



## Water Resources Allocation Management in Hablehroud Basin Using a Combination of the SWAT and WEAP Models

J. Salehpour Laghani<sup>1</sup>, A. Ashrafzadeh<sup>2\*</sup>  
and S.A. Moussavi<sup>3</sup>

### Abstract

In this study, a combination of SWAT and WEAP models were utilized for planning and integrated water resources allocation management in Hablehroud Basin. The SWAT model was calibrated and validated using the monthly discharge at the basin outlet in the period of 1998-2012. In validation phase, the coefficient of determination, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, root mean square error, and model efficiency were calculated as 0.80, 0.71, 1.81 and 0.89, respectively. These values suggested that the model performance can be classified as "good". To simulate the supply and demand in the basin and to assess different management scenarios, the estimated flows produced by SWAT for each subbasin were considered as the input for the WEAP model and the percentage of met demand in the present situation (reference scenario) for each demand node was obtained. The results showed that the agricultural lands of Firoozkouh and Garmsar irrigation and drainage network are facing a shortage of water, especially in the warm months of the year. Therefore, scenarios such as changing cropping pattern, reducing crop area, reducing water per capita in urban and rural demand nodes, increasing irrigation efficiency, and combined scenarios were considered to balance the supply and demand of water. The results showed that water consumption reduction and striking a balance between the supply and demand in the basin can be better achieved if simultaneous use of different water management strategies (increasing irrigation efficiency, per capita reduction, and crop pattern change) are to be considered in the basin.

**Keywords:** Hydrologic Modeling, Sensitivity Analysis, Integrated Management, Water Allocation.

Received: November 14, 2017

Accepted: April 21, 2018

## مدیریت تخصیص منابع آب در حوضه آبریز حبله‌رود با ترکیب مدل‌های SWAT و WEAP

جابر صالح‌پور لاقانی<sup>۱</sup>، افشین اشرف‌زاده<sup>۲\*</sup>  
و سیدعلی موسوی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه از ترکیب دو مدل SWAT و WEAP به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه تخصیص منابع آب در حوضه آبریز حبله‌رود استفاده شده است. مدل SWAT در دوره آماری ۱۹۹۸-۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های آبدهی ماهانه در خروجی حوضه، واسنجی و اعتبارسنجی شد. مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و کارایی مدل (ME) در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۷۱، ۱/۸۱ و ۰/۸۹ به دست آمدند. با توجه به این مقادیر، عملکرد مدل SWAT را می‌توان در طبقه‌بندی "خوب" قرار داد. سپس برای شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه و ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی، آبدهی برآوردشده با استفاده از مدل SWAT برای هر یک از زیرحوضه‌ها، وارد مدل WEAP شد و درصد تأمین نیاز برای هر یک از گره‌ها در شرایط موجود (سناریوی مرجع) حاصل شد. نتایج نشان داد اراضی کشاورزی محدوده فیروزکوه و اراضی شبکه آبیاری و زهکشی گرمسار با بحران کمبود آب به‌ویژه در ماه‌های گرم سال مواجه هستند. بنابراین سناریوهایی مانند تغییر الگوی کشت، کاهش سطح زیر کشت، کاهش سرانه مصرف آب در گره‌های نیاز شهری و روستایی، افزایش راندمان آبیاری و سناریوهای ترکیبی، برای به تعادل رساندن عرضه و تقاضای آب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری هم‌زمان راهبردهای مختلف مدیریت مصرف آب (افزایش راندمان آبیاری، کاهش سرانه مصرف و تغییر الگوی کشت)، بهتر از حالت استفاده منفرد از هر کدام از سناریوها می‌توان برداشت آب از منابع مختلف را کاهش داد و به تعادل در عرضه و تقاضای آب در حوضه دست یافت.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی هیدرولوژیک، تحلیل حساسیت، مدیریت یکپارچه، تخصیص آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۸/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۲/۱

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: ashrafzadeh@guilan.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکان‌پذیر است.

## ۱- مقدمه

مدل WEAP یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری است که امکان تحلیل مدیریت‌های مختلف در تخصیص منابع آب را به‌ویژه زمانی که مصرف‌کنندگان آب در رقابت با یکدیگر عمل می‌کنند فراهم می‌سازد. این مدل از آن جهت که بخش‌های مختلف منابع و مصارف در حوضه را گرد هم می‌آورد، ابزاری مناسب برای مدیریت و برنامه‌ریزی جامع منابع آب است (Yates et al., 2005). ساختار مدیریتی در WEAP با استفاده از سناریوهایی که نشان‌دهنده وضعیت آینده آب در منطقه هستند تعریف می‌شود. مطالعات متعددی با استفاده از WEAP در سراسر جهان انجام شده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

(Mehta et al. (2013) به کمک مدل WEAP، سه سناریو شامل ایجاد تغییر در الگوی کشت با توجه به فاکتورهای اقتصادی، ایجاد تغییر در الگوی کشت به‌منظور مصرف کمتر آب و تلفیقی از تغییر در سیستم آبیاری و تغییر الگوی کشت را در حوضه‌ای در کالیفرنیا، به‌منظور ارائه راه‌کاری برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم با یکدیگر مقایسه کردند. (Adgolign et al. (2016) در مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر توسعه منابع آب بر ذخایر آب و همچنین شناسایی زیرحوضه‌های آسیب‌پذیر نسبت به کمبود آب در حوضه‌ای در ایتالیایی، از مدل WEAP استفاده کردند. (Psomas et al. (2016) در تحقیقی به‌منظور دست‌یابی به مدیریت جامع و دقیق آب شرب حوضه Ali Efenti در کشور یونان، از دو مدل SWAT و WEAP استفاده کردند و نتایج حاصل از دو مدل را مورد مقایسه قرار دادند. (Faiz et al. (2017) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل WEAP به بررسی تغییرات جریان و شدت خشکسالی در حوضه رودخانه Songhua در شمال شرقی چین پرداختند. نتایج نشان داد که مدل WEAP می‌تواند به‌طور مؤثری در این حوضه مورد استفاده قرار گیرد. (Hum and Abdul-Talib (2016) در مطالعه‌ای از مدل WEAP برای بررسی منابع و مصارف آب موجود در شهر Selangor در مالزی تا سال ۲۰۵۰ میلادی استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع جایگزین و اقدامات صرفه‌جویی در مصارف، کمبود آب در منطقه مطالعاتی را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهد.

امروزه به دلیل رشد جمعیت، ارتقای سطح بهداشت و رفاه عمومی، گسترش صنعت و رشد فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی، سرانه مصرف آب به‌شدت افزایش یافته و با توجه به کمبود شدید آب و عدم توازن بین عرضه و تقاضا، مدیریت منابع آب بسیار پیچیده و با اهمیت شده است. تأثیر توسعه بالادست حوضه بر مصارف و تقاضای پایین‌دست، یکی از زمینه‌های مطرح در مدیریت منابع آب است. در دو دهه اخیر در سراسر جهان سعی گردیده است که استفاده از منابع آبی محدود و تخصیص آن به مصرف‌کنندگان، با نگرشی یکپارچه انجام شود. در همین راستا مدل‌های مختلفی به‌منظور شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب و ارزیابی چگونگی تخصیص منابع آبی محدود میان مصرف‌کنندگان مختلف توسعه یافته‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به WEAP، RIBASIM، MIKEBASIN، MODSIM و WEAP اشاره کرد. مدل RIBASIM چه در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک و چه در جزئیات تخصیص آب از سایر مدل‌ها قوی‌تر است اما تدوین و آماده‌سازی آن مستلزم صرف هزینه‌ای زیاد است. در مدل MODSIM ممکن است تمام کمبودها به یک نقطه مصرف تحمیل شوند درحالی‌که در WEAP، کمبودها به طور مساوی بین نقاط نیاز با اولویت یکسان تقسیم می‌شوند. مدل MIKE BASIN به‌گره‌های بالاتر آب بیشتری تخصیص می‌دهد در صورتی‌که WEAP در این خصوص عادلانه‌تر عمل می‌کند. در مدل MIKEBASIN امکان انتقال کمبود به دوره زمانی بعدی وجود دارد درحالی‌که در MODSIM این امکان در نظر گرفته نشده است. در مدل MIKE BASIN زیربرنامه‌های آب زیرزمینی و کیفیت، مربوط به خود مدل است درحالی‌که WEAP برای این منظور از نرم‌افزارهای دیگر کمک می‌گیرد. از میان مدل‌های یادشده، تنها مدل WEAP است که اثر تغییر میزان آب اختصاص یافته به مصرف‌کنندگان مختلف را بر منافع اقتصادی حاصل از مصرف آب ارزیابی می‌کند که این مزیت، به‌ویژه هنگامی که لازم است تا اثرات طولانی مدت تغییر تخصیص در منابع آب ارزیابی شود حائز اهمیت است (George et al., 2011). در مجموع با توجه به مقایسه انجام شده، نحوه پشتیبانی و مدنظر قرار دادن هزینه‌ها، مدل WEAP برای شرایط کنونی کشور مناسب‌تر است (Bagheri Harooni and Morid, 2013).

