مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰
ص ۸۸۸-۸۶۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۹
تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه‌های منابع آب در دوره‌های زمانی گوناگون و به تفکیک کاربری‌های مهم حوزه آبریز زاینده‌رود

❖ **نسار نصیری*؛** دانشجوی دکتری رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

❖ **کیوان اصغری؛** دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

❖ **علی اصغر بسالت‌پور؛** پژوهشگر مؤسسه مدیریت منابع inter3، برلین، آلمان

چکیده

در این پژوهش، تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه‌های منابع آبی، شامل منابع آب آبی و آب سبز در چهار نوع کاربری اراضی مهم در حوزه آبخیز زاینده رود، و با بهره‌گیری از مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی SWAT (Soil & Water Assessment Tool) و کامل‌ترین مجموعه داده توسعه داده شده برای این حوضه، در بازه زمانی ۲۰ ساله (شامل چهار بازه ۵ ساله) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به توانایی بالای مدل SWAT در امر شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی و رواناب سطحی، کمترین مقدار میانگین پنج ساله آب آبی، جریانِ آبِ سبز و ذخیره آبِ سبز در سطح حوضه، به ترتیب در دوره چهارم، ۲۰۱۴-۲۰۱۰ (حدود ۱۵ میلیمتر)، دوره دوم، ۲۰۰۴-۲۰۰۰ (۲۶ میلیمتر) و دوره اول، ۱۹۹۹-۱۹۹۵ (۳۰ میلیمتر) مشاهده شد. از دگرسوی میانگین مقادیر مؤلفه‌ی آبِ آبی و مؤلفه جریانِ آبِ سبز و ذخیره آبِ سبز در بخش‌های غربی حوضه بیشتر از بخش‌های شرقی حوضه برآورد گردید. از دیگر یافته‌های این پژوهش، تأثیرپذیری مقادیر مؤلفه‌های منابع آبِ آبی، ذخیره آبِ سبز و مقادیر مؤلفه‌ی جریانِ آبِ سبز از مقادیر بارش و تغییرات آن‌ها در انواع کاربری اراضی می‌باشند. بدین ترتیب که بیشینه آبِ آبی در اراضی جنگل و کشاورزی آبی، بیشترین تغییرات جریان آب سبز در اراضی کشاورزی آبی و دیم و کمینه ذخیره آب سبز در اراضی مرتعی مشاهده گردید. شناخت منابع آب موجود، پتانسیل‌های آبی و نقاط بحرانی در یک منطقه، امکان مدیریت جامع منابع آب و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت را میسر می‌گرداند.

واژگان کلیدی: آب آبی، آبِ سبز، مدیریت منابع آب، SWAT

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۰۹۱۲۷۱۵۲۴۴۰
Email: n.nasiry@cv.iut.ac.ir

۱. مقدمه

آب به عنوان یک منبع طبیعی بسیار ضروری، نقش مهمی در بقای بشر و توسعه پایدار اکوسیستم‌ها، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایفا می‌کند [۹]. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناسایی پتانسیل‌های دسترسی به منابع آب و بحث‌های مدیریتی مربوط به آن، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند، بدین‌منظور مدیریت جامع و پایدار منابع آب به عنوان راهکاری کارآمد، از مسائل چالش برانگیزی بوده که بسیار مورد توجه متخصصان و پژوهشگران این عرصه قرار گرفته است. در این رویکرد، با شناخت دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر منابع آبی در یک حوزه آبخیز، دستیابی به توسعه پایدار در همه جوانب اقتصادی، اجتماعی و محیط زیست با رعایت حقوق کلیه استفاده کنندگان و ایجاد تعادل بین آب سطحی و زیر زمینی و مشارکت همه استفاده کنندگان از پائین‌ترین سطوح تصمیم سازی، امکان‌پذیر می‌گردد [۲۲].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گوناگونی درباره منابع آب آبی (Blue Water) انجام شده، لیکن منابع آب سبز (Green Water) که در کشاورزی جزو منابع تأمین آب مورد نیاز بوده و از اهمیت بالایی نیز برخوردار است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱]. منابع آب آبی و آب سبز، از مؤلفه‌های منابع آب هستند، که آب آبی؛ مجموع آب زیرزمینی کم‌عمق، تغذیه عمیق آبخوان‌ها و ذخایر آبی شامل دریاچه‌ها، تالاب‌ها و به طور کلی منابع آب سطحی می‌باشد [۶]، اما در بیشتر مطالعات طبق تعریف فالکن مارک [۱۰]، منابع آب آبی محدود به رواناب سطحی و تغذیه آبخوان‌های عمیق شده است. مؤلفه آب سبز نیز برای نخستین بار توسط فالکن مارک مورد توجه قرار گرفت [۱۱] و آن را به دو مؤلفه‌ی جریان آب سبز (Green Water Flow) یا همان تبخیر و تعرق واقعی و ذخیره آب سبز (Green Water Storage) یا ذخیره رطوبتی خاک، تقسیم‌بندی نمود [۱۰]، که در برخی مطالعات نیز، آب سبز تنها ذخیره آب سبز در نظر گرفته شده است [۲۸].

تغییراتی که در میزان بارش و در ادامه آن در منابع آب آبی و آب سبز در یک حوضه آبخیز اتفاق می‌افتد، بر مدیریت و برنامه‌ریزی جامع منابع آبِ آن حوضه بسیار تأثیرگذار است. بنابراین اهمیت و ضرورتِ به کارگیری ابزارهای مدلسازی، برای شبیه‌سازی رواناب و مؤلفه‌های آبی، بیش از پیش احساس شده که یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی در این زمینه، مدل فیزیکی-نیمه توزیعی SWAT (Soil & Water Assessment Tool) می‌باشد. معادله تعادل رطوبت خاک، اساس مدل SWAT است و فرآیند شبیه‌سازی شامل رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر، جریان زیر لایه‌ای و نفوذ به آبخوان سطحی و عمیق است. این مدل با قابلیت اتصال به نرم افزار ArcGIS، قابلیت تجزیه و تحلیل و مدیریت مجموعه‌های بزرگ داده‌ای در مقیاس‌های مختلف جغرافیایی را دارا می‌باشد، و با توجه به فرآیند شبیه‌سازی آن، قابلیت برآورد رواناب و رسوب، برآورد مؤلفه‌های منابع آب (آب آبی و آب سبز) و بررسی اثر رویکردهای مدیریتی بر منابع آب را داشته و نتایج قابل قبولی را نیز بدست آورده است [۱، ۲۳، ۲۹، ۳۴، ۳۵]. همان‌طور که بدان اشاره شد، یکی از کارایی‌های مدل هیدرولوژیکی SWAT، امکان شبیه‌سازی و برآورد مؤلفه‌های منابع آبی شامل آب آبی، و آب سبز است. یکی از مزایای مدل SWAT عملکرد موفق این مدل در برآورد مؤلفه‌های منابع آبی در مناطق با شرایط محیط‌زیستی مختلف و مقیاس‌های جغرافیایی گوناگون بوده است [۱۴، ۱۷، ۲۸]. مدل SWAT، در مقیاس‌های جغرافیای بزرگ در سطح قاره‌ای و یا کشوری [۱۳، ۱۴] و یا حوضه‌ای و زیرحوضه‌ای [۴، ۳۰]، در سرتا سر دنیا و ایران، توانمندی قابل توجهی در شبیه‌سازی تغییرات مکانی و زمانی فرآیندهای هیدرولوژیکی، من جمله مؤلفه‌های منابع آب دارد.

از دگرسوی یکی دیگر از توانمندی‌های مدل SWAT، ارزشمندی و کارآمدی آن در حیطه پژوهش اثرات تغییر

اقلیم بر تغییرات مکانی و زمانی منابع آب قابل دسترس شامل مؤلفه‌های منابع آب است [۳، ۱۴، ۲۱، ۲۷]. در حقیقت این مدل، قابلیت در نظرگرفتن اثر غلظت CO_2، بارش، دما و رطوبت را بر فرآیندهای هیدرولوژیکی از قبیل، برآورد میزان تبخیر تعرق و تولید رواناب و برف را دارد. علاوه بر این، مدل SWAT دارای یک فرآیند رشد گیاه نیز می‌باشد و توانایی بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رشد گیاه را نیز دارا می‌باشد که از این توانمندی می‌توان در راستای بررسی بازدهی محصولات کشاورزی بهره برد [۳۳]. یکی دیگر از نقاط قوت مدل SWAT، بهره‌گیری این مدل از رابطه هارگریوز-سامانی [۲۰] علاوه بر رابطه پنمن مونتیث برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل است. اطلاعات مورد نیاز در محاسبه تبخیر تعرق پتانسبل با رابطه هارگریوز-سامانی نسبت به رابطه پنمن مونتیث محدودتر بوده و با در نظرگرفتن دمای سطحی در این رابطه و تأثیر مستقیم دما بر میزان تبخیرو تعرق پتانسیل، توانایی مدل SWAT در مدلسازی شرایط واقعی حوضه افزایش می‌یابد [۱۴].

از دگرسوی می‌توان به یکی از نقاط ضعف مدل هیدرولوژِیکی SWAT اشاره نمود که دسترسی کامل به داده‌های مختلفی همچون، داده‌های بارش و دما در مقیاس روزانه، داده‌های خاک، شیب، کاربری اراضی، داده‌های مدیریتی با دقت و طول آماری مناسب است که گاها دسترسی به چنین اطلاعات گسترده‌ای در مقیاس‌های جغرافیایی چه بزرگ و چه کوچک با دقت و کیفیت بالا ناممکن به نظر می‌رسد. به عنوان مثال، عدم دسترسی به داده‌های کاربری اراضی با دقت بالا و در نتیجه آن عدم تقسیم‌بندی مناسب اکوسیستم، شبیه‌سازی با مدل SWAT را با عدم قطعیت‌هایی همراه خواهد کرد [۳۲، ۳۳]. از سوی دیگر، چنانچه از مدل SWAT در مقیاس‌های بزرگ جغرافیایی در برآورد منابع آب استفاده شود، افزون بر اینکه دید جامع و کاملی نسبت به پراکنش مکانی منابع آب ایجاد می‌نماید اما توانایی بررسی جزییات در سطوح کوچک‌تری همچون سطح زیرحوضه‌ای را ندارد [۱۳] بنابراین، باید این نکته پیش از انتخاب مدل، با توجه به هدف پروژه و دقت مورد نیاز آن مدنظر قرار گیرد.

