




## Accuracy assessment of groundwater recharge estimation using SWAT and MODFLOW in paddy fields (Case study: Astane-Kouchsefahan aquifer)

Iman Mehdidoost Roudbaneh<sup>1</sup> | Somaye Janatrostami<sup>2</sup> | Afshin Ashrafzadeh<sup>3</sup> | Saman Javadi<sup>4</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [iman.mehdidoost@gmail.com](mailto:iman.mehdidoost@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [ashrafzadeh@guilan.ac.ir](mailto:ashrafzadeh@guilan.ac.ir)
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [javadis@ut.ac.ir](mailto:javadis@ut.ac.ir)

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Article type:</b> Research Article</p> <p><b>Article history:</b></p> <p><b>Received:</b> Aug. 3, 2023</p> <p><b>Revised:</b> Oct. 23, 2023</p> <p><b>Accepted:</b> Nov. 20, 2023</p> <p><b>Published online:</b> Dec. 23, 2023</p> <p><b>Keywords:</b> Shallow Aquifer, Astane-Kouchsefahan, Water Balance, Surface Recharge, SWAT, MODFLOW.</p>	<p>In this study, the accuracy of estimating shallow aquifer recharge values in Astane-Kouchsefahan using two models: SWAT (a surface water hydrological model) and MODFLOW (a groundwater flow model) was evaluated. Then the need for using SWAT in the modeling of groundwater flow, which is typically done by MODFLOW, was evaluated. For this purpose, the simulation of the Astane-Kouchsefahan aquifer was done by MODFLOW using GMS graphical user interface. Then the SWAT model was built for the Astane-Kouchsefahan watershed and calibrated by the SUFI2 algorithm in SWAT-CUP software. In the following, after determining the two models' common spatial and temporal range, the aquifer recharge amounts were compared according to the outputs of the two models. MODFLOW results showed that the total aquifer recharges including recharge from the river in 1391-1392 were equal to 102.71 and 23.71 million m<sup>3</sup>, respectively. The highest and the lowest amounts of aquifer recharge occurred in December and April, respectively. The results of SWAT showed that the amounts of aquifer recharges including recharge from the river are estimated to be 138.34 and 35.09 million m<sup>3</sup>, respectively. So, the highest and the lowest recharge amount occurred in December and September, respectively. Based on the regional circumstances, SWAT offers more dependable estimates of the groundwater recharge parameters by considering surface water parameters and factors like the influence of dams and water transfer channels, soil characteristics, land use, climatic and meteorological data, and information regarding agriculture and irrigation management. Consequently, integrating the precise recharge results from SWAT into groundwater models such as MODFLOW leads to enhance and more reliable evaluations of the aquifer's state.</p>
<p>Cite this article: Mehdidoost Roudbaneh, I., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., &amp; Javadi, S. (2023) Accuracy assessment of groundwater recharge estimation using SWAT and MODFLOW in paddy fields (Case study: Astane-Kouchsefahan aquifer), <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 54 (10), 1541-1564. <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363264.669547">https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363264.669547</a></p> <p>© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.</p> <p>DOI: <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363264.669547">https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363264.669547</a></p>	

## ارزیابی دقت برآورد تغذیه آب زیرزمینی توسط SWAT و MODFLOW در اراضی شالیزاری (مطالعه موردی: آبخوان آستانه-کوچصفهان)

ایمان مهدی دوست رودبند<sup>۱</sup> | سمیه جنت‌رستمی<sup>۲</sup> | افشین اشرف‌زاده<sup>۳</sup> | سامان جوادی<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [iman.mehdidoost@gmail.com](mailto:iman.mehdidoost@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [ashrafzadeh@guilan.ac.ir](mailto:ashrafzadeh@guilan.ac.ir)

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [javadis@ut.ac.ir](mailto:javadis@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این مطالعه، دقت برآورد مقادیر تغذیه آبخوان کم عمق آستانه-کوچصفهان، با استفاده از دو مدل سازی SWAT (به عنوان مدل هیدرولوژیکی آب سطحی) و MODFLOW (به عنوان مدل آب زیرزمینی) مقایسه شد. علاوه بر این، ضرورت استفاده از SWAT در مدل سازی‌های جریان آب زیرزمینی که توسط MODFLOW انجام می‌گیرد، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور شبیه سازی آبخوان آستانه-کوچصفهان در MODFLOW انجام شد. سپس برای حوضه آبریز آستانه-کوچصفهان تهیه و اجرا شد و توسط الگوریتم SUFI2 در نرم افزار SWAT-CUP مورد واسنجی قرار گرفت. در ادامه بعد از تعیین محدوده مکانی و زمانی مشترک دو مدل، اقدام به استخراج مقادیر تغذیه به آبخوان از خروجی‌های دو مدل گردید. نتایج نشان داد که کل تغذیه به آبخوان و تغذیه از رودخانه به آبخوان در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ در MODFLOW به ترتیب برابر با ۱۰۲/۷۱ میلیون متر مکعب و ۲۳/۷۱ میلیون متر مکعب بدست آمد. بیشترین مقادیر تغذیه در اواخر فصل پاییز و ماه آذر ۱۳۹۱ رخ داده است و کمترین مقادیر تغذیه در اوایل فصل بهار و ماه فروردین ۱۳۹۲ اتفاق افتاده است. در SWAT نیز مقادیر تغذیه به آبخوان و تغذیه از رودخانه به آبخوان به ترتیب برابر با ۱۳۸/۳۴ میلیون متر مکعب و ۳۵/۰۹ میلیون متر مکعب برآورد شده است. بیشترین مقادیر تغذیه در اواخر فصل پاییز و ماه آذر ۱۳۹۱ رخ داده است و کمترین مقادیر تغذیه در اواخر فصل تابستان و ماه شهریور ۱۳۹۲ اتفاق افتاده است. SWAT با استفاده از به کارگیری پارامترهای آب سطحی و موثر بر تغذیه مانند تاثیر سد و کانال‌های انتقال آب، خصوصیات خاک و کاربری اراضی، اطلاعات اقلیمی و هواشناسی، اطلاعات مربوط به مدیریت کشاورزی و آبیاری و غیره مقادیر قابل اطمینان تری از پارامتر تغذیه به آب زیرزمینی را با توجه به واقعیت‌های موجود در منطقه، به دست می‌آورد، لذا استفاده از خروجی قابل اطمینان تغذیه از SWAT در مدل‌های آب زیرزمینی مانند MODFLOW نتایج بهتر و قابل اطمینان تری از وضعیت آبخوان می‌دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۹	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۱	
واژه‌های کلیدی: آبخوان کم عمق، آستانه-کوچصفهان، گیلان آب، تغذیه سطحی، SWAT، MODFLOW	