پیش‌بینی دقیق پاسخ حوضه به بارش و اطلاع از بیلان آبی حوضه‌های آبریز، برای استفاده بهینه از منابع آب و خاک بسیار ضروری است (Moazenzadeh et al., 2016). این در حالی است که اندازه‌گیری اجزای بیلان آب در فاصله‌های زمانی مورد نیاز، به‌دلیل وقت‌گیر و پرهزینه بودن بسیار مشکل است و در کشور ما نیز اکثر حوضه‌ها فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری کافی هستند که این امر می‌تواند

WEAP مخفف "سیستم طراحی و ارزیابی آب" است که در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم<sup>۲</sup> (SEI) در سوئد معرفی شده است. مدل WEAP بر اساس معادلات بیلان آب عمل کرده و از آن می‌توان در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های آبی پیچیده استفاده کرد (Ahmadi et al., 2015).

نتایج این مطالعه نشان داد مدل SWAT دقت قابل قبول و کارایی مناسبی در حوضه‌های کوهستانی دارد.

کاهش آبدهی رودخانه حبله‌رود در شرق استان تهران به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب در حوضه حبله‌رود و دشت گرمسار، توسعه برداشت از آب‌های سطحی، رقابت بر سر آب بین بخش‌های مختلف و تأثیر آن بر سیستم آبی حوضه و همچنین افزایش شوری و املاح و کاهش کیفیت آب رودخانه حبله‌رود به‌دلیل عبور از سازندهای شور در انتهای حوضه، ضرورت جامع‌نگری در مدیریت منابع آب این منطقه را نشان می‌دهد. این در حالی است که دردسترس نبودن داده‌های کافی از آبدهی در سراسر حوضه، مدیریت منابع سطحی را با مشکل مواجه کرده است. هدف از پژوهش حاضر، ترکیب دو مدل SWAT و WEAP است به‌گونه‌ای که مدل‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز حبله‌رود با مدل SWAT و مدیریت تخصیص منابع آب آن با مدل WEAP انجام شود. با مدل‌سازی در SWAT می‌توان حوضه را به واحدهای هیدرولوژیک کوچک تقسیم‌بندی کرد و رواناب را برای هر یک از آنها برآورد کرد. با ترکیب دو مدل WEAP و SWAT نیز می‌توان از قابلیت‌های هر دو مدل استفاده کرد تا علاوه بر غلبه بر مشکل کمبود داده‌ها، برنامه‌ای مؤثر، کارا و جامع برای بهره‌برداری از منابع حوضه ارائه شود.

## ۲- روش تحقیق

حوضه آبریز حبله‌رود در بخش شرقی استان تهران واقع شده و از شمال به مرز استان‌های تهران و مازندران و از شرق و جنوب به مرز استان‌های تهران و سمنان محدود است (شکل ۱). مساحت این حوضه ۳۲۶۲/۹ کیلومتر مربع و حداقل و حداکثر ارتفاع آن ۹۸۵ متر و ۴۰۵۷ متر است. حبله‌رود رودخانه اصلی این حوضه آبریز است که از ارتفاعات شمالی حوضه سرچشمه می‌گیرد و در جهت عمومی شمال شرق به جنوب غرب جریان دارد. این رودخانه از طریق به‌هم پیوستن دو شاخه گورسفید و فیروزکوه در بالادست حوضه، در شهرستان فیروزکوه شکل گرفته و در نهایت، پس از دریافت شاخه‌های نم‌رود، دره‌ده و دلچچای و عبور این رودخانه از روستای بنکوه، وارد دشت گرمسار می‌شود. آب رودخانه در گرمسار بیشتر به مصرف آبیاری اراضی کشاورزی می‌رسد. شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه حبله‌رود در این مطالعه با استفاده از مدل SWAT انجام شد. مدل SWAT برای انجام شبیه‌سازی به داده‌های متنوع مکانی و نقطه‌ای نیازمند است. اطلاعات مکانی مورد نیاز شامل مدل رقومی ارتفاع<sup>۴</sup> (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک حوضه است که سه نقشه اصلی برای ساخت و اجرای مدل SWAT هستند. بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی و ساعات

برنامه‌ریزی‌های مدیریتی را با مشکل و یا حتی شکست مواجه کند. محققین معتقدند شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیک در حوضه‌های آبریز، راه حل بهینه‌ای برای مقابله با مشکل کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده است (Ahmadzadeh et al., 2014). از جمله مدل‌های شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیک در مقیاس حوضه، "ابزار ارزیابی آب و خاک"<sup>۳</sup> یا به‌اختصار SWAT است. مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی است که برای پیش‌بینی اثر تغییر کاربری اراضی، تغییر اقلیم، تغییرات خاک و مدیریت، بر آبدهی و رسوب خروجی از حوضه‌های آبریز بزرگ و پیچیده طراحی و ارائه شده است (Arnold et al., 1998). در مدل SWAT، حوضه به بخش‌هایی مجزا تقسیم‌بندی می‌شود که در آنها، کاربری اراضی، شیب زمین و نوع خاک یکسان است و مدل بدین ترتیب، تغییرات مکانی پارامترها را در سطح حوضه در نظر می‌گیرد. به همین دلیل، از این مدل به‌عنوان یک مدل نیمه‌توزیعی یاد می‌شود. این مدل هم‌اکنون به‌عنوان ابزاری کارآمد در شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود.