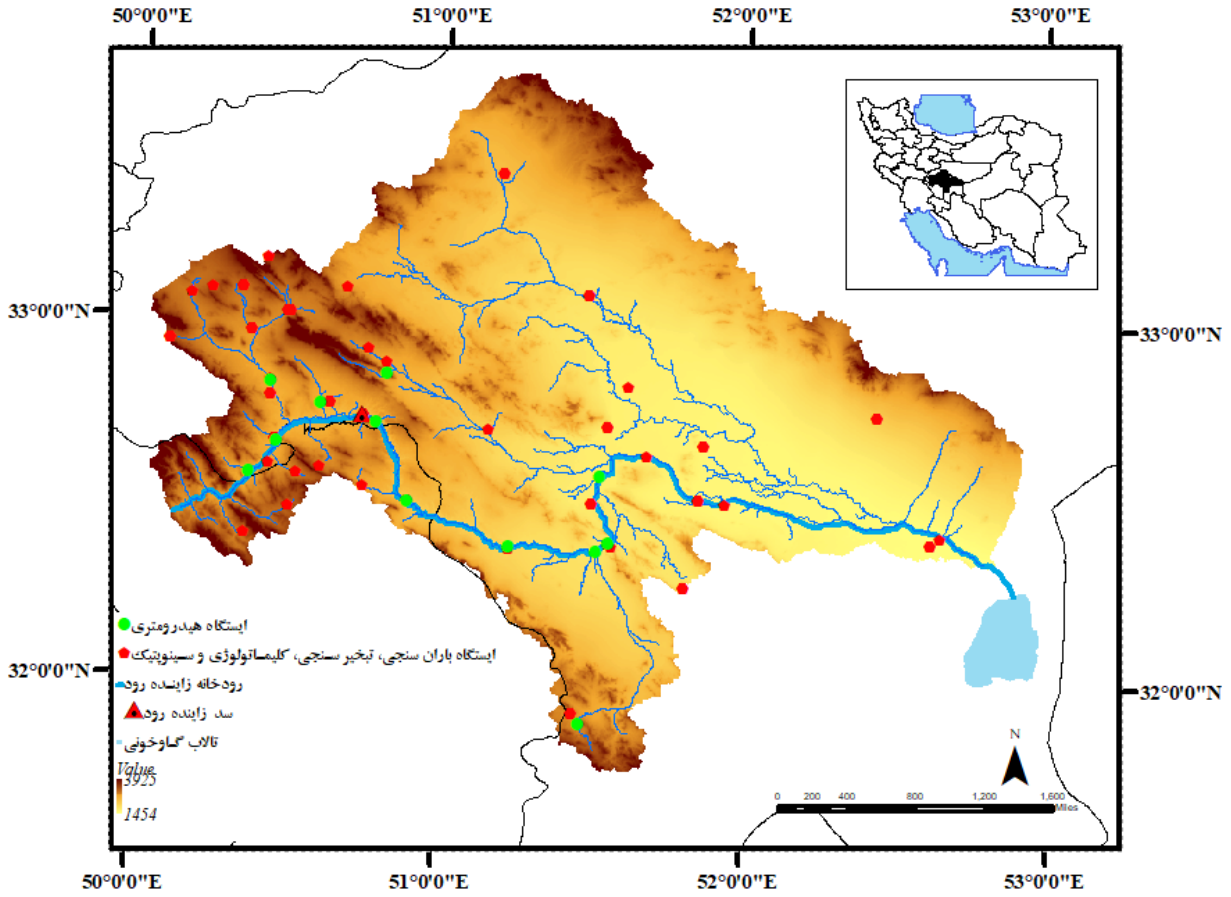
حوزه آبخیز زاینده‌رود طی قرن‌ها، مرکز فعالیت‌های اقتصادی مهم شامل، گسترش شهر اصفهان به عنوان پایتخت تاریخی ایران بوده است. در این حوضه فعالیت کشاورزی و صنعتی رونق بسیاری داشته به طوری‌که بخش مهمی از درآمد ناخالص کشور را تأمین می‌کند. تغییرات و فعالیت‌های در حال جریان در داخل حوضه، به‌شدت منابع آب در دسترس در حوضه را تحت تأثیر قرار داده که با توجه به عدم توازن مابین منابع و مصارف آب در حوضه زاینده‌رود، افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و عدم وجود مدیریت صحیح منابع آب و اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی نادرست، این حوضه در طی سال‌های اخیر به شدت با بحران کم‌آبی مواجه گردیده است [۲]. از این رو به نظر می‌رسد که شناخت جامعِ مؤلفه‌های منابع آبی و تجدیدپذیر در این حوضه بتواند در مسیر دست‌یابی به راهکارهای سازگاری و کاهش خطر عدم دسترسی به منابع آب، مفید واقع گردد. بنابراین، این پژوهش با هدف اصلی بررسی تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه‌های منابع آب آبی و آب سبز (جریان آب سبز و ذخیره آب سبز) در سطح حوزه آبخیز زاینده‌رود و با در نظر گرفتن تغییرات مؤلفه‌های منابع آب آبی و آب سبز در کاربری‌های اراضی مهم حوضه تعریف گردید. همچنین در این پژوهش، تغییرات مؤلفه‌های منابع آب به صورت پیوسته برای چهار دوره ۵ ساله (در یک بازه‌ی ۲۰ ساله)، مورد بررسی قرار گرفت که دلیل انتخاب چهار دوره ۵ ساله، پیچیدگیِ حوضه زاینده‌رود، از لحاظ تصمیمات مدیریتی و تغییرات و فعالیت‌های انسانی اتفاق افتاده در دوره‌های کوتاه‌مدت، در سطح حوضه بوده که این عوامل متعاقبا بر مؤلفه‌های منابع آبی نیز مؤثر بوده‌اند. از دگرسوی انتخاب صحیح مدل هیدرولوژیکی مناسب برای برآورد و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در سطح این حوضه، از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین، با

مرور پژوهش‌های انجام شـده و آگاهی از مزایا، توانمندی و عملکرد موفق مـدل SWAT در مناطق مختلف دنیا و ایران و حتی حوضه زاینده‌رود در زمینه‌های مختلفی چون شبیه‌سازی جریان [۲۶]، شبیه‌سازی اثرات هیدرولوژیکی بر منابع آب حوضـه [۲۵]، شـبیه‌سـازی بیلان آب [۵] و شبیه‌سازی وضعیت کمی و کیفی آب در این حوضه [۱]، مـدل هیـدرولوژیکی SWAT بـه عنوان مـدلی کارآمـد در راستای تحقق اهداف این پژوهش، انتخاب گردید.

۲. روش‌شناسی

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز زاینده‌رود (شـکل ۱)، با مسـاحت ۲۶۹۰۰ کیلومترمربع، حـدود ۶۳٪ وسـعت حوزه آبریز گـاوخونی (گاوخونی خود جزئی از حوضه‌ی کلان فلات مرکزی ایران اسـت) را شـامل می‌شـود [۱۸]. این حوضـه از شـمال به حوضهٔ آبریز دریاچهٔ نمک، از شرق به حوضه‌های دق‌سرخ و کویرسـیاه‌کوه، از جنوب به حوضـهٔ کویر ابرقو و از غرب وجنوب به حوضـهٔ آبریز کارون محدود می‌شـود. رودخانهٔ زاینده‌رود که مهم‌ترین رودخانهٔ مرکزی ایران اسـت، از ارتفاعات زردکوه بختیاری در حوضـهٔ آبریز سـدزاینده‌رود سرچشمه گرفته و نهایتاً با عبور از شهر اصفهان به باتلاق گاوخونی ختم می‌شـود که ارتفاع آن از سـطح دریا از ۱۴۵۴ تا ۳۹۲۵ متر بوده که این امر دامنه تأثیر قابل توجه تنوع آب و هوایی را نشـان می‌دهد. سـرچشـمه‌های رودخانه زاینده‌رود در فاصله ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان به سد مخزنی زاینده‌رود وارد می‌شوند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز زاینده‌رود

آب و هوای حوزه آبخیز زاینده رود از نیمه خشک در ارتفاعات غرب تا خشک در مناطق پست شرقی، متغیر است. میزان متوسط سالیانه بارش در این حوضه حدود ۲۱۱ میلی‌متر گزارش شده است. در مناطق مرتفع غربی، میزان متوسط بارندگی از ۳۰۰ تا ۱۳۴۵ میلی‌متر در سال در نوسان بوده در حالی‌که در نواحی مرکزی و شرقی حوضه، متوسط سالیانه بارش از ۷۵ تا ۲۳۰ میلی‌متر فراتر نمی‌رود. درجه حرارت متوسط دراز مدت زمستان ۰/۴- درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات و ۱۱ درجه سانتی‌گراد در نواحی پست شرقی، با تابستان‌های بیش از ۷ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در مناطق غربی و شرقی گزارش شده است [۱۵].

میزان تولید سالیانه طبیعی آب در حوضه زاینده‌رود؛ حدود ۸۰۰ میلیون مترمکعب گزارش گردیده [۱۵]، این میزان آب می‌بایستی پاسخگوی مصرف‌کنندگان گوناگون از جمله کشاورزی، صنعت، شرب و محیط‌زیست نه تنها در حوضه زاینده‌رود، بلکه حوضه‌های مجاور نیز باشد. از دگرسوی، با در نظر گرفتن بارش‌های کم در سطح حوضه و افزایش روز افزون تقاضا برای آب و عدم تعادل مابین عرضه و تقاضا، نیاز به شناخت منابع آب قابل دسترس، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب در سطح حوضه بیش از پیش، رو به افزایش می‌باشد.

۲.۲. مدل هیدرولوژیکی مؤلفه‌های منابع آب با استفاده از مدل SWAT

۱) آماده سازی داده ها و نقشه های مورد نیاز

مدل SWAT، از گروه مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه توزیعی، مفهومی و پیوسته زمانی؛ مدلی جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد که توسط وزارت کشاورزی ایالات متحده، برای ارزیابی دبی جریان و تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و تعادل مواد شیمیایی در حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی مدت تهیه و ارائه گردیده است [۷]. تئوری و ساختار این مدل در پژوهش‌های گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته [۱۳، ۱۴]، بنابراین در اینجا تنها به چگونگی مدل‌سازی مؤلفه‌های منابع آب حوضه زاینده‌رود با استفاده از مدل SWAT پرداخته شده است.

لایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) به همراه لایه‌های کاربری اراضی، شیب و خاک، ۴ نقشه مهم مورد نیازِ ورودی به مدل SWAT هستند که بر اساس اطلاعات این نقشه‌ها و با در نظرگرفتن غیریکنواختی مکانی منطقه‌ی مورد مطالعه، مدل؛ حوضه را به تعدادی زیرحوضه و سپس با توجه به نوع کاربری اراضی، شیب و اطلاعات خاک، هر زیرحوضه را به تعدادی HRUs تقسیم می‌نماید. در پژوهش حاضر برای تعریف HRU ها از گزینه Dominant Land Use, Soil, Slope استفاده شد. در این روش برای هر زیر حوضه به صورت جداگانه یک واحد واکنش هیدرولوژیک تولید می‌شود که مبتنی بر خصوصیات غالب نوع کاربری اراضی، خاک و کلاس شیب می باشد [۳۱].

نقشه DEM توسط سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده و در اختیار ارگان‌های مختلف (مانند اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری ، جهاد کشاورزی و یا شرکت آب منطقه‌ای) قرار گرفته که نقشه DEM در این پژوهش با دقت ۹۰ متر، از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان دریافت شده و اصلاحات لازم بر روی نقشه صورت پذیرفت. بر اساس نقشه DEM تهیه شده، کمینه ارتفاع در منطقه ۱۴۵۴ و بیشینه آن ۳۹۲۵ متر است. در این مطالعه نقشه آبراهه‌ها از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان تهیه شده و در محیط نرم‌افزار ArcGIS و با استفاده از نقشه DEM اصلاح و سپس دقت و صحت آن در محیط نرم افزار گوگل ارث (Google Earth) بررسی و اصلاحات لازم انجام شد. در این پژوهش، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۵، تهیه شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری اصفهان و مورد تأیید سازمان جنگل‌ها، مرتع و آبخیزداری کشور، در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ تهیه شده و با بهره‌گیری از Google Earth و داده‌های زمینی در جهت اطمینان از تغییرات رخ داده در سطح حوضه، اصلاحات مورد نیاز بر

روی نقشه کاربری اراضی صورت گرفته و نقشه حاصل به روزرسانی شد. در اکثر مطالعات برای تهیه نقشه خاک، از نقشه خاک جهانی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده که در پژوهش حاضر در راستای افزایش دقت شبیه‌سازی، برای تهیه نقشه خاکِ حوضه زاینده‌رود، از نقشه‌های اجزاء واحدهای اراضی (Land Components) در استان اصفهان به عنوان نقشه‌های پایه استفاده شد. در ادامه با توجه به نقشه‌ها و اطلاعات پروفیل خاک تهیه شده از سازمان‌های ذیربط برای واحدهای خاک، در واحدهایی که اطلاعاتی برای پروفیل خاک و لایه‌های خاک موجود نبود، نمونه‌برداری در محل از لایه‌های مختلف انجام شده و پس از انجام آزمایشات خاک و مشخص نمودن ویژگی‌های لایه‌های خاک، نقشه پایه‌ی خاک برای کل محدوده مورد مطالعه حاصل گردید.

داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل SWAT، شامل داده‌های اقلیمی (بارش، کمینه و بیشینه درجه حرارت، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی هوا در مقیاس روزانه) در ایستگاه‌های هواشناسی کلیماتولوژی، باران‌سنجی، سینوپتیک و تبخیرسنجی موجود در منطقه مورد مطالعه، داده‌های هیدرومتری (داده‌های جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری در مقیاس روزانه و ماهانه) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل و در نهایت داده‌های مدیریتی (اطلاعات بهره‌برداری از سد، پروژه‌های انتقال آب و مصارف) می‌باشد که از طریق شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان و سازمان هواشناسی کشور تهیه شده و قابل ذکر است که، کلیه اطلاعات دریافتی مورد تأیید وزارت نیرو می‌باشد. پس از دریافت داده‌ها، مختصات جغرافیایی همه ایستگاه‌های اقلیمی و هیدرومتری در محیط نرم افزار گوگل‌ارث ارزیابی و تصحیحات لازمه انجام شد. داده‌های هر ایستگاه نیز به صورت جداگانه برای اطمینان از دقت و کیفیت آن‌ها، با آزمون‌های همگنی، تصادفی بودن داده‌ها و آزمون کفایت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. از دگرسوی تعداد داده گمشده، بازه‌های زمانی با داده‌های گمشده و نیز طول دوره داده‌های موجود برای هر ایستگاه تعیین شده و نواقص آماری در ایستگاه‌هایی که فاقد آمار بودند با استفاده از روش درون‌یابی و ایستگاه‌های مجاور آن، اصلاح شدند.

۲) آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی

تحلیل حساسیت، روش مناسبی برای بررسی رفتار مدل تحت پارامترهای ورودی آن و اطمینان از نتایج بدست آمده می‌باشد [۲]. از روش تحلیل حساسیت مطلق، برای بررسی حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و تأثیر هر پارامتر بر میزان رواناب شبیه‌سازی شده، استفاده شد که به طور کلی در زیرحوضه‌های گوناگون مدل تنها نسبت به ۳۲ پارامتر (جدول ۱) حساسیت نشان داد. پس از انجام تحلیل حساسیت، آنالیز پارامتر و تحلیل اولیه نتایج مدل، واسنجی و اعتبارسنجی نهایی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP انجام و شبیه‌سازی‌های لازم انجام شد. برای ارزیابی مدل در برآورد رواناب، از دو شاخص مرسوم برای ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی، ضریب تبیین (R^2) و ضریب ناش-ساتکلیف (Nash-Sutcliff) [۲۴] و همچنین معیارهای p-factor و r-factor برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده و سنجش دقت مدل SWAT در برآورد رواناب استفاده گردید.