استاد: مهدی دوست رودبند؛ ایمان، جنت‌رستمی؛ سمیه، اشرف‌زاده؛ افشین، جوادی؛ سامان، (۱۴۰۲) ارزیابی دقت برآورد تغذیه آب زیرزمینی توسط SWAT و MODFLOW در اراضی شالیزاری (مطالعه موردی: آبخوان آستانه-کوچصفهان)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۰)، ۱۵۴۱-۱۵۴۴.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363264.669547>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363264.669547>

## مقدمه

آب‌های زیرزمینی منابعی هستند که در جایی به نام آبخوان ذخیره می‌شوند. منبع اصلی آب‌های زیرزمینی، بارندگی است. رودخانه‌ها، نهرها، آب برگشتی آبیاری و غیره از منابع دیگر تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند. امروزه با افزایش نیازهای آبی و محدودیت منابع آب موجود، توسعه و استفاده از آب‌های زیرزمینی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، برای کشاورزی، صنعت و تامین آب افزایش یافته است (Loukika et al., 2020). بنابراین، استفاده مناسب از منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب قابل دسترس، لازم و ضروری است. در این راستا، استفاده از مدل‌های کامپیوتری به منظور مدل‌سازی آب زیرزمینی و تخمین تغذیه آب زیرزمینی در فرآیند تصمیم‌گیری و نحوه مدیریت منابع آب، اهمیت بیشتری یافته است.

برای بهره‌برداری بهینه از آب‌های زیرزمینی و سطحی، نیاز به تخمین تغذیه آب زیرزمینی برای مدیریت پایدار آب وجود دارد. علاوه بر این، تخمین قابل اطمینان تغذیه آبخوان در مدل‌های عددی آب زیرزمینی و مدیریت منابع آب تاثیر قابل توجهی در نتایج مدل‌سازی دارد (نظریه و همکاران، ۱۳۹۷). برای تعیین تغییرات سالانه و دهه‌ای تغذیه آب‌های زیرزمینی، تاکنون چندین روش مانند Hydrus 1D در مقیاس‌های کوچک‌تر ارائه شد (Guzman et al., 2015)، در حالی که برای مقیاس‌های مکانی-زمانی، مدل‌سازی عددی توسعه داده شده است. مقادیر تغذیه آب زیرزمینی از نظر زمانی و مکانی مستقل از فرآیندهای هیدرولوژیکی سطحی نیست و با تغییر عواملی نظیر شرایط آب و هوایی، کاربری اراضی، خاک، پوشش گیاهی تغییر می‌کنند (Kim et al., 2008). قابلیت اعمال این عوامل در مدل‌هایی که جهت شبیه‌سازی آب زیرزمینی به کار می‌روند، وجود ندارد و در اغلب موارد تنها تأثیر بارش را در نظر گرفته و تغذیه را به صورت درصدی از بارندگی به مدل وارد می‌کنند و در طی واسنجی مدل مقادیر تغذیه را واسنجی می‌کنند (Dekongmen et al., 2022). برای تخمین مقادیر تغذیه آب‌های زیرزمینی معمولاً از اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده می‌شود، اما اغلب این اندازه‌گیری‌ها ناقص یا بیش از حد نامنظم و دارای توزیع مکانی بدون قاعده‌ای در یک سیستم آبخوان هستند (Crosbie et al., 2018).

## پیشینه مطالعات

اخیراً، مدل‌های پیشرفته‌ای از جمله مدل SWAT MODFLOW فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> (AHP) (Dar et al., 2020; Das and Mukhopadhyay, 2018) ، سنجش از دور و GIS (Adeyeye et al., 2019; Arnous et al., 2020; Berhanu and Hatiye, 2020) و شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> (ANN) (Naghibi et al., 2018) برای مدل‌سازی تغذیه آب‌های زیرزمینی و تعیین مناطق تغذیه بالقوه توسعه یافته‌اند. مدل SWAT<sup>۳</sup> مدلی در مقیاس حوضه آبریز است که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی - کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی شده است. این مدل توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری شده است (Neitsch et al., 2011). این مدل، یک مدل نیمه توزیعی است که ماژولی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی دارد ولی از آنجایی که این ماژول براساس مدل‌های یکپارچه<sup>۴</sup> پایه‌گذاری شده است، قابلیت بیان پارامترهای توزیعی همچون ضریب هدایت هیدرولیکی را ندارد، بنابراین عدم قطعیت قابل ملاحظه‌ای را در نتایج مدل شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی ایجاد می‌کند (Kim et al., 2008). (Awan and Ismaeel, 2014) با استفاده از مدل SWAT میزان تغذیه را در مناطق تحت آبیاری در حوضه‌ی اینداس<sup>۵</sup> در قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا تخمین زدند که میانگین کل تغذیه سالانه آب زیرزمینی به آبخوان ۵۳۷ میلی متر (±۵۵ میلی‌متر) بود که حداکثر آن در ماه جولای (۱۵۱ میلی‌متر) اتفاق افتاد، همچنین تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم را بر روی میزان تغذیه‌ی آب زیرزمینی با استفاده از مدل SWAT بررسی کردند. (Gemtzi et al, 2017) در حوضه‌ای در شمال شرقی یونان، از مدل SWAT برای برآورد تغذیه‌ی آب زیرزمینی استفاده کردند و سپس با استفاده از مدل تهیه شده، اثرات تغییر اقلیم را در منطقه مورد بررسی قرار دادند. (Doble et al, 2017) در نواحی جنوب استرالیا و ویکتوریای غربی که دارای آبخوان‌های کم عمق می‌باشند، اقدام به شبیه‌سازی تغذیه و تبخیر- تعرق با استفاده از مدل SVAT<sup>۶</sup> و MODFLOW کردند. MODFLOW یک مدل سه بعدی تفاضل محدود جریان