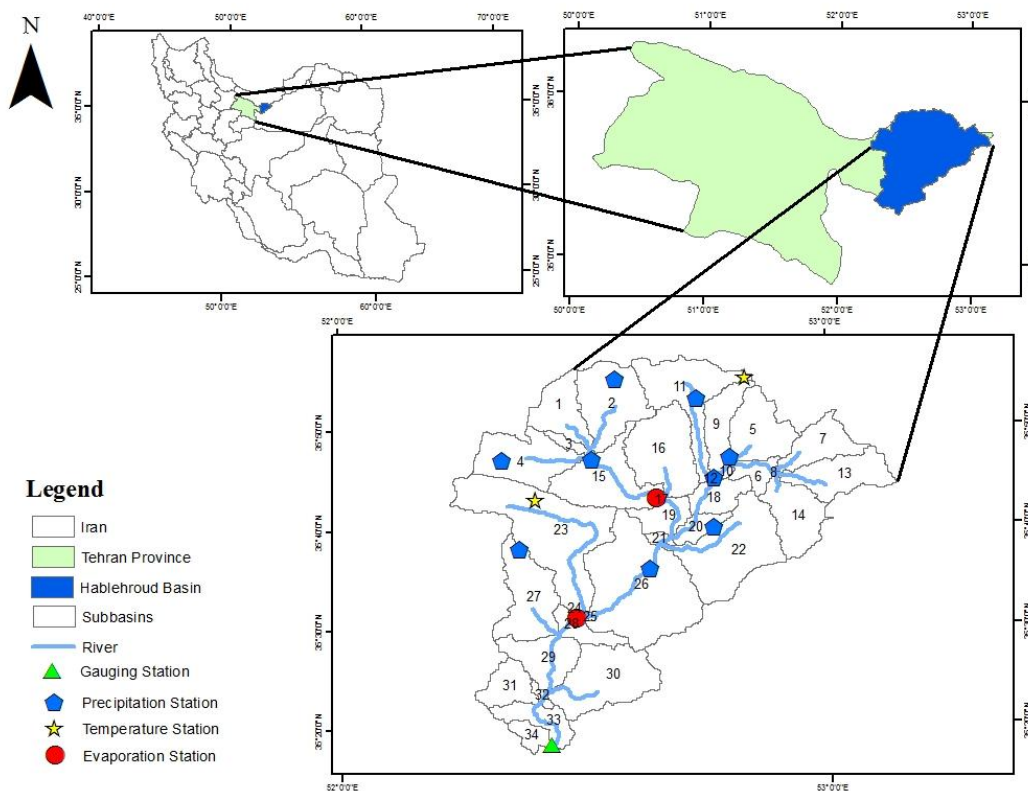
(Lu et al., 2015) با استفاده از مدل SWAT، بیلان آبی را در یک حوضه آبریز کوهستانی در شمال غرب چین شبیه‌سازی کردند. نتایج تحقیق نشان داد خروجی‌های مدل برای مدیریت منابع آب در چنین حوضه‌هایی یک مرجع مناسب و قابل اطمینان است. (Meaurio et al., 2015) مدل SWAT را برای یک حوضه آبریز کوچک جنگلی مورد ارزیابی قرار داده و منابع عدم قطعیت را شناسایی کردند. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی بود. (Faramarzi et al., 2009) اجزای بیلان آب در کل ایران را در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کرده و ارتباط آنها با تولید گندم را با در نظر گرفتن عملکرد سدها و آبیاری اراضی کشاورزی بررسی کردند. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با الگوریتم SUFI-2 صورت گرفت. آنها در پژوهش خود با توجه به دقت بالای مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی و عملکرد، این مدل را برای حوضه‌های آبریز تحت آبیاری پیشنهاد نمودند. (Du et al., 2009) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان روزانه در یک حوضه آبریز در ایالات متحده استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب نش- ساتکلیف و میانگین خطای نسبی برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۶ و ۱۵ درصد و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۵۶ و ۴ درصد است. (Kavian et al., 2015) رواناب و بار رسوبی حوضه آبریز رودخانه‌های مازندران را با بهره‌گیری از مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی بالای دبی جریان در هر چهار ایستگاه مورد بررسی بود. (Delavar et al., 2011) با استفاده از مدل SWAT، به مدل‌سازی رواناب حوضه امامزاده داوود پرداختند.

پژوهش، مدل حوضه را به ۳۴ زیرحوضه تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱). سپس نقشه کاربری اراضی، خاک و کلاس شیب به مدل معرفی و هر زیرحوضه به چندین واحد واکنش هیدرولوژیک<sup>۵</sup> (HRU) تقسیم‌بندی شد. این واحدها از نظر ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی و شیب همگن هستند. در مدل SWAT، دوروش شماره منحنی SCS و معادله نفوذ گرین-آمپت برای برآورد رواناب سطحی در نظر گرفته شده است. معادله نفوذ گرین-آمپت به داده‌های بارندگی ساعتی، هدایت هیدرولیکی خاک و پتانسیل جبهه رطوبتی خاک برای برآورد رواناب نیاز دارد اما در روش SCS از پارامتر شماره منحنی (CN) برای برآورد رواناب استفاده می‌شود که این پارامتر تابعی از نوع خاک، شیب، کاربری اراضی و شرایط اولیه رطوبت خاک است. در این مطالعه به دلیل در دسترس بودن داده‌های مربوط به روش SCS، از این روش برای برآورد رواناب استفاده شد.

مدل SWAT از پارامترهای متعددی استفاده می‌کند. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و واسنجی آن با استفاده از الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP انجام شد. در این الگوریتم، تحلیل حساسیت هر یک از پارامترها بدین صورت انجام می‌شود که ابتدا برای هر پارامتر، دامنه‌ای از مقادیر ممکن در نظر گرفته می‌شود.

آفتابی روزانه در سه ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه، فیروزکوه-آلودگی و گرمسار و همچنین داده‌های بارش روزانه در دو ایستگاه تبخیرسنجی و نه ایستگاه باران‌سنجی، به‌عنوان داده‌های نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز با استفاده از آمار آبدهی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه انجام شد. شبیه‌سازی در دوره آماری ۲۰۱۲-۱۹۹۵ انجام شد و سال‌های ۱۹۹۷-۱۹۹۵ برای گرم‌شدن مدل در نظر گرفته شدند. از آنجا که شرایط اولیه حوضه (به‌عنوان مثال وضعیت رطوبت خاک در حوضه در شروع اجرای مدل) می‌تواند بر نتایج حاصل از اجرای مدل تأثیرگذار باشد لازم است که پیش از اجرای مدل، دوره‌ای به‌عنوان گرم‌شدن مدل در نظر گرفته شود تا شرایط اولیه حوضه از تقریب اولیه به وضعیتی بهینه تغییر یابد (Kim et al., 2018). موقعیت مکانی و شکل ظاهری حوضه، شبکه آبراهه‌های اصلی و همچنین محل هریک از ایستگاه‌های ثبت داده‌ها در شکل ۱ آمده است.

نقشه زیرحوضه‌ها به دلیل اینکه در تعریف سناریوهای مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، یکی از مؤلفه‌های اصلی در فرآیند مدل‌سازی حوضه است. در مدل SWAT، پس از وارد کردن DEM، شبکه جریان و زیرحوضه‌ها بر اساس حداقل سطح زهکشی تعیین می‌شوند. در این



**Fig. 1- Hablehroud Basin, main waterway route, location of stations and sub-basins produced in SWAT**  
 شکل ۱- حوضه آبریز حبله‌رود، مسیر آبراهه اصلی، موقعیت مکانی ایستگاه‌ها و زیرحوضه‌های تولید شده در SWAT

همچنین، مقادیر نزدیک‌تر به صفر برای RMSE و ME، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل هستند.

**Table 1- The ranges of R<sup>2</sup> and NS coefficients (Donigian, 2000; Moriasi et al., 2007)**

	Poor	Middle	Good	Very good
R <sup>2</sup>	< 0.60	0.60 - 0.70	0.70 - 0.80	> 0.80
NS	< 0.50	0.50 - 0.65	0.65 - 0.75	> 0.75

پس از مدل‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز حبله‌رود در مدل SWAT، برای پیکربندی و تهیه چارچوب اصلی مدل WEAP، مشخص کردن مرزهای مکانی سیستم هیدرولوژیک مورد مطالعه، تعریف بخش‌های مختلف این سیستم برای شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه و ارزیابی همزمان سناریوهای مختلف مدیریتی، ابتدا نقشه‌های اولیه شامل مرزهای حوضه، زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها که از مدل SWAT تهیه شده بودند و همچنین تمام نقاط نیاز و منابع آبی موجود و به‌طور کلی تمامی عوارضی که برای تعیین چارچوب اصلی مدل مورد نیاز است در محیط نرم‌افزار ArcMap تهیه شد. سپس این نقشه‌ها در محیط WEAP فراخوانی و با استفاده از ابزارهای تعبیه‌شده در آن، کلیه عوارض مربوط به حوضه مشخص شدند. طرح شماتیک مدل حوضه آبریز حبله‌رود در شکل ۲ ارائه شده است.