۳) برآورد مؤلفه‌های آب آبی و آب سبز

به منظور تخمین مؤلفه‌های منابع آب شامل آب آبی و آب سبز و بررسی توزیع مکانی (در مقیاس زیرحوضه) آن‌ها، واسنجی و اعتبارسنجی نتایج مدل، بر اساس پارامترهای بیلان آبی حوضه مورد مطالعه و داده‌های مشاهداتی هیدرومتری در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ انجام شد. افزون بر این، آنالیز حساسیت در مورد پارامترهای تأثیرگذار (جدول ۱) در روند شبیه‌سازی این مؤلفه‌ها انجام شده و تغییرات مؤلفه‌های منابع آبی (آب آبی و آب سبز) در اثر این پارامترها شناسایی شده و با استفاده از الگوریتم SUFI2 واسنجی و اعتبارسنجی صورت پذیرفت.

پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل و وارد کردن مقادیر پارامترهای بهینه شده، در هر زیرحوضه و برای

بازه زمانی (۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴) آب آبی و آب سبز برآورد گردید. آب آبی شامل مجموع رواناب سطحی (Water Yield) و تغذیه آب زیرزمینی عمیق (Deep Aquifer)، آب سبز نیز به دو بخش جریان آب سبز (Green Water Flow) و ذخیره آب سبز (Green Water Storage) تقسیم شد. جریان آب سبز شامل تبخیر و تعرق واقعی (Actual Evapotranspiration) و ذخیره آب سبز؛ شامل آب موجود در پروفیل خاک (Soil Water) می‌باشد که مقادیر این مؤلفه‌ها از مدل SWAT-CUP استخراج گردید. این مؤلفه‌ها بیشتر از لحاظ اهمیت و کاربردی بودن آنها در مطالعات منابع آبی حائز اهمیت می‌باشند، به نحوی که با مطالعه آب سبز به خصوص محاسبه میزان رطوبت خاک، قسمتی از منابع آب تجدیدپذیر با برگشت اقتصادی، قابل تشخیص بوده و می‌توان به منظور برنامه‌ریزی بهتر، مورد استفاده قرار گیرد. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، پس از شبیه‌سازی مؤلفه‌های منابع آب، با توجه به اینکه حوضه زاینده‌رود به شدت دستخوش تغییرات و فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است، بررسی تغییرات این مؤلفه‌ها در بازه زمانی ۲۰ ساله به صورت دوره‌های کوتاه‌مدت ۵ ساله و با در نظر گرفتن چهار نوع کاربری اراضی مهم به ترتیب؛ جنگل، مرتع، کشاورزی آبی و کشاورزی دیم انجام شده تا بهتر بتوان تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه‌ها را با توجه به ویژگی‌های حوضه، هم از نظر پارامترهای اقلیمی که مهم‌ترین آن بارش است و هم از نظر خصوصیات فیزیکی در انواع پوششِ کاربری اراضی مورد بررسی قرار داد.

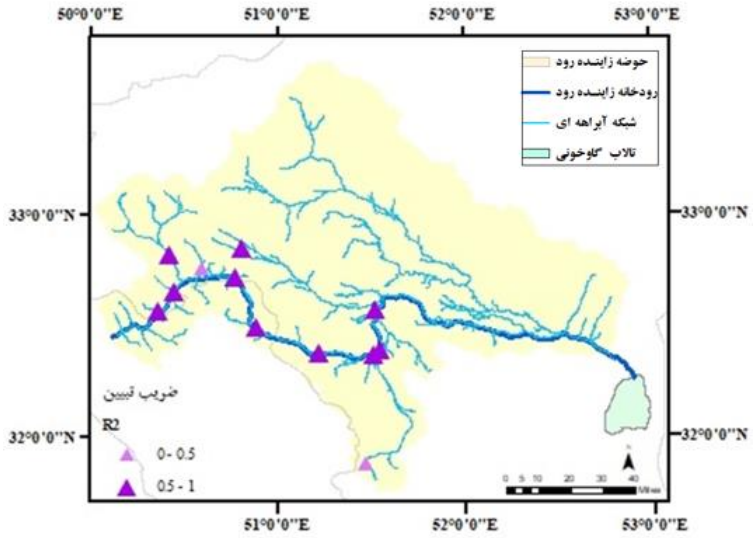
جدول ۱. پارامترهای حساس برای شبیه‌سازی رواناب در زیرحوضه های مختلف

ردیف	پارامتر	ردیف	پارامتر
۱	CH_K2	۱۷	RCHRG_DP
۲	CN2	۱۸	GW_DELAY
۳	SOL_K	۱۹	GW_REVAP
۴	SOL_BD	۲۰	SFTMP
۵	SOL_AWC	۲۱	SMTMP
۶	EPCO	۲۲	SMFMN
۷	ESCO	۲۳	TIMP
۸	SHALLST	۲۴	PCPMM
۹	SLSUBBSN	۲۵	ALPHA_BF
۱۰	REVAPMN	۲۶	GWQMN
۱۱	FLOWMIN	۲۷	DIVMAX
۱۲	FLOWFR	۲۸	IRRSC
۱۳	IRRNO	۲۹	PCPMM
۱۴	PCPSTD	۳۰	PCPSKW
۱۵	OV_N	۳۱	MSK_CO1
۱۶	MSK_CO2	۳۲	HRU_SLP

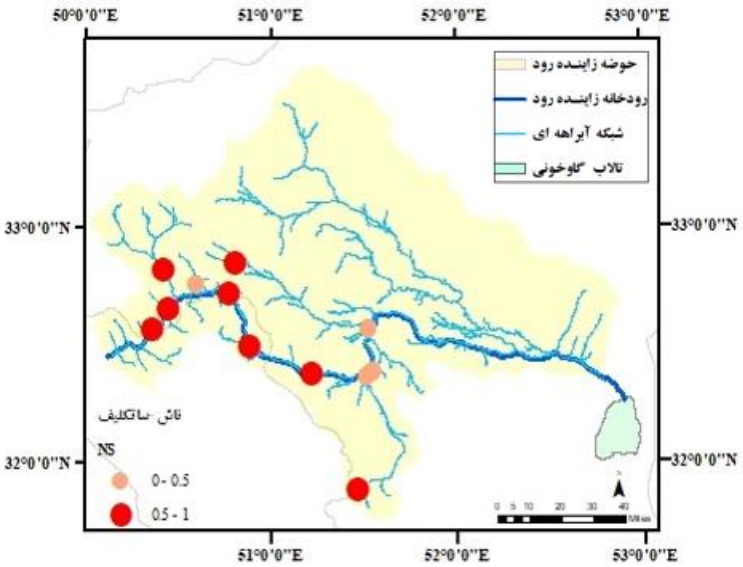
۳. نتایج

۳.۱. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه زاینده‌رود بوده به‌گونه‌ای که مدل روند تغییرات جریان (به ویژه مقادیر دبی بیشینه)، را به خوبی شبیه‌سازی نمود. همچنین مقادیر ضرایب سنجش کارایی مدل تقریبا در همه مناطق حوضه مورد مطالعه در حد قابل قبول بود (شکل ۲)؛ به نحوی که مقدار ضریب ناش- ساتکلیف در تعداد زیادی از ایستگاه‌های مورد مطالعه از حد قابل قبول آن (برابر ۰/۵) بالاتر بود. مقادیر قابل قبول r-factor و p-factor حاصله، در واسنجی مدل نیز گویای دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان‌های سطحی منطقه مورد مطالعه بودند (جدول ۲).



(الف)



(ب)

شکل ۲. مقادیر؛ الف) ضریب تبیین R^2، ب) ضریب ناش-ساتکلیف NS، در حوضه زاینده رود در محل ایستگاه های هیدرومتری

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی در ایستگاه های هیدرومتری حوضه

شاخص ارزیابی	اسکندری	مندرجان	قلعه شاهرخ	خرسانک	قلعه نظر	سد تنظیمی	پل زمانخان	پل کله	موسیان	لنجان	دیزیچه	تنگ همگین
r-factor	۰/۵۸	۱/۴۰	۰/۷۶	۰/۵۰	۰/۳۱	۰/۵۳	۱/۷۸	۰/۷۰	۱/۷۸	۱/۵۵	۰/۷۰	۱/۰۹
p-factor	۰/۴۴	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۵۱	۰/۹۸	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۶۱	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۷۳

براساس نتایج دیگر پژوهشگران [۳۰]، [۲]، [۱۹]؛ مقادیر p-factor، ۵۰ درصد و بیش از آن و r-factor کمتر از ۱/۳۰ نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل، در شبیه‌سازی می‌باشد. در شکلِ ۲، بر اساس جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری در سطح حوضه‌ی زاینده‌رود، مقادیر ضریب تبیین R^2 و ضریب ناش-ساتکلیف NS، نشان داده شده است.

با توجه به برخی نتایج جدول ۲ در مورد r-factor، که مقادیر بالای ۱/۳ مشاهده می‌شود، قابل ذکر است که لازمه‌ی تصمیم‌گیری در مورد کارایی و عملکرد یک مدل در امر شبیه‌سازی با توجه به ضرایب و درصدهای ارزیابی، در نظرگرفتن مجموعه ضرایب ارزیابی با هم است. گاها میان چهار ضریب ارزیابی، ممکن است یک یا دو ضریب مناسب نبوده اما مابقی ضرایب، عملکرد مناسبی ازمدل را ارائه دهند که در این صورت با در نظرگیری مجموع نتایج ضرایب، در مورد عملکرد مدل تصمیم‌گیری خواهد شد.

۳.۲. شبیه‌سازی مؤلفه‌های منابع آب آبی و سبز

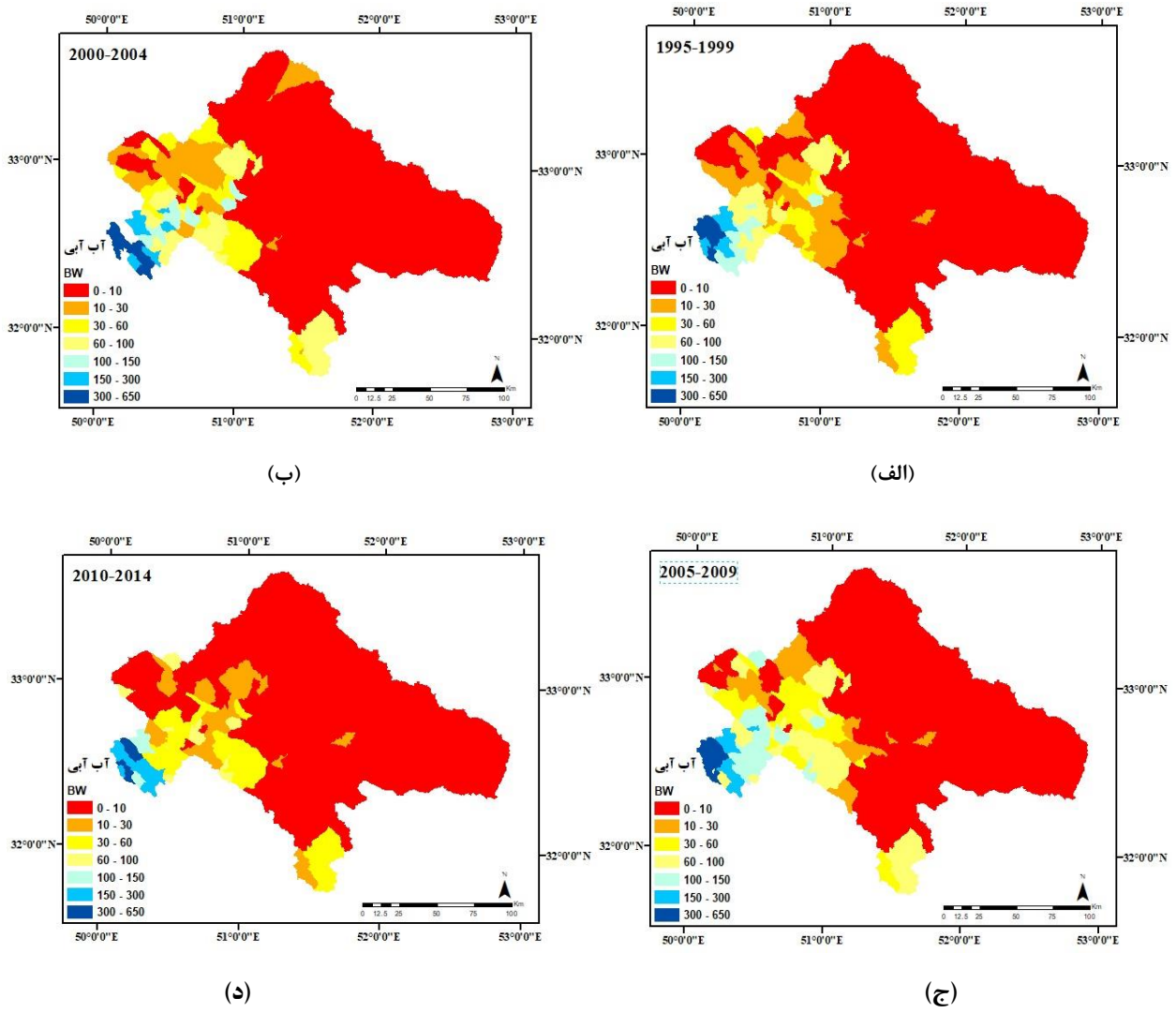
در این بخش، از مدل واسنجی و اعتبارسنجی برای بررسی توزیع مؤلفه‌های منابع آب در محدوده مورد مطالعه و تغییرات آن در طول بازه زمانی (۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴)، مقادیر میانگین سالانه مؤلفه‌های منابع آب شامل آب آبی، ذخیره آب سبز و جریان آب سبز و نیز پارامتر بارش در دوره‌های ۵ ساله شامل دوره اول (۱۹۹۹-۱۹۹۵)، دوره دوم (۲۰۰۴-۲۰۰۰)، دوره سوم (۲۰۰۹-۲۰۰۵) و دوره چهارم (۲۰۱۴-۲۰۱۰)، در سطح کل حوضه و در چهار نوع کاربری اراضی مهمِ حوضه به تفکیک، در قالب نقشه‌های طبقه‌بندی شده (شکل ۳، ۴، ۷، ۹) مورد بررسی قرار گرفت. نقشه‌های ارائه شده، همگی بر اساس خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی مؤلفه‌های منابع آب برای هر زیرحوضه (۲۸۴ زیرحوضه) در سطح حوضه زاینده‌رود بوده است که در دوره‌های ۵ ساله ارائه شده‌اند. روش تهیه آن‌ها نیز با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS و طبقه‌بندی نقشه‌ها با کمک این نرم‌افزار، بر اساس مقادیر مؤلفه‌های منابع آبی در زیرحوضه‌ها بوده است.