1 Analytical Hierarchy Process

2 Artificial Neural Networks

3 Soil and Water Assessment Tool

4 lumped Models

5 Indus Basin

6 Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer



آب زیرزمینی است که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا ارائه گردید (Mc Donald and Harbaugh, 1988). کاربرد مدل MODFLOW در راستای توصیف و پیش‌بینی رفتار سامانه‌های آب زیرزمینی در سال‌های اخیر توسعه بسیاری داشته است (Loukika et al., 2020).

Kim et al (2008). با هدف اتصال آب زیرزمینی با آب سطحی و با بیان این مطلب که تغذیه آب زیرزمینی به طور مستقیم با بارش، تبخیر-تعرق و رواناب سطحی در ارتباط هستند، یک مدل ترکیبی به صورت SWAT-MODFLOW ارائه دادند که قادر به توصیف تغذیه آب زیرزمینی توزیع شده و تبخیر-تعرق از سطح آن می‌باشد. (Chung et al (2010). نیز جهت ارزیابی نرخ تغذیه آب زیرزمینی توزیع شده در سطح حوضه‌ای در کره جنوبی از مدل ترکیبی آب زیرزمینی و آب سطحی SWAT-MODFLOW استفاده نمودند. (Bailey et al (2016). با استفاده از این مدل، الگوهای زمانی و مکانی را در برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات مکانی بالا در تخلیه آب زیرزمینی برهمکنشی در آب سطحی و زیرزمینی ندارد. به نحوی که میانگین دبی سالانه آب زیرزمینی ۲۰/۵ متر مکعب بر ثانیه است که حداکثر و حداقل آن به ترتیب در ماه‌های سپتامبر تا اکتبر و مارس تا آوریل رخ می‌دهد. نرخ‌های متوسط سالانه تقریباً ۰/۰۲ متر مکعب بر ثانیه در سال در طول دوره ۳۴ ساله افزایش می‌یابد که در مقایسه با میانگین سالانه ناچیز است. (Mosase et al (2019). پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی را در حوضه رودخانه‌ای در زیمبابوه با استفاده از SWAT-MODFLOW مدل‌سازی کردند، در این مطالعه در طول دوره ۳۰ ساله‌ی مورد مطالعه، ماه‌های تابستان با میانگین ۱۴۷ میلی‌متر در سال بیشترین میزان تغذیه آب زیرزمینی را در حوضه داشتند، پس از آن پاییز با میانگین ۲۷ میلی‌متر در سال، بهار با ۳/۲ میلی‌متر در سال و زمستان با کمترین تغذیه فصلی با ۰/۳ میلی‌متر در سال قرار داشتند. (Loukika et al (2020). نرخ تغذیه آب زیرزمینی را با استفاده از این مدل شبیه‌سازی کردند به نحوی که برآورد تغذیه آب زیرزمینی در ماه ژانویه ۱۶/۵۲۷۲ میلی‌متر و در ماه فوریه ۱۷/۵۵۹۶ میلی‌متر بوده است. سعادت پور و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از مدل SWAT-MODFLOW مدل‌سازی آب سطحی و زیرزمینی در سیستم کشاورزی آبی دشت نیشابور انجام دادند. در این مطالعه مقادیر تغذیه ورودی به مدل MODFLOW با استفاده از مدل SWAT محاسبه شد که بیشترین نرخ نفوذ در ماه‌های اسفند و بهمن و کمترین نرخ نفوذ در ماه‌های شهریور و مهر به دست آمد، همچنین نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، ضرایب  $R^2$ ،  $r$ -factor،  $p$ -factor و NS که به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب به کار برده شد، در خروجی حوضه به ترتیب حدود ۰/۳۶، ۰/۲۱، ۰/۸۵ و ۰/۸۴ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۸۳، ۰/۷۰ و ۰/۶۵ بوده است. رجا و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از مدل SWAT-MODFLOW در مدل‌سازی آب سطحی و زیرزمینی دشت مهاباد، بیلان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای تعیین مقادیر آبیاری که به نوع کاربری اراضی، تغذیه ناشی از نفوذ عمقی بارندگی و آب آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی وابسته بود، از مدل SWAT استفاده کردند. در این مطالعه نتایج معیار RMSE برای تراز سطح ایستابی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب مقدار خطای ۰/۳۵ و ۰/۳۴ متر به دست آمد. همچنین، نتایج معیارهای  $R^2$  و NSE نیز برای دوره واسنجی ۰/۹۴ و ۰/۹۱ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۹۳ و ۰/۸۹ برآورد شد که مؤید آن است که مدل به‌خوبی واسنجی شده و قادر بوده نوسانات سطح آب زیرزمینی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند، همچنین، فعل‌وانفعالات بین منابع آب سطحی و زیرزمینی بین سال‌های آبی از حدود ۳۰ تا ۵۰ میلیون متر مکعب متغیر است که نشان‌دهنده اندرکنش قابل‌توجه بین این منابع است.