پس از پیکربندی مدل، طول دوره شبیه‌سازی، گام زمانی، سال پایه و واحد پارامترها به مدل معرفی شدند. به‌منظور استفاده از مدل، بایستی یک سال با اطلاعات و آمار مناسب به‌عنوان سال پایه در نظر گرفته شده و برآوردی از وضعیت منابع و مصارف به عمل آید. در این تحقیق، سال ۲۰۰۶ به‌عنوان سال پایه انتخاب شد. با استفاده از اطلاعات سال پایه، به بررسی تأثیر سناریوهای مدیریتی مختلف در یک دوره آماری بلندمدت ۳۵ ساله (۲۰۴۰-۲۰۰۶) پرداخته شد. لازم به ذکر است که گام زمانی شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه در نظر گرفته شد. مدل WEAP قابلیت سناریویذیری داشته و می‌توان در آن سناریوهای مختلف مدیریتی تعریف کرد و به مقایسه و ارزیابی این سناریوها پرداخت. در واقع برنامه‌ریز توسط این قابلیت می‌تواند تصمیم‌های بهتری برای منابع آب موجود اتخاذ کند. برنامه‌ریز ابتدا شرایط موجود سیستم را شبیه‌سازی کرده و با مقایسه این حالت با سناریوهای پیش‌رو، بهترین حالت را بر می‌گزیند. در این پژوهش، سناریوهای زیر برای بررسی تغییرات عرضه و تقاضای آب و همچنین به‌منظور تعادل بخشی سیستم عرضه و تقاضای آب در مدل WEAP تعریف شدند:

مقادیری تصادفی از این دامنه‌ها انتخاب شده و با اجرای مدل، خطای آن برآورد می‌شود. با تکرار این عمل، می‌توان بین پارامترها و خطای مدل، معادله‌ای رگرسیونی به دست آورد. با تعیین t-stat و p-value هر پارامتر در این معادله رگرسیونی، درجه‌ی تأثیر آن پارامتر بر خروجی مدل سنجیده می‌شود. پارامترهایی با بیشترین قدرمطلق t-stat و p-value نزدیک به صفر، به‌عنوان پارامترهای حساس که تأثیر بیشتری بر آینده‌ی خروجی از حوضه دارند انتخاب می‌شوند. در این پژوهش با توجه به مطالعات گذشته، ۳۲ پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت توسط الگوریتم SUFI-2، ۱۶ پارامتر به‌عنوان پارامترهای حساس انتخاب شدند. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT به‌ترتیب از داده‌های آینده ماهانه حوضه طی سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۹۸ و ۲۰۱۲-۲۰۰۹ استفاده شد. عدم‌قطعیت خروجی مدل نیز بر مبنای دو معیار p-factor و r-factor سنجیده شد. اولین معیار (p-factor) عبارت است از درصدی از داده‌های مشاهده‌شده که در محدوده باند عدم‌قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) مدل قرار می‌گیرند. معیار دوم (r-factor) نیز از تقسیم میانگین ضخامت یا پهنای باند 95PPU بر انحراف معیار مقادیر مشاهده‌شده به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است در واسنجی مدل SWAT در الگوریتم SUFI-2، برای هر پارامتر نه یک مقدار قطعی، بلکه دامنه‌ای بهینه از مقادیر به‌دست می‌آید و بنابراین خروجی مدل به‌ازای هر مقدار مشاهده‌شده نه یک عدد قطعی، بلکه مجموعه‌ای از مقادیر است (باند 95PPU). بدین ترتیب هدف الگوریتم SUFI-2، حداکثرسازی p-factor و حداقل‌سازی r-factor است، هرچند p-factor زمانی به حداکثر مقدار خود (۱۰۰ درصد) نزدیک می‌شود که r-factor، مقادیری بزرگ داشته باشد و بنابراین باید بین این دو معیار به مقادیری بهینه دست یافت. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، از جذر میانگین مربعات خطا<sup>۶</sup> (RMSE)، کارایی مدل<sup>۷</sup> (ME)، ضریب تبیین<sup>۸</sup> (R<sup>2</sup>) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف<sup>۹</sup> (NS) استفاده شد که به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ تا ۴ برآورد می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})}{n} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (4)$$

در این روابط،  $Q_m$  آینده اندازه‌گیری‌شده،  $\bar{Q}_m$  میانگین آینده‌های اندازه‌گیری‌شده،  $Q_s$  آینده شبیه‌سازی‌شده و  $\bar{Q}_s$  میانگین آینده‌های شبیه‌سازی‌شده است. ارزیابی عملکرد مدل بر اساس ضرایب R<sup>2</sup> و NS را می‌توان بر مبنای دامنه‌های ارائه‌شده در جدول ۱ انجام داد.

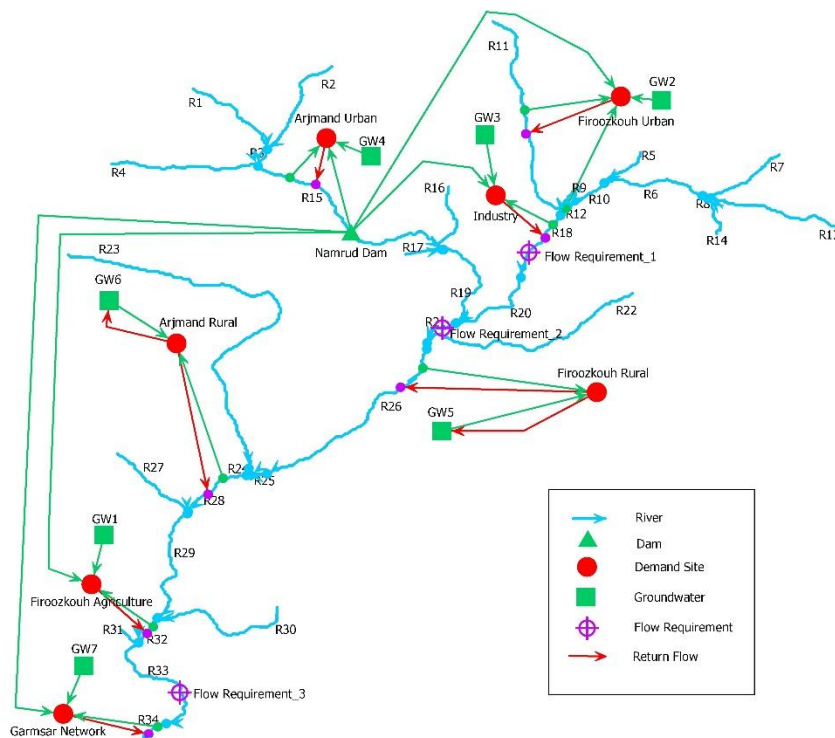


Fig. 2- Schematic configuration of water resource system of Hablehroud Basin in WEAP model  
 شکل ۲- شماتیک پیکربندی سیستم منابع آب حوضه آبریز حبله‌رود در مدل WEAP

Table 2- Hablehroud Basin cultivation pattern  
 جدول ۲- الگوی کشت حوضه آبریز حبله‌رود

Agricultural land	Crop	Area under cultivation (%)
Firoozkouh	Alfalfa	32.45
	Potato	28.05
	Apple	15.58
	Wheat	12.78
	Barley	3.29
	Walnut	2.86
	Tabrizi	2.10
	Other	2.86
Garmsar network	Cotton	42.96
	Barley	23.31
	Wheat	17.68
	Cucumber	5.64
	Walnut	2.59
	Apple	1.88
	Other	5.90

ج- کاهش سطح زیر کشت اراضی زراعی و باغی (S2 و S3): با توجه به اینکه بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در این حوضه است با کاهش مصرف در این بخش می‌توان بین سیستم عرضه و تقاضای آب تا حد زیادی تعادل ایجاد کرد. در سناریوهای S2 و S3 برای تمامی مکان‌های مصرف کشاورزی موجود، از سطوح زیر کشت به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد کاسته شد.