آبِ آبی

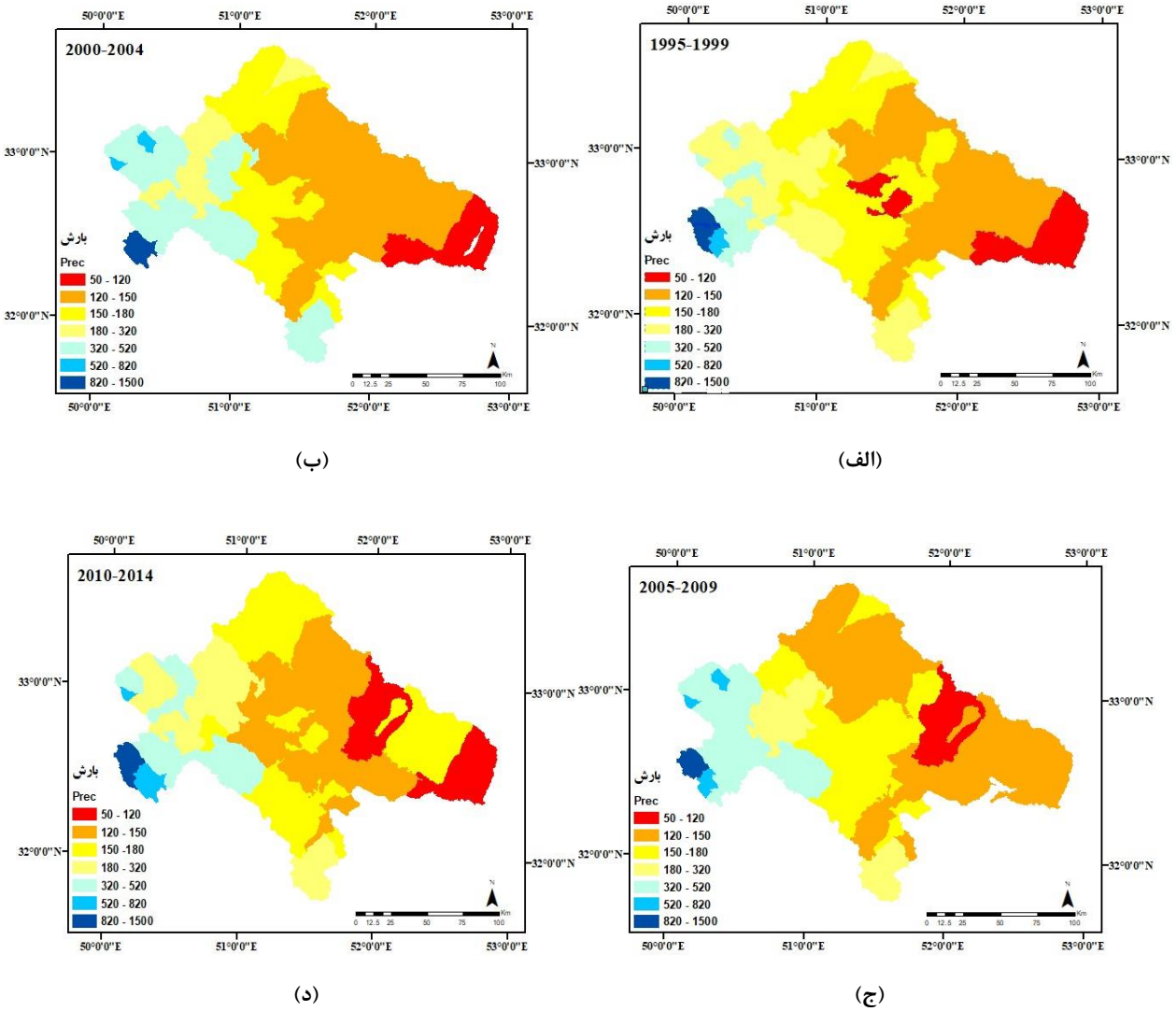
شکل ۳، تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه آب آبی در یک بازه ۲۰ ساله را برای دوره‌های ۵ ساله در سطح کل حوضه نشان می‌دهد. به طور مشخص، کمترین مقدار میانگین ۵ ساله آب آبی؛ در دوره‌ی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ و با حجمی معادل بر ۴۰۰ میلیون متر مکعب در سطح حوضه (حدود ۱۵ میلیمتر) می‌باشد. از دگرسوی، بیشترین مقادیر میانگین ۵ساله‌ی آب آبی؛ با حجمی برابر با ۷۰۰ میلیون متر مکعب (۲۶ میلیمتر) در دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ اتفاق افتاده است که با توجه به رابطه مستقیم بارش و منابع آب آبی، قابل پیش‌بینی می‌باشد. با توجه به تغییرات مکانی مؤلفه آبِ آبی (شکل ۳)، در بازه‌ی زمانی ۲۰ ساله، جز در مناطق غربی و شمالِ غربی حوضه، سایر مناطقِ حوضه با کمبود شدیدی مواجه بوده‌اند. بیشترین مقادیر آب آبی در بخش غربی حوضه (دشت چلگرد-قلعه شاهرخ) در طی دوره‌های ۵ ساله، مشاهده گردیده و به سمت بخش مرکزی و شرقی حوضه (پایین دست سد زاینده‌رود)، از مقدار آن کاسته شده است. تغییراتِ مؤلفه آب آبی از مقدار بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال در دشت

چلگرد-قلعه شاهرخ و بالادست سد زاینده‌رود، به کمتر از ۱۰ میلی‌متر در سال در پائین دست سد و بخش‌های شرقی حوضه بوده است. لازم به ذکر است که میزان بارندگی و همچنین برف‌گیری در طول سال، در مناطق غربی و شمالِ غربی بیشتر بوده، در نتیجه سهم قابل توجهی از مقادیر آب آبی حوضه را نیز به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴).

مقدارمؤلفه‌ی آبِ آبی در نیمه بالایی حوضه؛ یعنی بخش‌های شمال‌غربی حوضه زاینده‌رود (دشت‌های بوئین-داران و چهل‌خانه) بیشتر از ۵۰ میلی‌متر در سال بود. در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه؛ با توجه به وجود بخش کشاورزی و صنعت؛ از مصرف کننده‌های اصلی آب در طول مسیر رودخانه زاینده‌رود (اصلی‌ترین منبع آبِ آبی)، مقدار متوسط سالانه آب آبی به کمترین حد خود رسیده که خود از دلایل وقوع تنش آبی در پایین‌دست حوضه و عدم توانایی در تأمین نیازهای پایین‌دستِ حوضه بوده است. این مناطق از حوضه، عمدتاً دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی بوده و میزان بارندگی و برف‌گیری در طول سال نیز در این مناطق بسیار کم و سهم بسیار اندکی از بارش‌های آسمانی را دریافت کرده‌اند (شکل ۴).



شکل ۳. تغییرات مکانی مقادیر میانگین مؤلفه منابع آب آبی در منطقه مورد مطالعه در طول دوره‌های ۵ ساله در بازه زمانی؛ الف) ۱۹۹۹-۱۹۹۵، ب) ۲۰۰۴-۲۰۰۰، ج) ۲۰۰۹-۲۰۰۵، د) ۲۰۱۴-۲۰۱۰

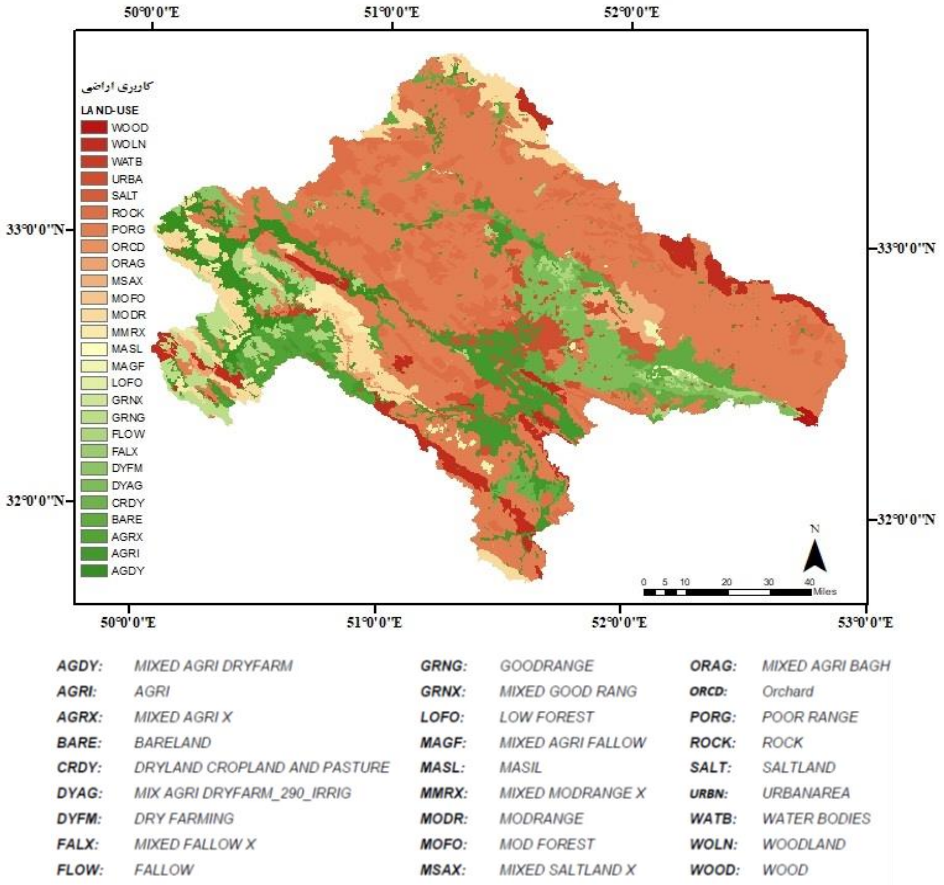


شکل ۴. تغییرات مکانی مقادیر میانگین بارش در منطقه مورد مطالعه در طول دوره‌های ۵ ساله در بازه زمانی؛ الف) ۱۹۹۹-۱۹۹۵، ب) ۲۰۰۴-۲۰۰۰، ج) ۲۰۰۹-۲۰۰۵، د) ۲۰۱۴-۲۰۱۰

در مقایسه با نواحی شرقی، اراضی کشاورزی آبی واقع در نزدیک سد زاینده‌رود، به‌واسطه مقادیر بالاتر مولفه آب آبی و برخورداری از ریزش‌های جوی نسبتا بالاتر، با کمبود آب کم‌تری روبرو بوده‌اند. ناحیه جنوبی حوزه آبخیز (دشت قمشه)، نیز به دلیل مقادیر بالاتر آب آبی (۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر) در دوره‌های ۵ ساله مورد بررسی، دارای شرایط نسبتا مناسب‌تری بودند (شکل ۳).