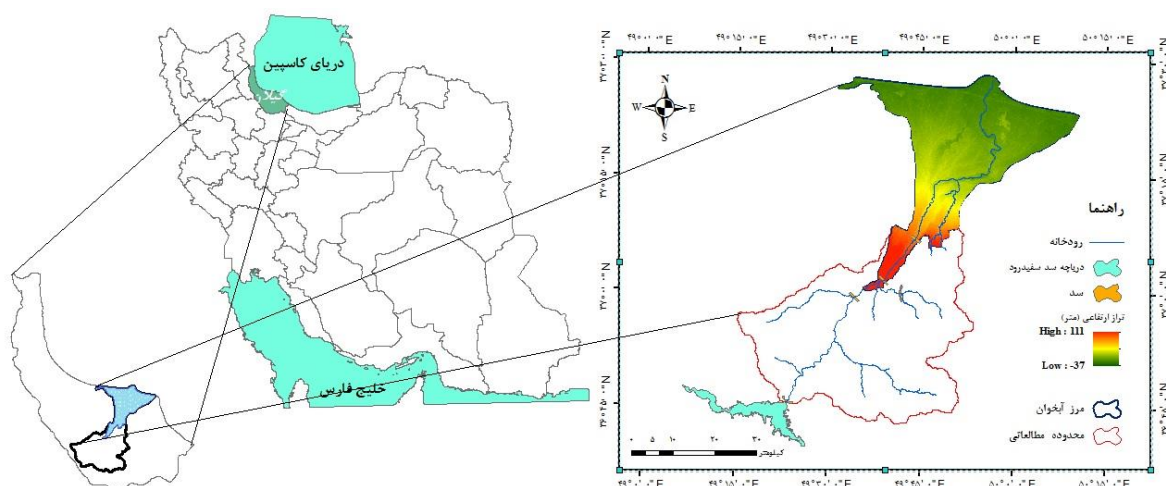
با توجه به نقش مهم رواناب تولیدی در رودخانه‌ها و مناطق پست حوضه‌های آبریز بر روی تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های کم عمق، ارزیابی جامع شرایط هیدرولوژیکی ضروری است (Bizhanimanzar et al., 2020). فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز سفره‌های کم عمق با اقلیم معتدل می‌تواند به دلیل فعل و انفعالات پیچیده آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی پیچیده باشد، بنابراین اطلاعات دقیق بیلان آب هیدرولوژیکی لازمه توسعه شیوه‌های مدیریتی برای استفاده پایدار از منابع آب است (Waseem et al., 2020). مداخلات انسانی مانند کاربری زمین، زهکشی مصنوعی، برداشت GW از طریق پمپ‌ها، سازه‌های هیدرولیکی رودخانه و غیره نیز بر بیلان طبیعی آب در آبخوان‌های کم عمق تاثیر می‌گذارد. درک تبادلات افقی و عمودی آب بین سیستم‌های سطحی و زیرسطحی بسیار مهم است و شاید سخت‌ترین بخش فرآیند مدل‌سازی باشد (Ntona et al., 2022). از آنجا که، MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی فقط در منطقه اشباع محدود شده است و محاسبات ناحیه غیراشباع باید قبل از توسعه مدل MODFLOW به طور جداگانه انجام شود. در این مطالعه، به دلیل اینکه مدل SWAT، عوامل موثر بر تغذیه آب زیرزمینی را در نظر می‌گیرد و در معادله بیلان آب زیرزمینی، پارامتر تغذیه شامل هر گونه تغذیه سطحی از جمله تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی، تغذیه از بارندگی، تغذیه از رودخانه‌ها و رواناب‌های

سطحی است، اقدام به برآورد و مقایسه‌ی تغذیه به آبخوان آستانه- کوچصفهان توسط دو مدل SWAT و MODFLOW شد که به ترتیب دو مدل آب سطحی و آب زیرزمینی می‌باشند.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی آستانه - کوچصفهان در شمال ایران و در استان گیلان قرار دارد. وسعت محدوده مطالعاتی برابر ۲۵۸۱/۴۷ کیلومترمربع است که ۳۸/۵ درصد آن دشت و مابقی مربوط به مناطق کوهستانی است (شکل ۱). آبخوان آبرفتی آستانه - کوچصفهان در ناحیه‌ی دشت محدوده‌ی مطالعاتی قرار گرفته است. ضخامت آبرفت و ضریب قابلیت انتقال آبخوان به ترتیب از ۵ تا ۲۰۰ متر و ۶۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمربع در روز متغیر است (بی نام، ۱۳۹۳). رودخانه سفیدرود مهم‌ترین رودخانه این منطقه محسوب می‌گردد. ارتفاع بارندگی در سال آبی مورد مطالعه (سال ۹۲-۱۳۹۱) بنابر گزارشهای آب منطقه‌ای استان در محدوده مطالعاتی برابر ۸۹۹ میلی‌متر می‌باشد. مقدار آن در پهنه‌های کوهستانی و دشت به ترتیب برابر ۷۸۶ و ۱۰۷۹/۴ میلی‌متر برآورد گردیده است. متوسط درجه حرارت سالانه محدوده مطالعاتی آستانه - کوچصفهان در سال ۱۳۹۱-۹۲ برابر ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، حداقل و حداکثر مطلق درجه حرارت محدوده به ترتیب برابر ۱- و ۳۴/۴ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شده است. متوسط درجه حرارت سالانه کوهستان و دشت در این سال به ترتیب ۱۰ و ۱۸/۳ درجه سانتیگراد می‌باشد. متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل اصلاح شده سالانه کوهستان و دشت به ترتیب برابر ۷۰۲/۸ و ۹۵۷/۸ میلی‌متر می‌باشد (بی نام، ۱۳۹۳).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

### MODFLOW

MODFLOW یک مدل سه بعدی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با روش تفاضل محدود است. اطلاعات و داده‌های ورودی به مدل شامل داده‌های فیزیک و هندسه آبخوان، داده‌های مربوط به مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان، داده‌های مربوط به تغذیه آبخوان، داده‌های مربوط به منابع مصارف و بهره‌برداری و داده‌های مربوط به سنجش و پایش می‌شود.