الف- سناریوی مرجع (Reference scenario): بررسی تغییرات عرضه و تقاضا در سطح حوضه آبریز در آینده با کمک سناریوی مرجع صورت می‌گیرد. این سناریو یک سناریوی پایه است که شرایط حال را بر مبنای منابع و مصارف فعلی مدل می‌کند و در آن از داده‌های واقعی استفاده می‌شود تا بتوان به این وسیله بهترین تخمین از دوره مورد مطالعه را انجام داد.

ب- تغییر الگوی کشت (S1): در این سناریو فرض بر این است که در سال‌های آینده، بدون افزایش یا کاهش سطح زیر کشت، الگوی کشت حوضه (جدول ۲) به سمت محصولاتی تغییر کند که مصرف آب کمتری دارند. لازم به ذکر است در این مطالعه، نیاز کشاورزی به دو بخش درون حوضه‌ای (تحت عنوان Firoozkouh) و نیاز شبکه آبیاری و زهکشی گرمسار درانتهای حوضه (تحت عنوان Garmsar network) تقسیم شده است. این سناریو تأثیر تغییر الگوی کشت در اراضی زراعی و باغی را به منظور تعادل بخشی به سیستم عرضه و تقاضا نشان می‌دهد. در این سناریو، کاهش سطح زیر کشت اراضی زراعی با نیاز آبی زیاد (یونجه و سیب‌زمینی) در ماه‌های کم آب (شش ماه اول سال) به میزان ۵۰ درصد و اختصاص این اراضی به محصولات زراعی با نیاز کمتر (گندم و جو)، و همچنین کاهش سطح زیر کشت باغات (سیب، گردو و تبریزی) به میزان ۵۰ درصد و تخصیص این اراضی به محصولات زراعی گندم و جو در نظر گرفته شده است.

د: سناریوهای ترکیبی (S4, S5 و S6): در این سناریوها اثر ترکیب سناریوهای S1, S2 و S3 با دو سناریوی زیر بررسی شده است: ۱- اعمال شیوه‌های مدیریت تقاضا در شهر، روستا و صنعت به منظور کاهش ۱۵ درصدی سرانه مصرف آب در گره‌های نیاز شهری و روستایی؛ و ۲- افزایش راندمان آبیاری در اثر استفاده از تکنولوژی در سیستم‌های آبیاری و تجهیز شدن تمامی اراضی کشاورزی و باغی به سیستم‌های آبیاری با راندمان کاربرد بالا تا سال ۲۰۴۰. قابل ذکر است که در سناریوی مرجع، بر اساس گزارش مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در سال ۲۰۱۳، راندمان کاربرد آب در اراضی کشاورزی فیروزکوه ۳۶/۳ درصد و در شبکه آبیاری و زهکشی گرمسار ۴۲/۸ درصد در نظر گرفته شده است. در نهایت، سناریوها بر مبنای شاخص اطمینان‌پذیری<sup>۱۰</sup> (RE) و شاخص عدالت در تخصیص آب<sup>۱۱</sup> (CV) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند (Movahed Atar and Samadi, 2013). اطمینان‌پذیری، درصدی از ماه‌هاست که در آن نیاز تأمین می‌شود. ضریب تغییرات نسبت تأمین به تقاضا در نقاط تقاضا نیز عدالت در تخصیص آب نامیده می‌شود. در شاخص اطمینان‌پذیری، آستانه تعیین شکست سیستم در زمینه تأمین آب برای گره‌های نیاز کشاورزی ۶۰ درصد، برای گره‌های نیاز شرب و صنعت ۹۰ درصد و برای نیاز زیست‌محیطی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود (ASCE, 1998).

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- نتایج مدل SWAT

همان‌گونه که ذکر شد، با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT در SUFI-2، ۱۶ پارامتر به عنوان پارامترهایی که بایستی مورد واسنجی قرار گیرند شناخته شدند که از این میان، چهار پارامتر شامل ظرفیت آب قابل دسترس (SOL\_AWC)، جرم مخصوص ظاهری خاک در لایه سطحی (SOL\_BD)، میانگین طول شیب (SLSUBBSN) و فاکتور جبران جذب آب توسط گیاه (EPCO) دارای p-value کمتر از ۰/۰۱ بودند به این معنی که در سطح یک درصد، تأثیر معنی‌داری بر شبیه‌سازی آبدی ماهانه حوضه حبله‌رود دارند. در جدول ۳، تمامی ۳۲ پارامتر اولیه به همراه مقادیر t-stat و p-value آنها ارائه شده است (پارامترهای حساس به صورت Bold نمایش داده شده‌اند).

شاخص‌های ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. با توجه به جدول ۱ و نتایج ارائه شده در جدول ۴، شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل SWAT در طبقه‌بندی "خوب" قرار دارد. (Havrylenko et al., 2016)

پژوهش خود، در دوره واسنجی مقادیر ۰/۷۷ و ۰/۷۵ را به ترتیب برای ضرایب  $R^2$  و NS در شبیه‌سازی آبدی حوضه گزارش نمودند. (Abbaspour et al., 2007) نیز در مطالعه خود در حوضه رودخانه Thur در کشور سوئیس برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهای مؤثر بر بیلان آب، رسوب و چرخه عناصر، مقدار NS را برای شبیه‌سازی رواناب، برابر با ۰/۷۱ گزارش نمودند. بررسی عدم قطعیت مدل نیز نشان داد مقدار p-factor در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۴۲ و ۰/۲۵ است (جدول ۴). این بدان معنی است که در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب ۴۲ و ۲۵ درصد از داده‌های مشاهداتی از آبدی ماهانه، در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵ درصد مدل (95PPU) قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه در مطالعات گذشته مقادیری بین ۰/۳۱ تا ۰/۹۱ برای این فاکتور گزارش شده است (Abbaspour et al., 2007; Rostamian et al., 2008; Faramarzi et al., 2009) می‌توان گفت مقدار محاسبه‌شده برای این ضریب بستگی زیادی به منطقه مطالعه‌شده دارد. کمبودن p-factor و فاصله آن با مقدار مطلوب (۱۰۰ درصد) را می‌توان با کمبودن مقدار r-factor نیز توجیه کرد (۰/۴۲ و ۰/۳۷ در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی). برای r-factor در مطالعه (Abbaspour et al., 2007) مقادیری بین ۰/۴۶ تا ۱/۵۰، در مطالعه (Rostamina et al., 2008) مقادیری بین ۰/۳۰ تا ۲/۰۴ و در مطالعه (Faramarzi et al., 2009) مقادیری بین ۰/۷۱ تا ۱/۴۰ گزارش شده است. در شکل ۳، خروجی مدل (95PPU) به همراه سری زمانی مشاهده شده و بهترین سری شبیه‌سازی شده از آبدی ماهانه در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین عرض باند عدم قطعیت مربوط به آبدی‌های پیک است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که مدل به‌طور کلی، آبدی ماهانه را کمتر از میزان واقعی برآورد می‌کند. در خصوص آبدی‌های پیک، عدم قطعیت زیاد مدل می‌تواند به دلیل ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف باشد و در ماه‌هایی که ذوب برف عامل اصلی ایجاد سیلاب‌های بزرگ است مدل عملکرد مناسبی نداشته و دارای بیشترین عدم قطعیت است. عدم توانایی مناسب مدل در برآورد آبدی‌های پیک در نتایج پژوهش‌های (Wang and Melesse, 2005) و (Sauvage et al., 2011) نیز مشاهده شده است. این موضوع که مدل، آبدی حوضه را به‌طور کلی کمتر از میزان واقعی برآورد می‌کند نیز می‌تواند به دلیل استفاده از روش شماره منحنی در برآورد رواناب باشد که در آن، فرض بر این است که تغییرات مکانی و زمانی بارندگی، تأثیری بر شماره منحنی حوضه ندارد.