بررسی نقشه کاربری اراضی حوضه زاینده‌رود (شکل ۵)، نمایان‌گر آن است که دشت چلگرد-قلعه‌شاهرخ، بیشتر شامل اراضی مرتع خوب تا متوسط بوده که مراتع در واقع شامل زمین‌هایی با پوشش طبیعی از گیاهان مرتعی خودرو بوده که تجدید حیات آن‌ها به طور طبیعی انجام می‌پذیرد. سطح کمی از اراضی این منطقه به صورت کشاورزی دیم بوده که آبیاری آن‌ها، عمدتا از طریق نزولات آسمانی انجام می‌شود و نیازی به منابع آب آبی ندارند. البته در این منطقه کشت پاییزه و ترکیبی نیز تا حدودی رونق دارد که با توجه به منابع آب قابل دسترس، مشکل آبی در این منطقه ایجاد نمی‌کنند. در قسمت

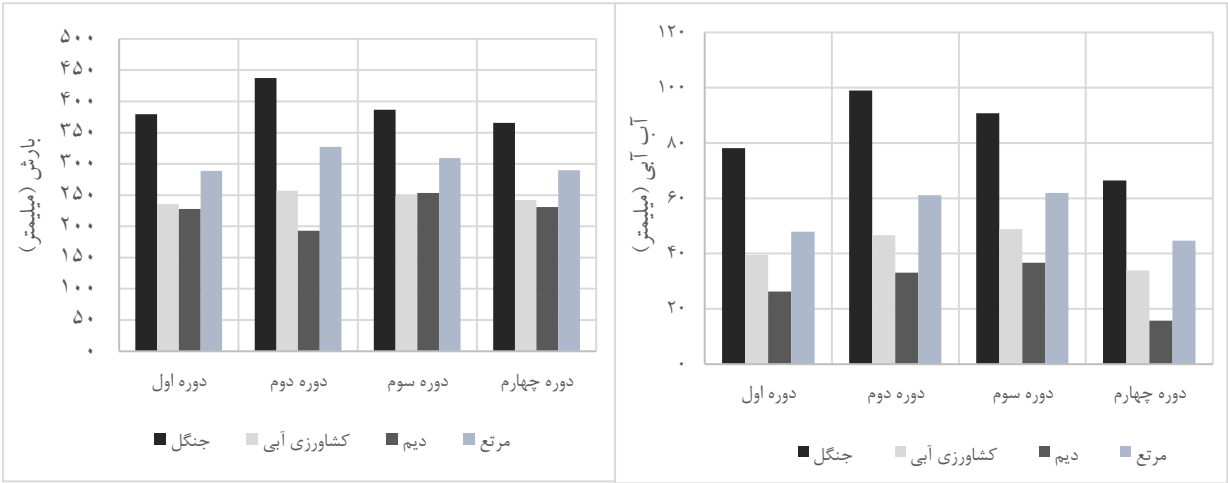
جنوبی حوضه زاینده‌رود، مشابه سایر نواحی پایین‌دست سد زاینده‌رود، بخش کشاورزی؛ از نوعِ کشت ترکیبی و باغات مهم‌ترین مصرف کننده آب می‌باشند، که البته سطح قابل توجهی از قسمت جنوبی حوضه، از اراضی مرتع متوسط پوشیده شده که از لحاظ منابع آب آبی نسبت به نواحی شرقی و مرکزی، در شرایط بهتری قرار دارند.



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی حوضه زاینده رود

شکل ۶، نمایان‌گر تغییرات مؤلفه‌ی آبِ آبی در چهار نوع کاربری اراضی مهم، در سطح حوضه در چهار دوره‌ی زمانی مورد مطالعه است. همان‌گونه که مشخص است، روند تغییرات مکانی آبِ آبی کاملاً متناسب با پراکنش مکانی بارش در سطح حوضه بوده به گونه‌ای که در دوره‌های مختلف زمانی و در چهار نوع کاربری اراضی؛ کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، مرتع و جنگل؛ این امر به خوبی قابل تشخیص است. در مناطق شرقی و مرکزی حوضه، که مراتع فقیر و زمین‌های بایر بخش عمده‌ای از مساحت آن را تشکیل داده‌اند، مقادیر بارش و مقادیر آبِ آبی بسیار محدود بوده لیکن به سبب مساحت زیادِ تحت پوششِ این نوع کاربری، مقادیر مؤلفه‌ی آبِ آبی، متناظر با کاربری مراتع، بیشتر از سایر کاربری‌های حوضه در شکل ۶، نشان داده شده است که چنانچه نتایج شکل ۶، نسبت به مساحت سنجیده می‌شد، مقادیر کمتری برای مؤلفه‌ی آبِ آبی، متناظر با کاربری مراتع در مناطق مرکزی و شرقی حوضه بدست می‌آمد. از دگرسوی، به سبب وجود منابع عمده‌ی آبِ آبی در مناطق بالادست

حوضه، سطح قابل توجهی از اراضی کشاورزی آبی، در این مناطق گسترده شده، که پراکنش این نوع کاربری با نیاز آبی بالا، کاملا منطبق بر پراکنشِ میزانِ بارش در این مناطق می‌باشد. کمترین مقادیر آبِ آبی در هر چهار نوع کاربری اراضی در دوره ۵ ساله‌ی چهارم (۲۰۱۴-۲۰۱۰)، اتفاق افتاده است (شکل ۶)، که این نتیجه در راستای نتایج مطالعه [۸] قرار گرفت. از طرفی، عمده فعالیت‌های کشاورزی در حوضه‌ی زاینده‌رود در مناطق مرکزی به سمت شرق گسترده شده، که با توجه به مقادیر کم بارش و کمبودِ منابع آبِ آبی در این قسمت‌ها، مناطق یاد شده به شدت تحت تأثیر عدم دسترسی به منابع آب قرار گرفته‌اند.



شکل ۶. تغییرات آبِ آبی و بارش در چهار نوع کاربری اراضی؛ جنگل، کشاورزی آبی، دیم و مرتع و در دوره های ۵ ساله

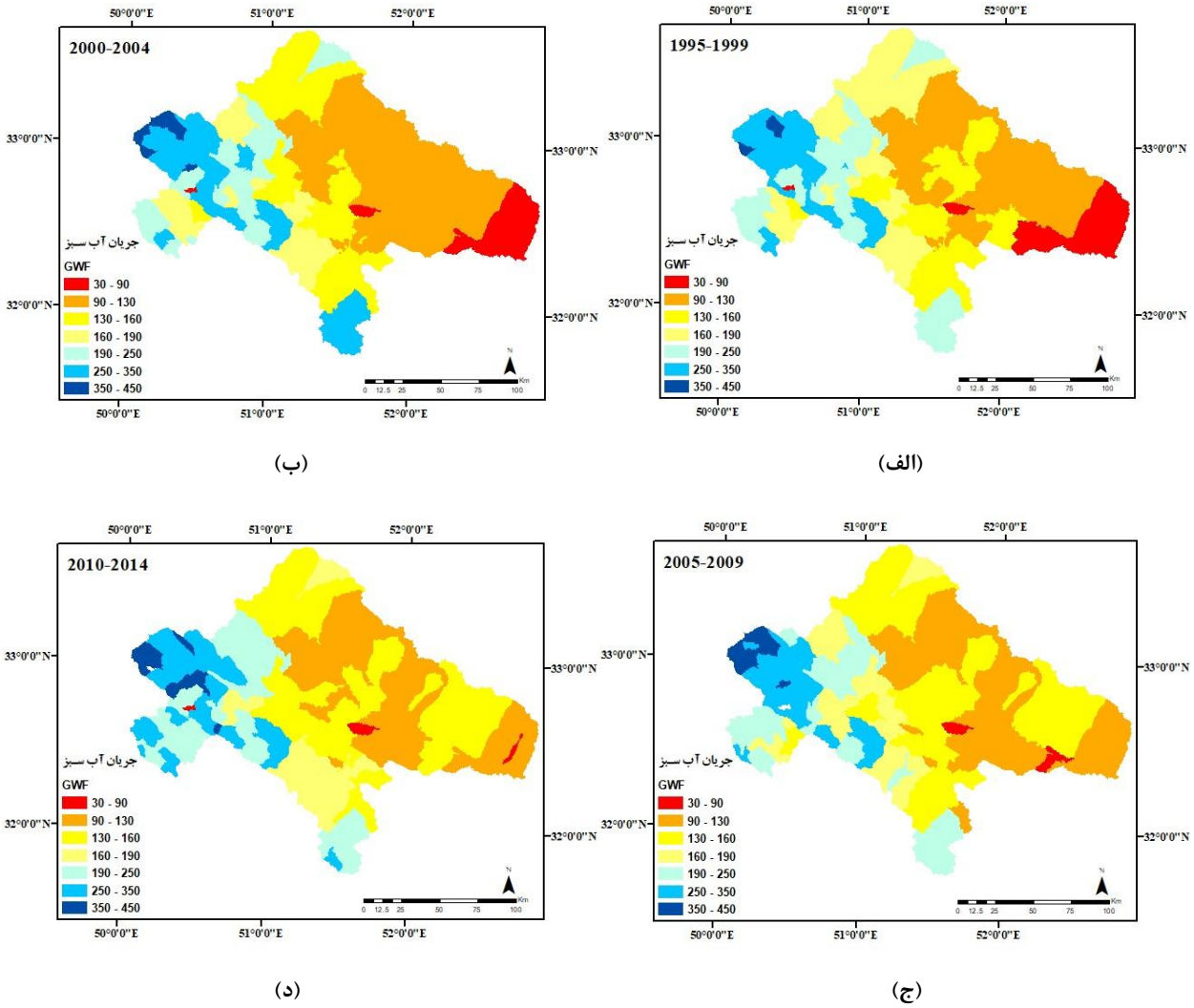
آبِ سبز

تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه جریانِ آب سبز در یک بازه ۲۰ ساله و برای دوره‌های ۵ ساله مورد مطالعه، درشکل ۷، قابل مشاهده است. در طی دوره دوم و دوره‌ی سوم در بازه‌ی ۲۰ ساله، به ترتیب؛ بیشترین مقادیر میانگین ۵ ساله جریان آب سبز در سطح کل حوضه با حجمی بالغ بر ۴۲۰۰ میلیون متر مکعب (۱۶۰ میلیمتر) و کمترین مقادیر با حجمی معادل ۷۰۰ میلیون متر مکعب (۲۶ میلیمتر) اتفاق افتاده است. یکی از دلایل افزایشِ جریانِ آبِ سبز در دوره سوم (۲۰۰۹-۲۰۰۵)، به سببِ افزایش قابل توجه کشاورزی در این دوره بوده، زیرا با افزایش اراضی کشاورزی، مقدار آبیاری افزایش یافته و در نتیجه‌ی آن، تبخیر و تعرق (جریان آبِ سبز) نیز افزایش می‌یابد.

بیشترین مقدار جریان آب سبز، در بخش‌های غربی (سرشاخه‌ها) و شمال غربی حوضه با مقادیری بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال رخ داده (شکل ۷)، که بیشینه آن، در شمال غرب حوضه و در حدود۴۵۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. دلیلِ میزان تبخیر و تعرق بالا در قسمت‌های غربی حوضه، می‌تواند به سبب وجود منابع آب آبی بالا، دریافتِ بارندگی سالانه بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر و آبیاری زیاد در این مناطق باشد. بدین‌ترتیب که، در بین بخش‌های غربی حوضه؛ دشت‌های بوئین، داران، چهل خانه و دامنه دارای بالاترین مقادیر جریان آب سبز بوده‌اند و دلیل آن، برداشت بیشتر از منابع آب زیرزمینی به منظور تأمین آب مصرفی کشاورزی (کشت پاییزه، کشت ترکیبی) در مقایسه با سایر دشت‌های همجوار بوده است و افزون بر علت یاد شده در این مناطق کشاورزی دیم نیز رونق دارد و مساحت قابل توجهی را به خود اختصاص داده که در افزایش میزان تبخیر و تعرق بی‌تأثیر نبوده

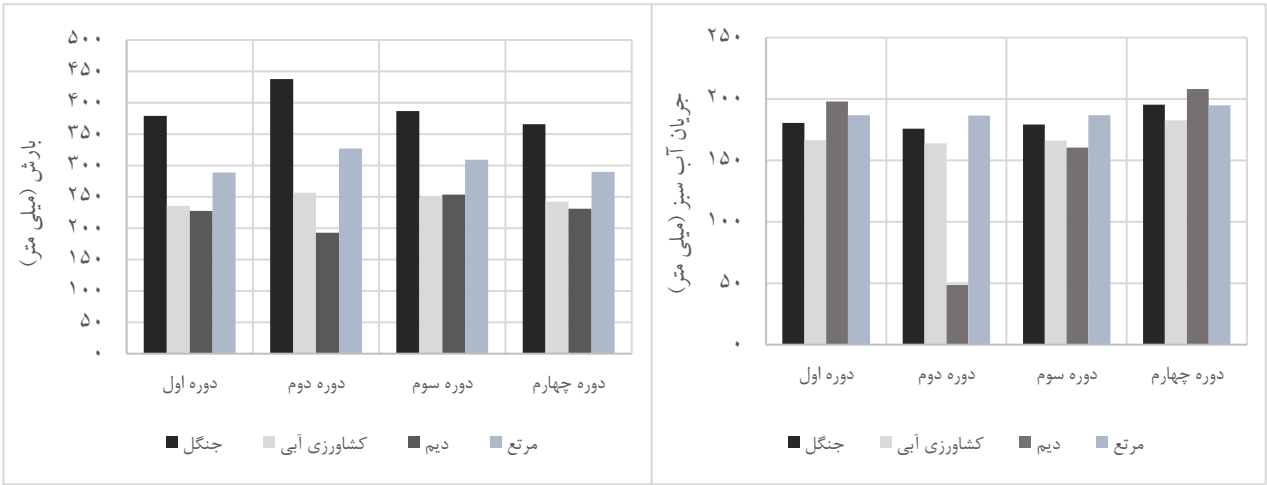
است. بنابراین، طبق نتایجِ بدست آمده، در زیرحوضه‌های غربی، شـــمالی‌ترین و جنوبی‌ترین بخش‌های حوزه آبخیز، بیشترین میزان جریان آب سبز مشاهده گردید.

