimond., 2008, Distributd hydrological modeling and sensitivity and uncertainty analysis in Torysa watershed, Slovakia. Water Resource Management, vol 22 p. 393-408.

[7]. Bahremand, Abdolreza., De Smedt, Florimond., Corluy, Jan., Liu, Yong Bo., Poorova, Jana., Velcicka, Lucia., and Kunikova, Elena., 2007, WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. Water Resource Management, vol 21 pp. 1373-1391.

[8]. Benaman, J., Shoemaker, Christine A., and Haith, D.A., 2005, Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York. Journal of Hydrologic Engineering, vol10 pp. 363–374.

[9].Cornish, P.M., 1993, The effects on logging and forest regeneration on water yield in moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. Journal of Hydrology, vol 150 pp. 301–322.

[10]. De Roo, Ad., Schmuck, Guido., Perdigao, Vanda., and Thielen, Jutta., 2003, The influence of historic land use changes and future planned land use scenarios on floods in the Oder catchment. Physics and Chemistry of the Earth, vol 28 pp. 1291-1300.

[11]. Doherty, John E., Hunt, Randall J., and Tonkin, Matthw J., 2010, Approaches to highly parameterized inversion-A guide to using PEST for model-parameter and predictive-uncertainty analysis: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5211, 71 p

[12]. Edwards, K.A., 1979, The water balance of the Mbeya experimental catchments. East African Agricultural and Forestry Journal, vol 43 pp.231– 247.

[13]. Elfert, Simon., and Bormann, Helge., 2010, Simulated impact of past and possible future land use changes on the hydrological response of the Northern German lowland Hunte catchment. Journal of Hydrology, vol 383 pp. 245-255.

[14]. Fullen, Michael, 1998, Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soils in East Shropshire, UK. Soil and Tillage Research, vol 46 pp. 41– 49.

[15]. Henriksen, Hans Jorgen., Troldborg, Lars., Nyegaard, Per., Sonnenborg, Torben Obel., Refsgaard, Jens Christian., and Madsen, Bjarne., 2003, Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. Journal of Hydrology, vol 280 pp. 52–71.

[16]. Hietel, Elke, Waldhardt, Rainer, and Otte, Annette, 2004, Analysing land-cover changes in relation to environmental variables in Hesse, Germany. Landscape Ecology, vol 19 pp. 473–489.

[17]. Hundecha, Yeshewatesfa., and Bardossy, Andras., 2004, Modeling of the effect of land use changes on the generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. Journal of Hydrology, vol 292 pp. 281–295.

[18]. Lal, R., 1981, Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems. In: Lal R, Russell EW (eds) Tropical agricultural hydrology. Wiley, New York, pp. 131–140.

[19]. Lambin, Eric F., 1997, Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. Progress in Physical Geography, vol 21 pp. 375–393.

[20]. Liu, Yong Bo., Gebremeskel, S., De Smedt, Florimond., and Pfister, Laurent, 2003, A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. Journal of Hydrology, vol 283 pp. 91–106.

[21]. Liu, Yong Bo., De Smedt, Florimond., Hoffmann, Lucien, and Pfister, Laurent, 2004, Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach, Luxembourg. Environmental Modeling and Assessment, vol 9 pp. 227-235.

[22]. Mohammad, Ayed G., and Adam, Mohammad A., 2010, The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. Catena, vol 81 pp. 97–103.

[23]. Mohammady, Majid., Morady, Hamidreza., Zeinivand, Hossein., and Temme, Arnaud, 2015 A Comparison of Supervised, Unsupervised and Synthetic Land use Classification Methods in the North of Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, vol 12 pp. 1515-1526.

[24]. Nash, John Eamoon, and Sutcliffe, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. Journal of Hydrology, vol 10 pp. 282–290.

[25]. Neary, Daniel G., Ice, George G., and Jackson, C. Rhett, 2009, Linkages between forest soils and water quality and quantity. Forest Ecology Management, vol 258 pp. 2269–2281.

[26]. Ott, B., and Uhlenbrook, Stefan, 2004, Quantifying the impact of land use changes at the event and seasonal time scale using a process-oriented catchment model. Hydrology and Earth System Sciences, vol 8 pp. 62–78.

[27]. Pereira, Donizete dos Reis, de Mello, Carlos Rogerio, de Silva, Antonio Marciano, and Yanagi, Silvia de Nazare Monterio, 2010, Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira Range region, MG. Cerne, vol 16 pp. 32– 40. http://www.dcf.ufla.br/cerne/artigos/11-06-20106222v16_n1_artigo%2004.pdf

[28]. Safari, Alireza., De Smedt, Florimond. and Moreda, Fekadu., 2012, WetSpa model application in the distributed model intercomparison project (DMIP2). Journal of Hydrology, vol 418–419 pp. 78–89.

[29]. Saghafian, Bahram., Farazjoo, Hasan., Bozorgi, Babak., and Yazdandoost, Farhad.,

2008, Flood intensification due to change in land use. Water Resources Management, vol 22 pp. 1051-1067.

[30]. Sahin, Vildan, Hall, Michael J., 1996, The effects of afforestation and deforestation on water yields. Journal of Hydrology, vol 178 pp. 293–309.

[31]. Tavakoli, Mohsen., De Smedt, Florimond., Vansteenkiste, Thomas., and Willems, Patrick., 2014, Impact of climate change and urban development on extreme flows in the Grote Nete watershed, Belgium. Natural Hazards, vol 71 pp. 2127–2142.

[32]. Terpstra, J., van Mazijk, Albert, 2001, Computer aided evaluation of planning scenarios to assess the impact of land-use changes on water balance. Physics and Chemistry of the Earth, vol 26 pp. 523-527.

[33]. Thomson, Allison M., Brown, Robert A., Rosenberg, Norman J., Srinivasan, Raghavan, and Izaurralde, R. Cesar, 2005, Climate change impacts for the conterminous USA: an integrated assessment. Climate Change, vol 69 pp. 67–88.

[34]. Van der Velde, Ype, Lyon, Steve W., and Destouni, Georgia, 2013, Data-driven regionalization of river discharges and emergent land cover—evapotranspiration relationships across Sweden. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, vol 118 pp. 2576–87.

[35]. Wang, Zhong-Min., Batelaan, Okke., and De Smedt, Florimond., 1997, Adistributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). Physics and Chemistry of the Earth, vol 21 pp. 189-193.

[36]. Zeinivand, Hossein., 2009, Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion and sediment transport. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium. 208 p.