در بخش داده‌های مربوط به فیزیک و هندسه آبخوان، مرز مدل (آبخوان)، تراز ارتفاعی سطح زمین، تراز سنگ کف و تراز سطح آب زیرزمینی مشخص می‌شود. مرز آبخوان آستانه - کوچصفهان با توجه به توزیع مکانی چاه‌های مشاهده‌ای برای پایش سطح آب زیرزمینی و اطلاعات سنگ کف و مطالعات پیشین و اطلاعات گزارشات آب منطقه‌ای استان، در نظر گرفته شد که مساحت آن ۷۶۳/۲ کیلومترمربع می‌باشد. برای تعیین تراز ارتفاعی سطح زمین با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی<sup>۱</sup> (DEM) با دقت مکانی ۳۰ متر که توسط ماهواره‌ی SRTM<sup>۲</sup> ناسا تهیه شده، استفاده شد. آبخوان دشت آستانه- کوچصفهان به صورت دو لایه آزاد و تحت فشار است، اما با توجه به هدف

1 Digital elevation model

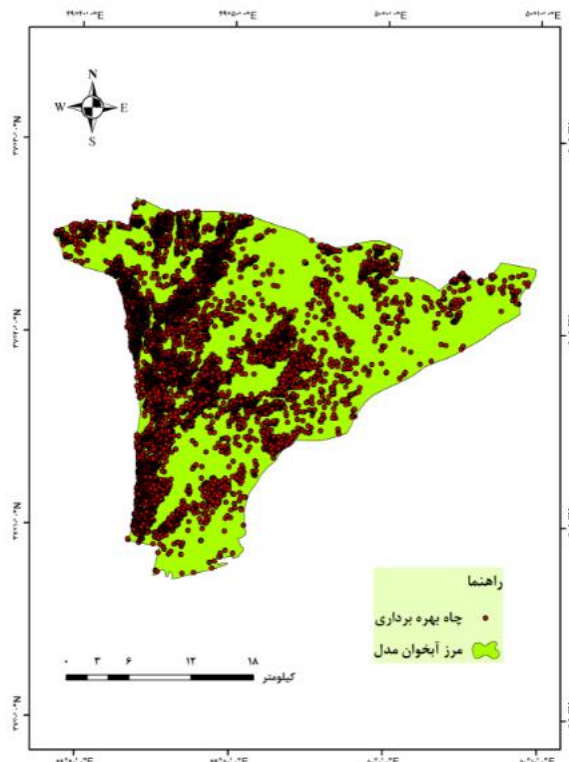
2 Space Shuttle Radar Topography Mission

مطالعه که برآورد تغذیه‌ی سطحی به آبخوان می‌باشد، آبخوان به صورت یک لایه و آزاد در نظر گرفته شد و تراز کف این لایه به عنوان تراز سنگ کف لحاظ شد.

در بخش داده‌های مربوط به مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان، ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب آبدهی ویژه و تخلخل کل آبخوان تعیین می‌شود. در این مطالعه، مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی با توجه به اطلاعات چاه‌های اکتشافی و آزمایش‌های پمپاژ و گزارش‌های آب منطقه‌ای استان تعیین شد و در طی مدل‌سازی به عنوان یکی از پارامترهای واسنجی با توجه به شرایط منطقه بررسی و اصلاح شد. ضریب آبدهی ویژه و تخلخل کل آبخوان از عوامل مهم تخلیه و تغذیه در هر آبخوان است که با بررسی مطالعات پیشین و گزارش‌های موجود از آزمایش‌های پمپاژ، برای ضریب آبدهی ویژه مقدار  $0/3$  و برای تخلخل آبخوان مقادیر  $0/02$  تا  $0/25$  در نظر گرفته شد (بی‌نام، ۱۳۸۵).

در بخش داده‌های مربوط به تغذیه آبخوان، نفوذ از طریق بارش موثر، آب برگشتی از چاه‌های پمپاژ و نفوذ از آب‌بندان تعیین می‌شود. برای تعیین بارش موثر از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک داخل و اطراف محدوده مرز آبخوان استفاده شد و در ادامه با توجه به روش فائو در محاسبه نفوذ از بارش و همچنین نظرات کارشناسی در منطقه، ۱۵ درصد بارش به عنوان مقدار اولیه نفوذ از بارش در نظر گرفته شد. مقدار آب برگشتی از چاه‌های پمپاژ در منطقه با توجه به نوع مصرف،  $0/35$  برای چاه‌های کشاورزی و  $0/5$  برای چاه‌های شرب و صنعت در نظر گرفته شد. میزان نفوذ از آب‌بندان‌ها به عنوان تغذیه از سطح با توجه به نظر کارشناسی و سعی و خطا مقدار  $0/0005$  متر بر روز در نظر گرفته شد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان). برای اعمال تغذیه از سطح به آبخوان در مدل، پارامترهای نفوذ از بارش، آب برگشتی از چاه‌های تخلیه و نفوذ از آب‌بندان‌ها به صورت مکانی در GIS با هم جمع و به عنوان تغذیه از سطح به مدل اعمال شد.