در بیشتر بخش‌های نیمه شرقی حوضه، مقادیر جریان آب سبز کم‌تر از ۱۳۰ میلی‌متر در سال گزارش شده که یکی از علت‌های بارزِ آن، نوع پوشش به صورتِ مرتع فقیر بوده که سطح گسترده‌ای از منطقه را در برگرفته و افزون بر عدم وجود منابع آب کافی در پایین‌دســتِ حوضـــه، بر کاهش میزانِ تبخیر و تعرق در واحد ســـطح اثرگذار بوده اســـت. از دگرســـوی، بخش مرکزی حوضـــه دارای مقادیر جریان آب سبز نسبتاً کمتری، نسبت به نقاط شمالی بوده ولی نسبت به بخش شرقی حوضه، دارای مقادیر تبخیر و تعرق بیشتری بوده است. مهم‌ترین دلیل این موضوع آن است که، بخش‌های مرکزی حوضه با متوسط بارش ۱۵۰ میلی‌متر در سال (شکل ۳)، که عمدتاً کاربری کشاورزی آبی دارند در مقایسه با بخش‌های شرقی با متوسط بارش ۵۰ میلی‌متر در ســـال، که کاربری زراعی کم‌تر و آیش دارند، در فصل‌های مختلف سال (به ویژه فصل‌های خشک سال) نیز عملیات آبیاری داشته و بنابراین میزان تبخیر و تعرق، به تبع آن افزایش یافته است.



شکل ۷. تغییرات مکانی مقادیر میانگین مؤلفه منابع جریان آب سبز در منطقه مورد مطالعه در طول دوره‌های ۵ ساله؛ الف) ۱۹۹۹-۱۹۹۵، ب) ۲۰۰۴-۲۰۰۰، ج) ۲۰۰۹-۲۰۰۵، د) ۲۰۱۴-۲۰۱۰

در شـــکل ۸، تغییرات جریانِ آبِ ســـبز در چهار نوع کاربری اراضی مهم در سطح حوضه نشان داده شده است. با توجه به نحوه تغییرات زمانی مؤلفه جریان آبِ ســـبز در مقابل تغییرات زمانی بارش در شـــکل ۸، تغییرات بارش تأثیر چندانی در تغییرات مؤلفه جریانِ آبِ ســـبز در طی دوره‌های مورد بررســـی نداشـــته اســـت. به عنوان مثال، بیشـــترین مقدار جریان آبِ ســـبز در هر چهار نوع کاربری در دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۰ اتفـاق افتـاده، در صـــورتی کـه، بیشـترین مقدار بارش در طی سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۰ رخ داده اســـت. این یافته هم‌راســـتا با نتایج مطالعه [۸]، نشـان‌دهنده‌ی آن اسـت که در حوضـه زاینده‌رود، جریانِ آبِ سبز بیشتر از بارش، متأثر از نوع کاربری اراضی است. در مناطق مرکزی حوضه، برخلاف مناطق شرقی، مؤلفه‌ی جریان آبِ سبز بیشتر بوده در حالی که در هر دو منطقه‌ی نام برده، مقادیر بارش ناچیز ثبت گردیده اســـت. بنابراین به نظر می رسد که علت اصلی این مسئله، وجود اراضی کشاورزی زیاد در این مناطق باشد. با در نظر گرفتن تأثیر مساحت در مقادیر مؤلفه‌های منابع آبی؛ اراضی کشاورزی آبی، اراضی کشاورزی دیمی، جنگل‌ها که در مناطق غربی حوضه گسترده شده‌اند و مراتع (خوب، متوسط، فقیر) به ترتیب بیشترین مقدار جریانِ آبِ سبز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۸).

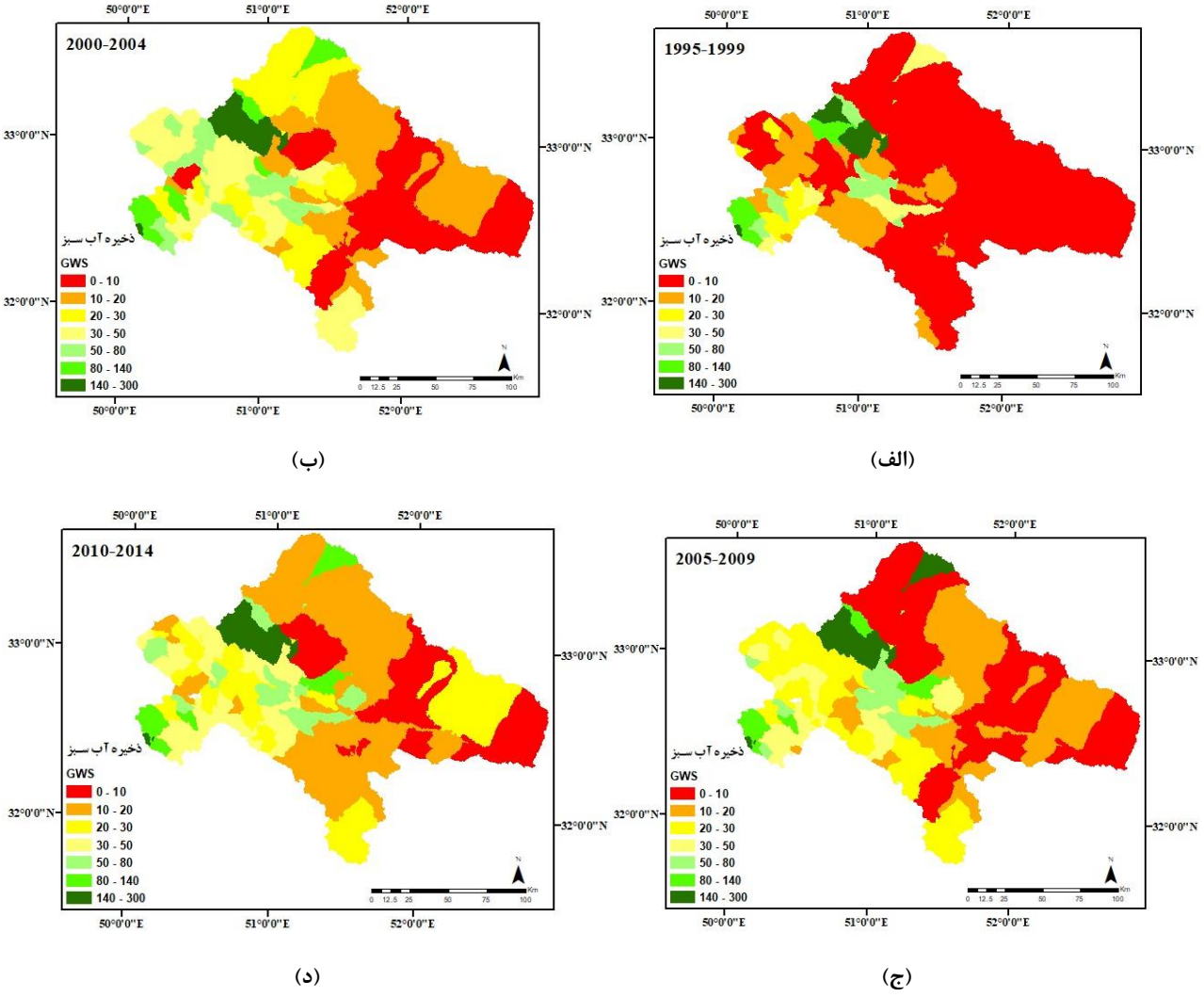


شکل ۸. تغییرات جریان آب سبز و بارش در چهار نوع کاربری اراضی؛ جنگل، کشاورزی آبی، دیم و مرتع و در دوره های ۵ ساله

با توجه به نقشـــه‌های پراکندگی مکانی در شـــکل ۹، کمترین و بیشـــترین مقادیر میانگین ۵ ســـاله ذخیره آب سبز برای کل حوضه زاینده‌رود به ترتیب؛ طی دوره اول با حجمی بالغ بر ۸۵۰ میلیون متر مکعب (۳۰ میلیمتر) و دوره دوم، با حجمی برابر با ۱۵۰۰ میلیون متر مکعب (۶۰ میلیمتر) اتفاق افتاده اســـت. به طور میانگین مؤلفه ذخیره آبِ ســـبز در بخش غربی حوضـــه دارای مقادیری بیش از ۱۴۰ میلی‌متر در ســـال بوده که در بخش‌های مختلفی از این ناحیه به مقادیر بیشـــتر از ۵۰ میلی‌متر در سال نیز رسیده است. کاربری اراضی مخلوط؛ کشاورزی آبی، جنگل و مراتع متراکم و نیز قابلیت بالاتر نگهداشـــت آب در خاک این نواحی، مهم‌ترین دلایل بالا بودن مقادیر ذخیره آب در خاک می‌باشـــد. اما در قســـمت‌های مرکزی حوضه، میزان ذخیره آب سبز کمتر از سایر نواحی حوضه می‌باشـــد (کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر) که تفاوت نوع خاک و کاربری می‌تواند از مهم‌ترین دلایل آن باشد، از دگرسوی، کاربری مسکونی در مناطق مرکزی حوضه مساحت زیادی را اشـغال کرده که با تبدیل شـدن سـطح این مناطق به سـطوح غیر قابل نفوذ، سـبب کاهش نگه‌داشـت رطوبت خاک گردیده است.

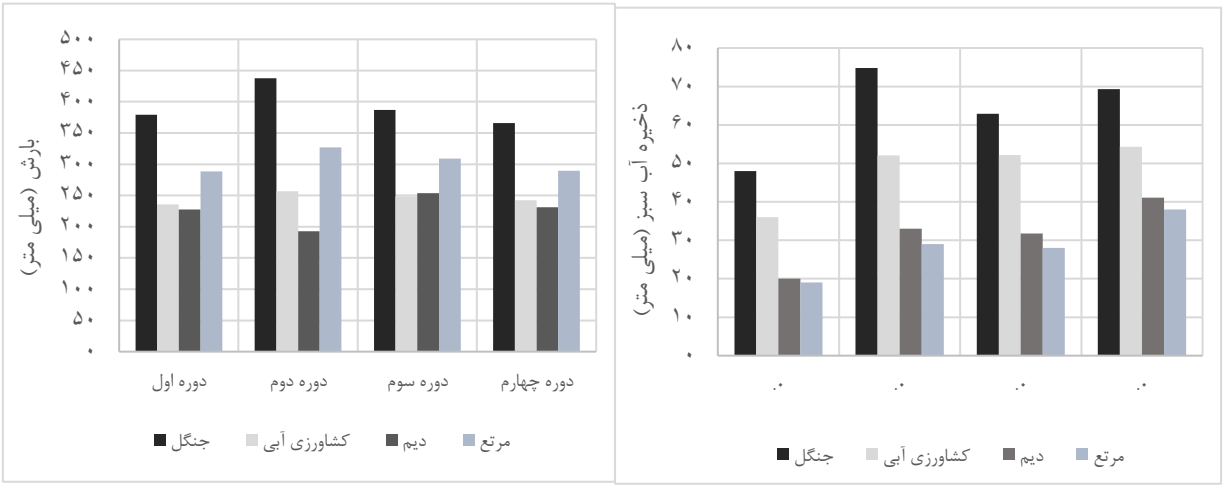
در زیرحوضه‌های شرقی حوضه و در بیشتر بخش‌های زیرحوضه‌های شمالی، مقادیر این مؤلفه کمتر از ۳۰ میلی‌متر در سال برآورد شد. لازم به ذکر است که در این بخش از حوضه، میزان دریافت ریزش‌های آسمانی پایین‌تر از سایر نقاط بوده است. افزون براین، وجود زمین‌های زراعی دیم و تمرکز بالای جوامع شهری و همچنین وجود خاک کم عمق با پوشش گیاهی ضعیف (مراتع فقیر)، سبب شده که زیرحوضه‌های این نواحی مقدار ذخیره آب سبز کمتری نسبت به سایر زیرحوضه‌ها داشته باشند.

بیشترین مقادیر میانگین سالانه بارش در دوره دوم در حدود ۲۲۰میلی‌متر و کمترین مقادیر میانگین سالانه بارش در حدود ۱۹۰ میلی‌متر مربوط به دوره اول بوده (شکل ۴ مشاهده شود)، که این نتایج در راستای نتایج مقادیر بیشینه و کمینه ذخیره آب سبز در دوره‌های مشابه می‌باشند.