**Table 3- Parameters assessed in SWAT model**

جدول ۳- پارامترهای مورد ارزیابی در مدل SWAT

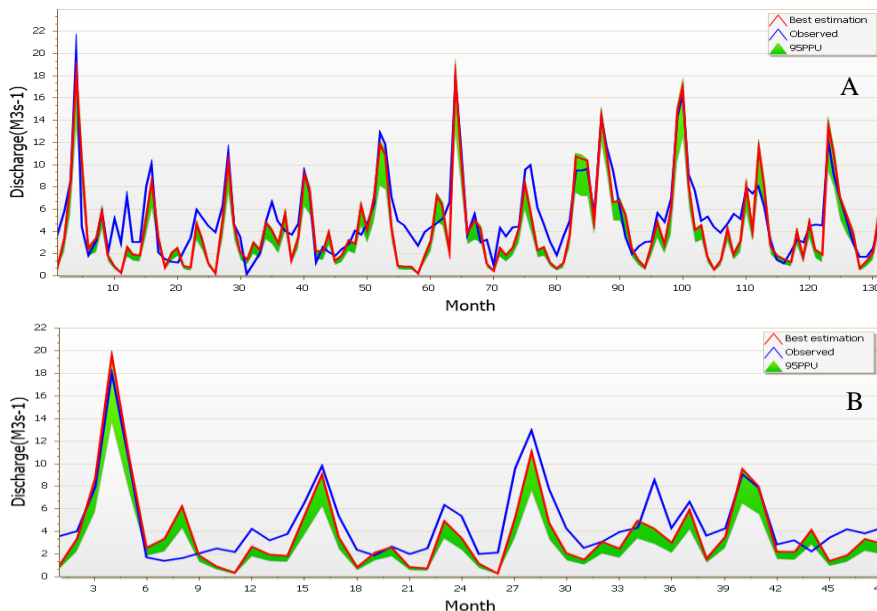
Rate	Definition	Parameter Name	t-stat	p-value
1	Soil available water storage capacity	r__SOL_AWC.sol	24.40	0.0000
2	Soil bulk density	r__SOL_BD.sol	11.41	0.0000
3	Average slope length	v__SLSUBBSN.hru	-3.737	0.0002
4	Plant uptake compensation factor	v__EPCO.hru	3.228	0.0013
5	Deep aquifer percolation fraction	v__RCHR_G_DP.gw	-2.072	0.0380
6	SCS runoff curve number for moisture condition II	r__CN2.mgt	1.612	0.1070
7	Base flow alpha factor	v__ALPHA_BF.gw	1.267	0.2050
8	Soil conductivity	r__SOL_K.sol	1.252	0.2110
9	Moist soil albedo	r__SOL_ALB.sol	1.057	0.2900
10	Soil evaporation compensation factor	v__ESCO.hru	1.043	0.2970
11	Groundwater "revap." coefficient	v__GW_REVAP.gw	0.721	0.4710
12	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap."	v__REVAPMN.gw	0.470	0.6380
13	Groundwater delay time	v__GW_DELAY.gw	-0.298	0.7650
14	Initial depth of water in the shallow aquifer	v__SHALLST.gw	0.298	0.7650
15	Surface runoff lag time	v__SURLAG.bsn	-0.056	0.9550
16	Threshold depth of water in shallow aquifer for return flow	v__GWQMN.gw	0.013	0.9890
17	Temperature lapse rate	v__TLAPS.sub	0.011	0.9900
18	Snow pack temperature lag factor	v__TIMP.bsn	0.011	0.9900
19	Snowfall temperature	v__SFTMP.bsn	-0.010	0.9900
20	Skew coefficient for daily precipitation in month	r__PCPSKW.wgn	-0.009	0.9910
21	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for normal flow	v__MSK_CO1.bsn	0.007	0.9910
22	Average amount of precipitation falling in month	r__PCPMM.wgn	-0.007	0.9910
23	Depth from soil surface to bottom of layer	r__SOL_Z.sol	0.007	0.9930
24	Maximum melt rate for snow during year	v__SMFMX.bsn	-0.005	0.9930
25	Standard deviation for daily precipitation in month	r__PCPSTD.wng	-0.005	0.9950
26	Minimum melt rate for snow during the year	v__SMFMN.bsn	0.005	0.9950
27	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for low flow	v__MSK_CO2.bsn	0.000	0.9960
28	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	v__CH_K2.rte	0.000	0.9970
29	Manning's "n" value for the main channel	v__CH_N2.rte	0.000	0.9970
30	Manning's "n" value for overland flow	v__OV_N.hru	0.000	0.9970
31	Average slope steepness	r__HRU_SLP.hru	0.000	0.9990
32	Snow melt base temperature	v__SMTMP.bsn	0.000	0.9990

**Table 4- Calibration and validation results of SWAT**

جدول ۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی SWAT

	p-factor	r-factor	NS	R <sup>2</sup>	RMSE	ME
Calibration period	0.42	0.42	0.71	0.80	1.94	0.79
Validation period	0.25	0.37	0.71	0.81	1.81	0.89





**Fig. 3- Comparison of simulated and observed discharges in calibration (A) and validation (B) periods**  
**شکل ۳- مقایسه آبدهی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده در دوره واسنجی (A) و اعتبارسنجی (B)**

اراضی کشاورزی فیروزکوه و شبکه گرمسار به ترتیب ۴/۱۴ و ۱/۸۷ درصد افزایش خواهد یافت. این سناریو علاوه بر داشتن نقشی قابل قبول در کاهش میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی، می‌تواند باعث جابجایی تقاضای آب از فصول گرم سال به فصول پر بارش شود و در نتیجه محصول این امکان را خواهد داشت تا از نزولات آسمانی برای تأمین بخشی از نیاز آبی خود بهره‌گیرد. Kermanshahi et al. (2013) در گزارش نتایج پژوهش خود درباره بررسی تغییر الگوی کشت بر نیاز آبی با استفاده از مدل WEAP به این نتیجه اشاره نمودند. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶ با اجرای دو سناریوی S2 و S3 و با کاهش ۱۰ و ۲۰ درصد از سطح زیر کشت، مقدار تقاضا در اراضی کشاورزی فیروزکوه به ترتیب ۴/۳۳ و ۳۴/۶۳ میلیون متر مکعب و در اراضی کشاورزی شبکه گرمسار به ترتیب ۳۳/۵۸ و ۱۶۱/۵۱ میلیون متر مکعب کاهش خواهد یافت. بدین ترتیب، درصد تأمین نیاز در اراضی کشاورزی فیروزکوه در دو سناریوی S2 و S3 ۱/۶۵ و ۲۳/۲۵ درصد و در اراضی کشاورزی شبکه گرمسار، ۶/۱۱ و ۳۶/۰۴ درصد افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از سناریوهای ترکیبی نیز در جدول ۷ ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد با اجرای سناریوهای ترکیبی و به کارگیری هم‌زمان راهبردهای مختلف مدیریت مصرف آب (افزایش راندمان آبیاری، کاهش سرانه مصرف و تغییر الگوی کشت)، می‌توان بیش از ۶۰ درصد از نیاز آبی اراضی کشاورزی را تأمین کرد. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین درصد تأمین نیاز مربوط به سناریوی S6 است.