در بخش داده‌های مربوط به منابع مصارف و بهره‌برداری، مقادیر چاه‌های بهره‌برداری، چشمه‌های آبرفتی و قنوات وارد مدل می‌شود که تعداد چاه‌های بهره‌برداری مجاز و غیرمجاز در محدوده‌ی مدل ۸۹۵۳ حلقه چاه می‌باشد. همچنین می‌توان عمق تراوش<sup>۱</sup> آب در چاه را به مدل معرفی کرد، برای این منظور باید دو تراز بالایی و کف اسکرین را برای هر چاه مشخص و به مدل وارد کرد. پراکنش مکانی چاه‌های بهره‌برداری در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- پراکنده‌گی مکانی چاه‌های بهره‌برداری در محدوده‌ی آبخوان مورد مطالعه



با توجه به موقعیت محدوده مدل، مشخصات رودخانه‌ها و زهکش‌ها از دیگر داده‌های ورودی به مدل است. در محدوده‌ی مدل دو رودخانه‌ی اصلی و دائمی سفیدرود و دیسامرود وجود دارند. برای اعمال این رودخانه‌ها به مدل به پارامترهای قابلیت انتقال کف رودخانه و سطح آب رودخانه و تراز کف رودخانه نیاز می‌باشد. قابلیت انتقال کف رودخانه از گزارشها و مدل‌سازی‌های قبلی و اطلاعات موجود، به عنوان ورودی اولیه قرار داده شد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان) و برای پارامتر تراز کف رودخانه و سطح آب آن نیز از نقشه‌های پروفیل رودخانه و منحنی‌های دبی-اشل که از آب منطقه‌ای گیلان اخذ گردید، استفاده شد. برای اعمال زهکش در مدل به پارامترهای قابلیت انتقال پوشش اطراف زهکش و تراز کف زهکش و مقدار درصد آب برگشتی به آبخوان نیاز می‌باشد. قابلیت انتقال پوشش اطراف زهکش از گزارشات و مدل‌سازی‌ها و کارهای صورت گرفته‌ی پیشین به عنوان ورودی اولیه قرار داده شد و برای پارامتر تراز کف زهکش نیز از داده‌های طراحی این زهکش‌ها که از گزارش مطالعات بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان اخذ گردید، استفاده شد (بی نام، ۱۳۸۳). میزان درصد آب برگشتی به آبخوان نیز با توجه گزارش راهنمای مربوط به ضریب زهکشی زیرزمینی برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شد (بی نام، ۱۳۸۸).

اگر سطح آب زیرزمینی از یک حدی بالاتر رود و به سطح زمین نزدیک‌تر شود تحت تاثیر تشعشعات خورشیدی بخشی از آن تبخیر می‌گردد. برای اعمال تبخیر-تعرق به مدل، سه پارامتر نرخ حداکثر تبخیر و تعرق، حداکثر عمقی که در آن تبخیر-تعرق رخ می‌دهد و تراز ارتفاعی حداکثر تبخیر بر اساس گزارش بیلان آب زیرزمینی آب منطقه‌ای تعیین شد. از آمار و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای برای تهیه شبکه جریان، هیدروگراف معرف دشت و مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده می‌گردد. در واقع از سطح آب اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای برای واسنجی مدل آب زیرزمینی استفاده شد. مشخصات چاه‌ها و مقادیر قرائت شده‌ی اصلاح شده‌ی آن‌ها که در واقع برای روز ۱۵ هر ماه سطح آب اصلاح شده از آب منطقه‌ای استان گیلان اخذ گردید که بعد از بررسی و بازبینی مجدد (مانند ترسیم هیدروگراف هر چاه و بررسی آن) تعداد ۳۷ حلقه چاه مشاهده‌ای در محدوده‌ی آبخوان که پراکندگی نسبتاً مناسبی هم دارند انتخاب و لحاظ گردید و به فرمت مناسب GMS در آمد.

حل معادلات دیفرانسیل جزئی آب‌های زیرزمینی از طریق عددی، مستلزم تعیین شرایط مرزی از نظر هیدرولیکی و مقادیر اولیه می‌باشد. در این مطالعه بر اساس مطالعات پیشین و بررسی‌های صورت گرفته، مرزهای ورودی و خروجی در جنوب و شمال آبخوان به صورت مرز با بار هیدرولیکی مشخص<sup>۱</sup> و مرزهای شرقی و غربی به صورت مرزهای ناتراوا اعمال شد. لازم به ذکر است که سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ دوره شبیه‌سازی و مهر سال ۱۳۹۱ به عنوان ماه شروع شبیه‌سازی انتخاب شد. در آبخوان آستانه - کوچصفهان با توجه به وسعت آبخوان، اطلاعات پایه، فاصله منحنی‌های تراز و جهت جریان، ابعاد شبکه بطور یکنواخت ۲۵۰ متر در ۲۵۰ متر در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، سفره آب زیرزمینی آستانه - کوچصفهان به ۱۲۴۸۴ سلول تقسیم گردید که در محیط نرم‌افزار GMS مدل‌سازی حالت ماندگار و غیرماندگار انجام شد.

به دلیل عدم شناخت کافی ضرائب هیدرودینامیکی آبخوان، عدم دقت در داده‌های ورودی تغذیه و تخلیه به سیستم و عدم تعریف مناسب شرایط مرزی اولیه، ممکن است مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای مطابقت نداشته باشد. در این مطالعه مقدار تغذیه سطحی، ضریب آبدی ویژه و ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان مانند هدایت هیدرولیکی برای واسنجی مدل استفاده شد. از معیارهای میانگین خطا<sup>۲</sup> (ME)، میانگین خطای مطلق<sup>۳</sup> (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> (RMSE) برای ارزیابی مدل استفاده شد.

## SWAT

SWAT، مدلی برای روندیابی فرآیندهای هیدرولوژیکی اصلی شامل رواناب سطحی، رسوب، تبخیر - تعرق، نفوذ عمقی، جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیر سطحی است که به منظور مدل‌سازی مدیریت آب، سموم و رسوب در مقیاس حوضه استفاده می‌شود. اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در این مدل برای این مطالعه، شامل نقشه رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، داده‌های اقلیمی و هواشناسی در مقیاس روزانه، اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری، اطلاعات سازه‌های آبی موجود در ناحیه مانند سد و کانال‌های انتقال آب و اطلاعات مربوط به مدیریت کشاورزی و آبیاری در ناحیه می‌باشند.