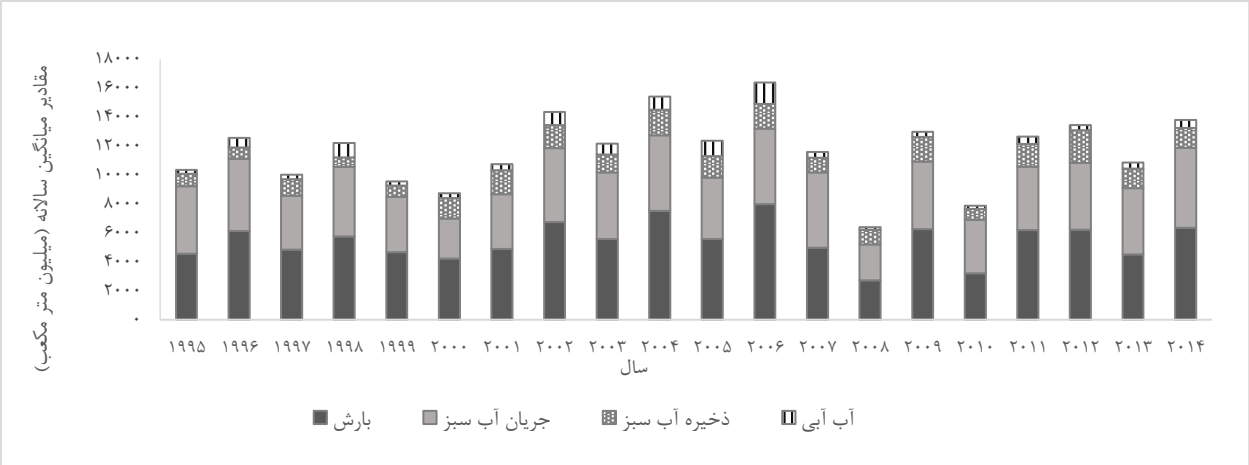
شکل ۹. تغییرات مکانی مقادیر میانگین مؤلفه منابع ذخیره آب سبز در منطقه مورد مطالعه در طول دوره‌های ۵ ساله در بازه زمانی؛ الف) ۱۹۹۹-۱۹۹۵، ب) ۲۰۰۴-۲۰۰۰، ج) ۲۰۰۹-۲۰۰۵، د) ۲۰۱۴-۲۰۱۰

با توجه به شکل ۱۰، کمترین مقادیر ذخیره آبِ سبز به ترتیب در مراتع، اراضی کشاورزی دیم، اراضی کشاورزی آبی و جنگل‌ها رخ داده است. مقادیر کم بارش و پوششِ قابل توجه مراتع در مناطق شرقی، در مقادیر کمِ ذخیره آبِ سبز، در این مناطق تأثیرگذار بوده است. در اراضی کشاورزی دیم بعد از مراتع، کمترین مقدار ذخیره آبِ سبز گزارش شده، که این مسئله با واقعیت هم‌خوانی داشته، زیرا که منبع اصلی تأمینِ آب کشاورزی دیم، رطوبت موجود در خاک است. از دگرسوی، با توجه به مقادیر بالای دریافت نزولات آسمانی و سطوح گسترده جنگل‌ها و اراضی کشاورزی آبی در مناطق غربی، مقادیر قابل توجهی از مؤلفه ذخیره آبِ سبز در این مناطق به ثبت رسیده است.

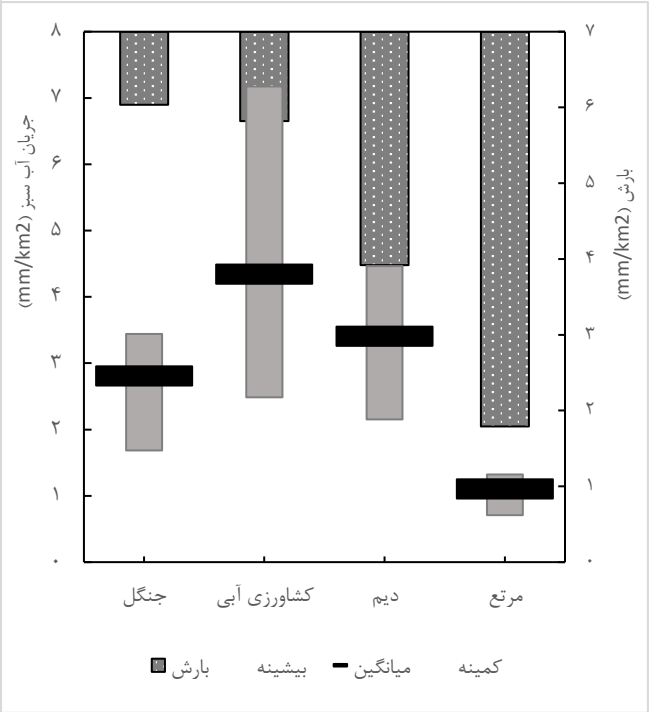


شکل ۱۰. تغییرات ذخیره آب سبز و بارش در چهار نوع کاربری اراضی؛ جنگل، کشاورزی آبی ، دیم و مرتع و در دوره های ۵ ساله

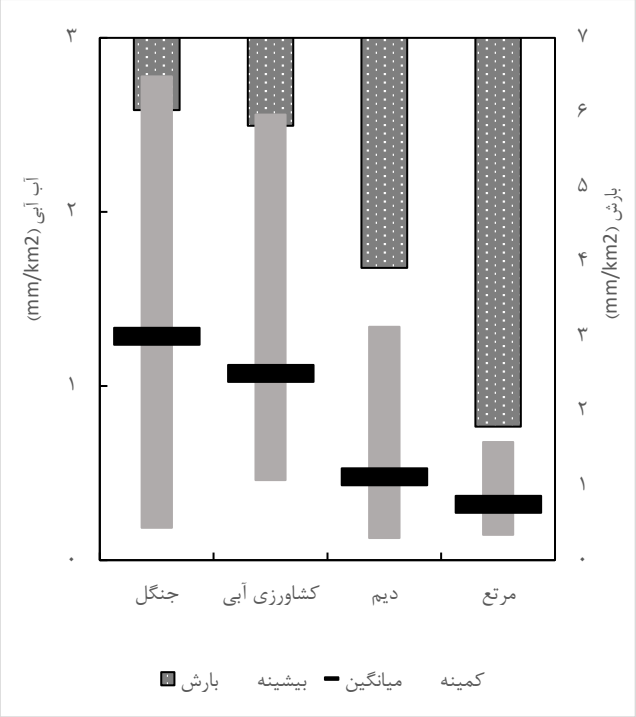
در ادامه مطالعات این پژوهش، مقایسه‌ای میان مقادیر میانگینِ مؤلفه‌های منابع آبی شامل آبِ آبی و جریان آبِ سبز و ذخیره‌ی آبِ سبز در مقیاس سالانه، برای کل دوره ۲۰ ساله در سطح حوضه و به تفکیک کاربری اراضی انجام گردید که نتایج آن در شکل ۱۱ و ۱۲، قابل مشاهده می‌باشد.



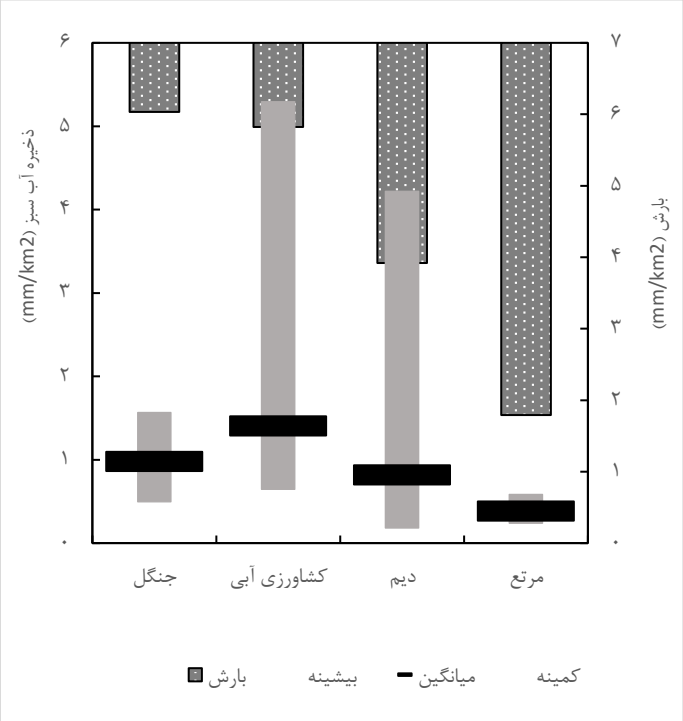
شکل ۱۱. مقایسه میانگین سالانه مؤلفه‌های آبِ آبی، جریانِ آبِ سبز، ذخیره آبِ سبز و بارش در دوره ۲۰ ساله



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲. تغییرات مؤلفه های منابع آب به تفکیک کاربری اراضی؛ الف) آب آبی، ب) جریان آب سبز، ج) ذخیره آب سبز

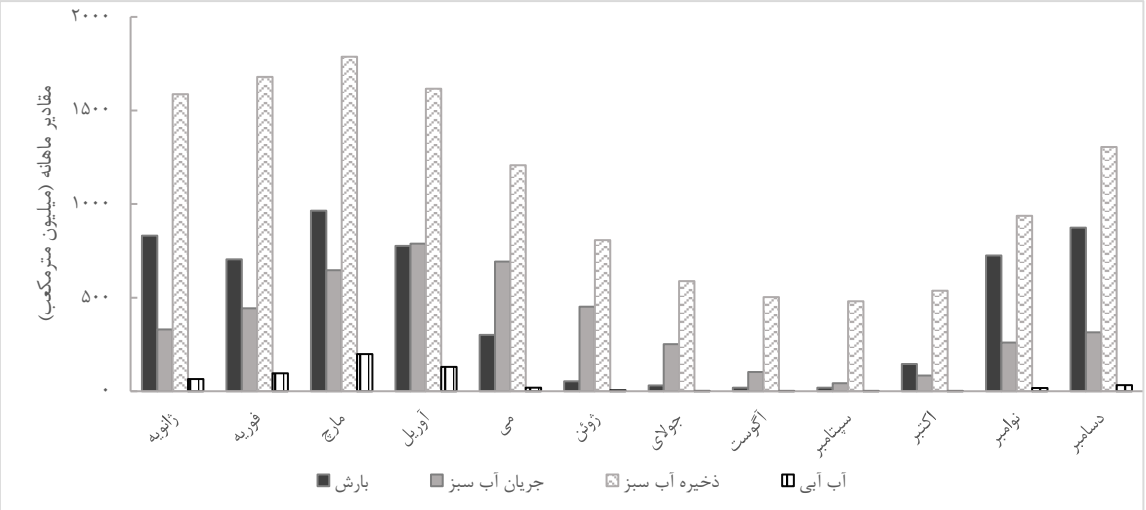
بیشینه مقادیر بارندگی، آبِ آبی، جریان آبِ سبز و ذخیره آبِ سبز به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۶، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۲ اتفاق افتاده است. کمینه مقادیر بارندگی، آبِ آبی، جریان آبِ سبز و ذخیره آبِ سبز به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۸، ۲۰۰۸ و ۱۹۹۸ بوده است.

بررسی تغییرات مؤلفه های منابع آب به تفکیک کاربری‌های اراضی در دوره زمانی ۲۰ ساله نیز نمایان‌گر آن بود که بیشینه تغییرات آب آبی (شکل ۱۲.الف) در این بازه زمانی، به ترتیب در کاربری اراضی جنگل، کشاورزی آبی ، دیم و مرتع اتفاق افتاده است. تغییرات مؤلفه‌ی آب آبی در راستای تغییرات میزان بارش بوده که در هر چهار نوع کاربری اراضی مورد بررسی نیز قابل رؤیت می باشد. از دگرسوی، این یافته با نتایج بدست آمده از تغییرات مکانی آب آبی در سطح حوضه (شکل ۳) نیز همخوانی داشته چراکه کاربری‌های جنگل و کشاورزی (آبی و باغات) در مناطق شمال و شمال غربی و قسمت‌های از نواحی پایین‌دست سد زاینده‌رود که سهم خوبی از ریزش‌های آسمانی دریافت می‌کنند، گسترده شده‌اند. گسترش عمده پوشش کاربری مرتع نیز در مناطق شرقی و تا حدودی مرکزی حوضه بوده، که مقادیر بارش بسیار کم و به تبع آن آب آبی، در آن به ثبت رسیده است. تغییرات این مؤلفه در اراضی کشاورزی آبی و جنگلی، می تواند به‌سبب تغییرات بارش و به تبع آن، آب آبی در مناطق شمال و شمال غربی حوضه باشد. با کاهش میزان دسترسی به منابع آب و مقادیر بارش به ترتیب در مناطق جنوبی (اراضی دیم)، مناطق شرقی و مرکزی (مرتع)، میزان تغییرات آب آبی نیز کاهش یافته است.