### ۳-۲- ارزیابی سناریوها و نتایج مدیریت تخصیص منابع آب با استفاده از مدل WEAP

با توجه به نتایج مدل WEAP در سناریوی مرجع مشاهده می‌شود که نیاز شرب و صنعت در بیشتر ماه‌های سال به طور کامل تأمین می‌شود که این امر با توجه به اینکه تأمین آب در گره‌های تقاضای شرب و صنعت در اولویت اول قرار دارد دور از انتظار نبوده است (جدول ۵). با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵، بیشترین آب تأمین نشده در بخش کشاورزی است که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت تقاضای آب در این بخش است. با توجه به الگوی کشت منطقه، بیشتر اراضی کشاورزی فیروزکوه و شبکه گرمسار به کشت محصولاتی با نیاز آبی زیاد به‌ویژه در ماه‌های گرم سال اختصاص دارند. بنابراین، کمبود آب در این ماه‌ها شدیدتر بوده و بخش زیادی از نیازها تأمین نمی‌شود. در اراضی کشاورزی فیروزکوه و اراضی شبکه گرمسار، مجموع نیاز آبی سالانه به ترتیب ۴۴/۵۹ و ۲۰۳/۷۲ میلیون مترمکعب است که از این مقادیر، به ترتیب ۶۵/۷۳ و ۴۲/۸۶ درصد تأمین می‌شود.

نتایج حاصل از اجرای سناریوهای تغییر الگوی کشت (S1) و کاهش سطح اراضی زیرکشت (S2 و S3) در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج مربوط به سناریوی S1 نشان می‌دهند در صورت تغییر الگوی کشت از شرایط موجود به الگوی تعریف شده در این سناریو، مقدار تقاضا در اراضی کشاورزی فیروزکوه و شبکه گرمسار به ترتیب ۱۳/۱۸ و ۴۱/۸۲ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، درصد تأمین نیاز در

**Table 5- Demand and percentage of met demand in demand nodes (reference scenario)**

جدول ۵- میزان تقاضا و درصد تأمین نیاز در گره‌های تقاضا (سناریوی مرجع)

Demand node		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Arjmand urban	Demand(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	3.44	4.00	4.20	5.00	5.19	5.50	5.56	5.03	4.50	3.76	3.55	3.39
	Coverage (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Firoozkouh urban	Demand(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	335.9	100.0	323.0	100.0	357.4	388.0	396.2	396.2	387.6	370.4	357.4	340.2
	Coverage (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.0	97.2	99.7	100.0	99.9	100.0	98.8
Arjmand rural	Demand (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	17.01	19.00	21.00	24.00	25.65	27.00	27.49	24.87	22.25	18.59	17.54	16.75
	Coverage (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Firoozkouh rural	Demand (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	50.49	57.00	62.00	72.00	76.12	81.00	81.56	73.79	66.02	55.15	52.04	49.71
	Coverage (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Firoozkouh agriculture	Demand (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	1.65	3.72	7.10	10.17	9.81	8.22	2.44	1.03	0.37	0.08
	Coverage (%)	100.0	100.0	99.2	100.0	88.2	40.3	16.1	11.2	22.9	53.6	89.2	100.0
Garmsar network	Demand (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	9.64	15.14	25.17	17.10	12.62	25.86	34.10	26.16	14.48	16.36	2.56	4.52
	Coverage (%)	53.0	45.8	64.2	86.0	71.7	11.0	5.8	5.7	12.6	13.9	88.6	79.3
Industry	Demand (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31
	Coverage (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

**Table 6- Change in demand and percentage of met demand relative to the reference scenario**

جدول ۶- تغییرات تقاضا و درصد تأمین نیاز نسبت به سناریوی مرجع

Demand node	Scenario	Factor	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Firoozkouh agriculture	S1	Demand	0.00	0.00	1.09	-0.09	-3.07	-4.75	-4.59	-1.53	-0.36	0.13	0.01	-0.04
		Coverage	0.00	0.00	-1.92	0.00	7.76	28.70	10.30	2.78	3.03	-0.30	-0.60	0.00
	S2	Demand	0.00	0.00	-0.16	-0.36	-0.69	-0.99	-0.95	-0.80	-0.23	-0.10	0.00	-0.01
		Coverage	0.00	0.00	0.53	0.00	3.75	9.85	1.10	0.72	1.02	1.64	1.27	0.00
	S3	Demand	0.00	0.00	-1.23	-2.89	-5.52	-7.91	-7.63	-6.39	-1.90	-0.80	-0.30	-0.06
		Coverage	0.00	0.00	0.80	0.00	11.85	55.90	56.50	50.21	48.38	44.70	10.80	0.00
Garmsar network	S1	Demand	1.41	2.23	3.57	-2.73	-5.05	-10.80	-14.20	-10.80	-6.36	-0.20	0.37	0.67
		Coverage	-4.37	-4.98	-5.67	2.90	11.17	19.30	3.28	3.24	2.54	0.64	-1.40	-4.07
	S2	Demand	-3.48	-5.46	-9.00	-3.44	-0.14	-1.03	-1.90	-1.38	-0.67	-4.50	-0.90	-1.63
		Coverage	13.49	16.16	13.02	5.21	1.27	1.20	0.25	0.23	0.18	5.62	5.27	11.50
	S3	Demand	-8.06	-12.70	-21.03	-13.69	-9.57	-19.80	-26.20	-20.10	-11.10	-13.00	-2.10	-3.78
		Coverage	45.28	48.41	35.82	14.03	28.35	75.70	51.40	33.27	22.98	49.00	7.68	20.70

**Table 7- Percentage of met demand in demand nodes (Combined scenarios)**

جدول ۷- درصد تأمین نیاز در گره‌های تقاضا (سناریوهای ترکیبی)

Demand node	Scenario	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Firoozkouh agriculture	S4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.5	58.7	44.1	45.0	70.0	98.5	100.0
	S5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	72.8	37.9	28.0	40.0	73.8	99.8	100.0
	S6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	99.8	98.7	98.7	98.6	100.0	100.0
Garmsar network	S4	70.5	66.9	81.7	96.7	100.0	75.1	38.0	24.3	21.5	28.8	94.6	93.7
	S5	88.0	82.5	93.6	100.0	93.9	52.5	15.5	11.0	16.4	37.5	94.8	99.6
	S6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.7	98.5	98.5	98.4	98.4	100.0	100.0

بهره‌برداری از بین سناریوهای تعریف‌شده در حوضه آبریز جبل‌رود محسوب می‌شود.

مقادیر برآوردشده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری (RE) و عدالت در تخصیص آب (CV) در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سناریوی S6 با داشتن بیشتری مقدار شاخص اطمینان‌پذیری (RE) و کمترین مقدار شاخص CV، برترین سناریوی

**Table 8- Assessment indices of defined scenarios**  
**جدول ۸- شاخص‌های ارزیابی سناریوهای تعریف‌شده**

Scenario	Index	Demand site						
		Firoozkouh agriculture	Garmsar network	Firoozkouh urban	Arjmand urban	Arjmand rural	Firoozkouh rural	Industry
Reference		63.0	38.0	99.1	100.0	99.8	99.8	100.0
S1		68.3	37.7	99.3	100.0	99.8	99.8	100.0
S2		64.1	45.4	99.3	100.0	99.8	99.8	100.0
S3	RE (%)	88.7	77.1	99.5	100.0	99.8	99.8	100.0
S4		78.9	60.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
S5		75.0	60.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
S6		99.3	98.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Reference		59.7	92.4	8.6	0.0	0.8	0.8	0.0
S1		54.4	85.9	7.1	0.0	0.8	0.8	0.0
S2		57.6	84.5	7.1	0.0	0.8	0.8	0.0
S3	CV (%)	23.5	41.3	6.8	0.0	0.8	0.8	0.0
S4		36.7	59.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S5		43.9	63.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S6		4.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