در این مطالعه برای تهیه نقشه‌ی کاربری اراضی از نقشه‌ی کاربری اراضی ایران (شرکت سهامی آب منطقه‌ای، ۱۳۹۲) استفاده

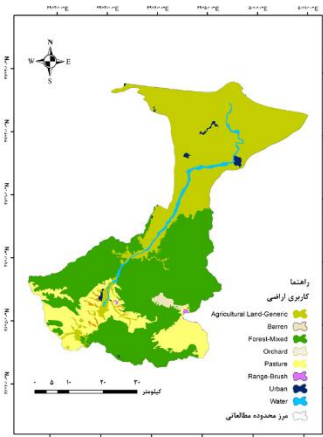
1 General Head

2 - Mean Error (ME)

3 Mean Absolute Error (MAE)

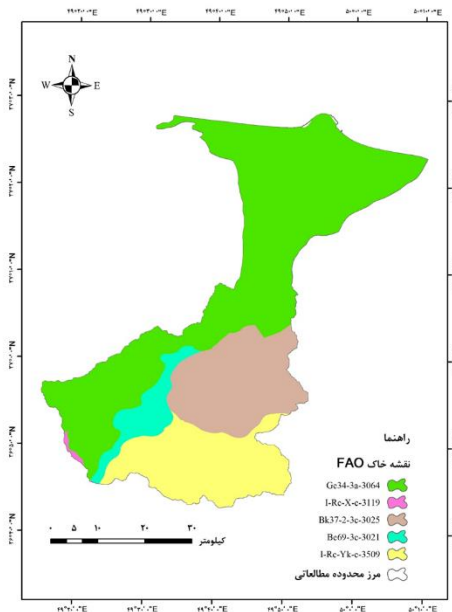
4 - Root Mean Squared Error (RMSE)

شد که مشخصات هر یک از کاربری‌های اراضی حوضه در شکل ۳ آورده شده است. مشابه نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک برگرفته از نقشه جهانی خاک که توسط فائو تهیه شده، نیز به پایگاه داده مدل داده می‌شود (شکل ۴).



مساحت (درصد)	نام کاربری در مدل SWAT	نوع کاربری اراضی
۱۸/۶۹	AGRL	Agricultural Land-Generic
۷/۰۵	BARR	Barren
۵۹/۲۶	FRST	Forest-Mixed
۰/۵۰	ORCD	Orchard
۱۷/۴۴	PAST	Pasture
۰/۱۷	RNGB	Range-Brush
۰/۲۹	URBN	Urban
۲/۵۹	WATR	Water

شکل ۳- کاربری اراضی حوضه مطالعاتی آستانه - کوچصفهان (شرکت سهامی آب منطقه‌ای)



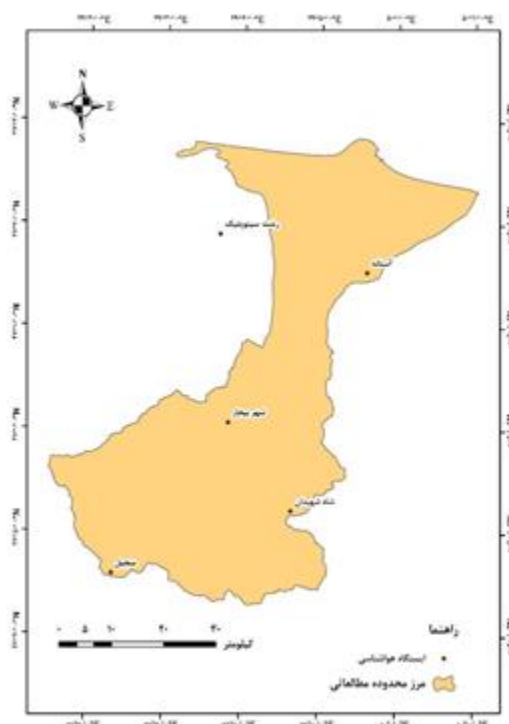
نام خاک در مدل SWAT	نوع خاک	گروه هیدرولوژیکی	تعداد لایه	درصد شن		درصد سیلت		درصد رس		مساحت (درصد)
				لایه اول	لایه دوم	لایه اول	لایه دوم	لایه اول	لایه دوم	
Bk37-2-3c-3025	LOAM	D	۲	۳۶	۳۶	۳۶	۲۸	۲۸	۲۵/۰۱	
Ge34-3a-3064	CLAY-LOAM	C	۲	۲۹	۲۵	۲۲	۲۲	۴۲	۴۲/۲۵	
I-Rc-X-c-3119	LOAM	D	۲	۴۰	۴۰	۲۶	۲۹	۳۹	۰/۳۰	
Be69-3c-3021	CLAY-LOAM	C	۲	۲۹	۳۱	۲۲	۲۹	۳۹	۷/۴۴	
I-Rc-Yk-c-3509	LOAM	D	۲	۲۵	۳۱	۳۹	۳۰	۲۹	۲۵/۰۰	

شکل ۴- نقشه خاک (Soil) حوضه مطالعاتی آستانه کوچصفهان (شرکت سهامی آب منطقه‌ای)