بیشترین تغییرات جریان آب سبز در دوره مورد مطالعه (شکل ۱۲.ب) نیز، در کاربری‌های کشاورزی آبی و دیم بود. یکی از دلایل این امر می تواند آبیاری در اراضی کشاورزی آبی باشد چراکه آبیاری ممکن است سبب افزایش میزان تبخیر و تعرق و بنابراین افزایش جریان آب سبز گردد. آبیاری در حوضه زاینده‌رود عمدتاً به روش غرقابی بوده که خود نقش بسزایی در افزایش میزان تبخیر و تعرق و بنابراین جریان آب سبز در حوضه دارد. مدیریت زمین و شخم و شیار نیز می‌تواند سبب افزایش مقادیر تبخیر و تعرق و لذا افزایش جریان سبز شود. از دگرسوی، کم‌ترین میزان جریان آب سبز در اراضی مرتعی مشاهده شد که با توجه به سطح پوشش کم تا بسیار کم و غیر متراکم در این کاربری، ثبت این مقادیر قابل انتظار است.

همچنین ذخیره آب سبز (شکل ۱۲.ج) در اراضی مرتعی نسبت به سایر کاربری‌های مورد مطالعه کمتر بود که با توجه به عمق کم خاک، تاج پوشش کم در کاربری مرتع و همچنین مقادیر بارش کمتر در مناطق مرکزی و شرقی حوزه آبخیز زاینده‌رود که پوشش‌های مرتعی توسعه بیشتری دارند، منطقی به نظر می‌رسد. بیشینه مقدار جریان آب سبز در کاربری اراضی کشاورزی آبی مشاهده شد که می‌تواند به سبب آبیاری زمین و بنابراین افزایش ذخیره آب خاک در این کاربری باشد.

بررسی تغییرات میانگین ماهانه‌ی مقادیر مؤلفه‌های منابع آبی برای دوره ۲۰ ساله نشان داد که بیشترین ریزش‌های آسمانی در زمستان و ابتدای بهار در حوضه زاینده‌رود رخ داده که متناسب با آن آبِ آبی، ذخیره‌ی آب سبز نیز افزایش یافته‌اند و به تدریج با نزدیک شدن به تابستان، تنش آبی شدیدی در منابع آبِ آبی مشاهده شده است. در ماه‌های تابستان با وجود کاهش شدید بارش و منابع آب آبی اما به دلیل وجود آبیاری اراضی کشاورزی آبی همچنان می‌توان مقادیر قابل توجهی جریان آبِ سبز مشاهده کرد که در میان ماه‌های تابستان، کمترین مقادیر آبِ آبی و جریان آبِ سبز در ماه شهریور اتفاق افتاده است. به عنوان مثال در راستای نتایج شکل ۱۳؛ می‌توان به مقادیرِ قابل توجه ذخیره رطوبتی خاک در نواحی غربی حوضه نسبت به سایر مناطق اشاره داشت که با توجه به روند تغییرات ماهانه‌ی میزان ذخیره رطوبتی خاک (شکل ۱۳)، بهترین زمان برای کشت پاییزه و کشت دیم در اوایل ماه مهر است که تا حداقل ۶ ماه بعد ذخایر رطوبتی خاک در سطح قابل قبولی باقی خواهد ماند.



شکل ۱۳. مقایسه میانگین ماهانه مؤلفه‌های آبِ آبی، جریانِ آبِ سبز، ذخیره آبِ سبز و بارش در دوره ۲۰ ساله

۴. نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش، نمایان‌گر تغییراتِ مؤلفه‌های منابع آب (آب آبی، آبِ سبز) از نظر زمانی و مکانی در چهار نوع پوشش کاربری اراضی مهم در حوضه‌ی مورد مطالعه بود. به گونه‌ای که مطابق با بررسی‌های انجام شده در دوره‌ی ۲۰ ساله مورد مطالعه در حوضه زاینده‌رود، بیشترین مقادیر مؤلفه‌ی منابع آب آبی، جریانِ آبِ سبز و ذخیره آبِ سبز در بخش‌هایی ازحوضه مشاهده گردیده که افزون بر دریافت سهم بیشتر بارش؛ که تأثیر مستقیم بر مقدار مؤلفه‌ی آب آبی، میزان تبخیر و تعرق (جریان آبِ سبز) و ذخیره رطوبتی خاک (ذخیره آبِ سبز) داشته، وجود اراضی کشاورزی آبی، دیم و جنگل‌های متراکم و مرتع در تغییرات جریانِ آب سبز و ذخیره آبِ سبز بسیار تأثیرگذار بوده است. به عنوان مثال می‌توان به بخش‌های غربی حوضه اشاره داشت، که با توجه به دسترسی به منابع کافی آبِ آبی، اراضی کشاورزی گسترش یافته‌اند که با مدیریت صحیح پوشش زمین در این مناطق، می‌توان به کاهش هدررفت آب به میزان قابل توجهی کمک کرد. از دگرسوی، در بخش‌هایی از حوضه که سهم کمتری از بارندگی داشته و پوشش کاربری آن‌ها، به صورت مراتع فقیر و یا زمین‌های آیش بوده، مقادیر منابع آبِ آبی، جریان آبِ سبز، کم برآورد گردیده، که افزون بر آن در مناطقی که مراتع فقیر با عمق خاک کم وجود داشته، مقادیرِ ذخیره رطوبتی خاک نیز به همان نسبت کاهش یافته است که نمونه‌ی این اتفاق در بخش‌های مرکزی به سمت شرقی روی داده است. در برخی از مناطق حوضه، برخلاف کمبود منابع آبِ آبی و ذخیره رطوبتی خاک، فعالیت‌های انسانی از قبیل کشاورزی و صنعت رونق زیادی داشته است. در این مناطق گسترش کاربری مسکونی با کاهش سطوح نفوذپذیری، برکاهش نگه‌داشت رطوبت خاک (ذخیره آبِ سبز)، مؤثر واقع شده است.

نتایج مطالعات حوضه، به خوبی نشان‌دهنده تغییرات مؤلفه‌های منابع آبی حوضه در انواع پوشش‌های کاربری اراضی منطقه و در دوره‌های ۵ ساله بوده است که در راستای ادامه پژوهش انجام شده، می‌توان نتایج تغییرات مؤلفه‌های منابع آبی را در دوره‌های خشکسالی و ترسالی در سطح حوضه زاینده‌رود را نیز مورد تحلیل و بررسی قرار داد. بنابراین با شناخت کامل منابع آب موجود و پتانسیل‌های آبی منطقه و شناسایی نقاط بحرانی و نقاط

مســـتعـد منطقـه، امکـان مـدیریـت جـامع منـابع آب و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت میسر می‌گردد.

References

[1] Ababaei, B. and Sohrabi, T. (2009). Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud watershed. Water and Soil Conservation, 16(3), 41.

[2] Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. and Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. Water Resources Research, 45, W10434.

[3] Aghakhani, A.A., Hassanzadeh, Y., Pourreza-Bilondi, M. and Ahmadi, A. (2017). Analyzing long-term spatial variability of blue and green water footprints in a semi-arid mountainous basin with MIROC-ESM model (case study: Kashafrood River Basin, Iran). Theoretical and Applied Climatology, 134, 885–899.

[4] Akhavan, S., Abedi Koupai, J., Mousavi, S. F.., Abbaspour, K.., Afuni, M. and Eslamian, S. S. (2010). Blue water and green water prediction in Hamedan-Bahar catchment using the SWAT model. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 53(14), 8-23. (In Farsi).

[5] Amini, M,A., Torkan, G., , Eslamian, S.S., Zareian, M.J., , Besalatpour, A.A. (2019). Assessment of SWAT Hydrological Model in Catchments' Water Balance Simulation Located in Semi-Arid Regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin). Journal of water and soil, 32(5), 849 – 863.

[6] Badou, D. F., Diekkeruger, B., Kapangaziwiri, E., Mbaye, M.L., Yira, Y., Lawin, A.E., Oyerinde, G.T. and A. Afouda. (2018). Modelling blue and green water availability under climate change in the Beninese Basin of the Niger River Basin, West Africa. Hydrological Processes, 32(16), 2526-2542.

[7] Besalatpour, A. A. and Hassanzadeh, N. (2016). Theory & Tutorial of SWAT. Vali-Asr University, Rafsanjan. (In Farsi).

[8] Besalatpour, A. A., Heidarpour, G. H., Kazemi, A. and Aghakhani, A. H. (2019). Hydrological modeling of spatial and temporal changes of blue and green water resources in the Zayandeh Rud river basin. Standing up to Climate Change: Creating Prospects for a Future in Rural Iran, Springer, Cham, 141-173.

[9] Cheng, G. and L. Zhao. (2006). Green water and its research progresses. Advances in Earth Science 21(3), 221–227.

[10] Falkenmark, M. (1995). Land-Water Linkages: A Synopsis: Land and Water Integration and River Basin Management: Land and Water Bulletin, FAO: Rome, Italy.

[11] Falkenmark, M. (1997). Meeting water requirements of an expanding world population. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Biological Science, 352(1356), 929-936.

[12] Falkenmark, M. and Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management, 132(3), 129-132.

[13] Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological. Processes, 23(3), 486-501.

[14] Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Farzaneh, M. R., Zehnder, A. J. B. and Srinivasan, R.. (2013). Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. Journal of Hydrology, 480, 85–101.

[15] Faramarzi, M., and Besalatpour. A.A. (2015). HYDROLOGICAL MODELLING OF ZAYANDEH RUD RIVER BASIN USING SWAT MODEL. IWRM project. Funded by German Ministry of Education and Research (2010-2018).

[16] Farsani, I. F., Farzaneh, M. R., Besalatpour, A. A., Salehi, M. H. and Faramarzi, M. (2018). Assessment of the impact of climate change on spatiotemporal variability of blue and green water resources under CMIP3 and CMIP5 models in a highly mountainous watershed. Theoretical and Applied Climatology, 136, 169–184.

[17] 17.Gassman, P.W., Reyes, M., Green, C. H., and Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future directions, T. ASABE, 50, 1211–1250.

[18] Golmohammadi, M. H. (2010). Application of adaptive Neuro-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) for hydrological multivariate time series modeling. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.

[19] Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Alirahmani, S. and Keddar, A. (2018). Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). Water Science, 32(1), 79–88.

[20] Hargreaves, G., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1: 96–99.

[21] Hosseinzadeh, N., Hajabbasi, M. A. and Besalatpour, A. A. (2018). Hydrological modeling of spatial and temporal changes of blue and green water resources in Javanmardi watershed using SWAT model. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 8(2), 163-176. (In Farsi).

[22] Jabary, A., Hosseini, M. and Khosrojerdi, A. (2012). Sensitivity analysis of runoff parameters in Sanjabi Watershed by SWAT. *In*: 3rd National Conference on Comprehensive Water Resources Management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Mazandaran Province, Iran. (In Farsi)

[23] Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A. and Abbaspour, K. C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Hydrological Sciences journal, 53(5), 977-988.

[24] Nash, J.E and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282–290.

[25] Nikoudel, M., Faramarzi, M., Koupaei, S.S. (2011). Simulation of hydrological effects of water resources management in Zayandehrud basin using SWAT model, Fifth National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management, kerman, Iran.

[26] Nikoudel, M, Ghahnavieh, S.,Soltani, A.R., Koupaei, S.S. (2011). Investigation of the performance of the SWAT model in flow upstream simulation of the Zayandeh River. The Second National Conference on Combating Desertification and Sustainable Development of Iran Desert Wetlands, Arak, Iran.

[27] Pandey, B. K., Khare, D., Kawasaki, A. and Mishra, P. K. (2018). Climate Change Impact Assessment on Blue and Green Water by Coupling of Representative CMIP5 Climate Models with Physical Based Hydrological Model. Water Resources Management 33(1), 141-158.

[28] Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Srinivasan, R. and Zehnder, A. J. (2008). Modeling blue and green water availability in Africa. Water Resources Research, 44, W07406.

[29] Tripathi, M. P., Panda, R. K. and Raghuwanshi, N. S. . (2005). Development of effective management plan for critical sub watersheds using SWAT model. Hydrological Processes, 19(3), 809–826.

[30] Veettil, A.V. and Mishra, A. K. (2018). Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using blue and green water scarcity, Falkenmark index, and freshwater provision indicator. Journal of Environmental Management, 228, 346–362.

[31] Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J. (2010). ArcSWAT Interface for SWAT 2009, User's Guide. Blackland Research Center, Texas, USA.

[32] Zang, C., Liu, J., Velde, M. and Kraxner, F.. (2012). Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows under natural conditions in inland river basins in Northwest China. Hydrology and Earth System Sciences, 16, 2859-2870.

[33] Zang, C. and Mao, G. (2019). A Spatial and Temporal Study of the Green and Blue Water Flow Distribution in Typical Ecosystems and its Ecosystem Services Function in an Arid Basin. Water, 11(1), 97.

[34] Zhu, K., Xie, Z., Zhao, Y., Lu, F., Song, X., Li, L. and Song, X. (2018). The Assessment of Green Water Based on the SWAT Model: A Case Study in the Hai River Basin, China. Water, 10(6), 798.

[35] Zhe Yuan, Z., Xu, J. and Wang, Y. (2019). Historical and future changes of blue water and green water resources in the Yangtze River source region, China. Theoretical and Applied Climatology, 138 (1-2), 1035-1047.