آنها بر درصد تأمین نیاز انجام شده و جنبه‌های اقتصادی در آن بررسی نشده است. پیشنهاد می‌شود مطالعات اقتصادی تأثیر هر یک از سناریوها در سطح حوضه آبریز حبله‌رود نیز مورد بررسی قرار گیرد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Water Evaluation and Planning System
- 2- Stockholm Environment Institute
- 3- Soil and Water Assessment Tool
- 4- Digital Elevation Model
- 5- Hydrologic Response Unit
- 6- Root Mean Square Error
- 7- Model Efficiency
- 8- Coefficient of Determination
- 9- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient
- 10- Reliability Index
- 11- Fairness Index

#### ۵- مراجع

- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2):413-430
- Adgolign TB, Rao GS, Abbulu Y (2016) WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management* 2(1):55-70
- Ahmadi A, Zadehvakili N, Safavi HR, Ohab Yazdi SA (2015) Development of a dynamic planning model for surface and groundwater allocation, Case study: Zayandehroud River Basin. *Iran-Water Resources Research* 11(1):21-31 (In Persian)

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

توزیع بهینه منابع محدود آب میان مصرف‌کنندگان متعدد در یک حوضه آبریز، با در نظر گرفتن عواملی همچون محدودیت‌های کیفی، تغییرات اقلیمی، مسائل زیست‌محیطی و عدم قطعیت متغیرهای اقلیمی از مهم‌ترین مسائلی است که برنامه‌ریزان منابع آب در حال حاضر با آن مواجهند. مدل‌های متداول هیدرولوژیک که در آنها بیشتر به شبیه‌سازی چگونگی تولید آب در حوضه‌های آبریز توجه می‌شود، معمولاً به تنهایی قادر به پاسخ‌دادن به پرسش‌های مدیریتی نیستند چرا که در مدیریت منابع آب، مصرف‌کنندگان و نحوه مصرف نیز نقشی عمده ایفا می‌کنند. در دو دهه اخیر در سراسر جهان سعی شده است استفاده از منابع آب محدود و تخصیص آن به مصرف‌کنندگان، با نگرشی یکپارچه انجام شود و در همین راستا، مدل‌های مختلفی به منظور شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب و ارزیابی چگونگی تخصیص منابع آب محدود میان مصرف‌کنندگان گوناگون توسعه یافته‌اند. در مطالعه حاضر، با هدف برآورد آبدهی زیرحوضه‌ها در حوضه آبریز حبله‌رود و سپس ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آبهای سطحی میان مصرف‌کنندگان متفاوت، از ترکیب دو مدل SWAT و WEAP استفاده شد. علی‌رغم در دسترس نبودن داده‌های دقیق و کافی از حوضه، مدل SWAT بر مبنای آماره‌های ارزیابی به دست آمده، به‌خوبی در حوضه واسنجی شد. توصیف وضعیت فعلی و همچنین ارزیابی سناریوهای مختلف تخصیص منابع آب در مدل WEAP انجام شد. نتایج نشان داد با اعمال سیاست‌هایی مانند افزایش راندمان آبیاری، کاهش سرانه مصرف و تغییر الگوی کشت، امکان رسیدن به تعادل در عرضه و تقاضای آب در حوضه حبله‌رود وجود دارد. البته لازم به ذکر است این تحقیق صرفاً برای بررسی سناریوهای مختلف و تأثیر

- content in the Pampas region using SWAT. *Catena* 137:298–309
- Hum NNMF, Abdul-Talib S (2016) Modeling optimal water allocation by managing the demands in Selangor. In: Proc. of International Symposium on Flood Research and Management (ISFRAM 2015), 5–6 Oct, Shah Alam, Malaysia, 93–104
- Kavian A, Golshan M, Rouhani H, Esmali Ouri A (2015) Simulation of runoff and sediment yield in Haraz River Basin in Mazandaran using SWAT model. *Physical Geography Research Quarterly* 47(2):197–211 (In Persian)
- Kermanshahi S, Davari K, Hasheminia S, Farid Hosseini A, Ansari H (2013) Using the WEAP model to assess the impact of irrigation water use management on water resources of Neyshabour Plane. *Journal of Water and Soil* 27(3):495–505 (In Persian)
- Kim KB, Kwon HH; Han D (2018) Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 556:194–210
- Lu Z, Zou S, Xiao H, Zheng C, Yin Z, Wang W (2015) Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 79:76–85
- Meaurio M, Zabaleta A, Uriarte JA, Srinivasan R, Antiguédad I (2015) Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. *Journal of Hydrology* 525:326–334
- Mehta VK, Haden VR, Joyce BA, Purkey DR, Jackson LE (2013) Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agricultural Water Management* 117:70–82
- Moazenzadeh R, Ghahraman B, Arshad S, Davary K (2016) Improving watershed modeling with aggregation of the main hydrological components in SWAT model. *Iran-Water Resources Research* 12(3):65–79 (In Persian)
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885–900
- Movahed Atar F, Samadi H (2013) Evaluation of Zayanderud Dam operation during drought period by using WEAP model. *Iranian Journal of Irrigation & Water Engineering* 4(14):18–28 (In Persian)
- Psomas A, Panagopoulos Y, Konsta D, Mimikou M (2016) Designing water efficiency measures in a
- Ahmadzadeh H, Morid S, Delavar M (2014) Evaluation yield of sunflower (Farrokh cultivar) under effects of conventional deficit irrigation and partial root zone drying. *Journal of Water and Soil* 28(5):876–889 (In Persian)
- Arnold JG, Srinivasan P, Muttiah RS, Williams JR (1998) Large area hydrologic modelling and assessment, Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73–89
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (1998) Sustainability criteria for water resource systems. Prepared by the Task Committee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and Management Division, American Society of Civil Engineers and the working group of UNESCO/IHP IV Project M-4.3
- Bagheri Harooni MH, Morid S (2013) Comparison of WEAP and MIKE BASIN models in water resources allocation (Case Study: Tlavar River). *Journal of Water and Soil Conservation* 20(1):151-167 (In Persian)
- Delavar M, Morid S, Nikbakht N (2011) Distributed snowmelt simulation in ungauged mountainous catchments, Case study: Imamzadeh Davoud Catchment. *Iran-Water Resources Research* 7(3):41–50 (In Persian)
- Donigian AS (2000) HSPF training workshop handbook and CD: Lecture 19, Calibration and verification issues, slide L19–22. US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.
- Du B, Ji X, Harmel RD, Hauck LM (2009) Evaluation of a watershed model for estimating daily flow using limited flow measurements. *Journal of the American Water Resources Association* 45(2):475–484
- Faiz MA, Liu D, Fu Q, Uzair M, Khan MI, Baig F, Li T, Cui S (2017) Stream flow variability and drought severity in the Songhua River Basin, Northeast China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, In Press:1–8
- Faramarzi M, Abbaspour KC, Schulin R, Yang H (2009) Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes* 23(3):486–501
- George B, Malano H, Davidson B, Hellegers P, Bharati L, Massuel S (2011) An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development. *Agricultural water management* 98(5):733-746
- Havrylenko SB, Bodoque JM, Srinivasan R, Zucarelli GV, Mercuri P (2016) Assessment of the soil water

- large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology* 401:145–153
- Wang X, Melesse AM (2005) Evaluation of the SWAT models snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the ASAE* 48(4):1–18
- Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A (2005) WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model Part 1: Model characteristics. *Water International* 30(4):487–500
- catchment in Greece using WEAP and SWAT models. *Procedia Engineering* 162:269–276
- Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, Mousavi SF, Heidarpour M, Jalalian A, Abbaspour KC (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
- Sauvage S, Oeurng C, Sanchez-Perez JM (2011) Assessment of hydrology, sediment and yield in