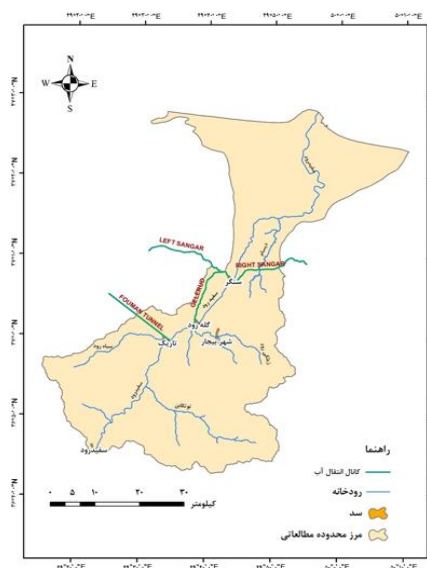
برای ورود داده‌های اقلیمی به مدل، در منطقه‌ی مورد مطالعه طبق آمار و گزارشات آب منطقه‌ای در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ بعد از بررسی داده‌های موجود در ایستگاه‌ها، ۴ ایستگاه هواشناسی آستانه، شهر بیجار، منجیل و شاه شهیدان انتخاب شدند همچنین ایستگاه سینوپتیک رشت با وجود قرار گرفتن در بیرون حوضه‌ی مطالعاتی، ولی نزدیک به مرز حوضه و داشتن سال‌های آماری طولانی و مناسب، برای ساخت پارامترهای مولد داده‌های اقلیمی انتخاب شد (شکل ۵). با توجه به اینکه در زمان تعیین شده‌ی شبیه‌سازی مدل، سد مخزنی سفیدرود در حال بهره‌برداری بود، اطلاعات مورد نیاز این سد نیز به مدل داده شد. در واقع در این مطالعه برای وارد کردن اطلاعات سد به مدل SWAT با توجه به اینکه مخزن سد در مرز بالادست و خارج از حوضه قرار گرفته است و خروجی از حوضه‌های بالاتر قابل شبیه‌سازی نیست، اطلاعات دبی‌های خروجی از سد به صورت روزانه بر حسب متر مکعب بر ثانیه که از آب منطقه‌ای استان اخذ شده است، به صورت ورودی Inlet در مکان سد در مرز بالادست حوضه، به مدل داده شده است. علاوه بر این، رودخانه سفیدرود بعد از محل سد سفیدرود با دبی کنترل شده رو به سمت شمال جاری و پس از دریافت رودخانه توتکابن، در محل سد انحرافی تاریک، توسط سد تغییر ارتفاع یافته و قسمتی از جریان آن توسط تونل آب بر فومن منحرف می‌شود. پس از سد تاریک رودخانه به سمت شمال جاری و در محل امامزاده هاشم



با دریافت رودخانه‌های زیلکی رود و چند رودخانه دیگر حجم رود مقداری افزایش و توسط سد انحرافی گله‌رود قسمتی از جریان آن به تصفیه خانه آب رشت منتقل و مابقی به سمت شمال جریان می‌یابد. در محل سد سنگر ارتفاع آب افزایش و بعد از آن رودخانه دیسام به آن می‌پیوندد. حجم قابل توجهی از آب رودخانه سفیدرود توسط کانال آب بر راست سنگر و چپ سنگر منحرف می‌شود که زمین‌های کشاورزی دو سمت شرقی و غربی رودخانه سفیدرود را آبیاری می‌نماید (شکل ۶). بنابراین، اطلاعات چهار کانال انتقال آب تونل آب بر فومن، کانال گله‌رود و کانال چپ و راست سنگر، که در واقع آب را از رودخانه‌ی سفیدرود به نوعی خارج می‌کنند، به مدل داده شد. به این صورت که مکان هر کانال بر روی رودخانه‌ی سفیدرود توسط منابع نقطه‌ای<sup>۱</sup> مشخص شد و دبی هر کانال به صورت متر مکعب بر روز و به صورت منفی به پوینت سورس‌ها داده شد.



شکل ۵- موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی به کار برده شده در مدل SWAT



شکل ۶- موقعیت کانال‌ها و سدهای انحرافی منطقه‌ی مطالعاتی آستانه - کوچصفهان

کشاورزی کاربری غالب در محدوده دشت آستانه - کوچصفهان است و از آنجایی که فرآیندهایی که اجزای بیلان آب را تعیین می‌کنند، تحت تأثیر مدیریت کشاورزی می‌باشند، اعمال مدیریت کشاورزی و آبیاری این مناطق اهمیت دارد. به این دلیل که در نظر گرفتن تمامی محصولات کشاورزی ناحیه مورد مطالعه در فرآیند شبیه‌سازی مدل به دلیل مشخص نبودن موقعیت مکانی و برنامه کشاورزی امکان پذیر نیست، محصول غالب محدوده مطالعاتی برای کشت آبی که برنج می‌باشد، در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب محصول برنج، سطح زیرکشت و تناوب کشت ثابت در طی دوره شبیه‌سازی مدل می‌باشد. به عبارت دیگر این محصول در فصل کشت مورد نظر بیشترین سطح زیرکشت را داشته و به صورت ثابت در هر سال کشت شده است. نکته مهم دیگر برای شبیه‌سازی واقعی‌تر، استفاده از برنامه مدیریت آبیاری محدوده مطالعاتی است. برای برنامه‌ی کاشت و آبیاری محصول برنج در منطقه‌ی مطالعاتی از نظر کارشناسان و گزارش‌های موجود از جهاد کشاورزی و همچنین از نرم افزار NETWAT که نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران را به تفکیک محصولات و دشت‌های مختلف ارائه می‌دهد، استفاده شد. برای اعمال کودهای مورد استفاده در کشت برنج نیز از نظر کارشناسان مربوطه و گزارش‌های جهاد کشاورزی بهره برده شد.

از دیگر اطلاعات مورد نیاز این بخش راندمان آبیاری برای محصول مورد نظر می‌باشد. برای به دست آوردن راندمان آبیاری برنج از مطالعات صورت گرفته در این باره استفاده شد (Pirmoradian and Davatgar., 2019) و مقدار ۰/۵۸۳ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که عملیات آبیاری به صورت غیر خودکار در نظر گرفته شد زیرا در این شرایط، مدل به صورت واقعی‌تر شبیه‌سازی را انجام می‌دهد. به این ترتیب، مقدار و تاریخ آبیاری به مدل داده می‌شود. برای مشخص کردن منبع برداشت آب آبیاری نیز با توجه به نقشه پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی برای شالی و نقشه‌ی رودخانه‌ها، منبع برداشت آب از بین آب زیرزمینی کم‌عمق و رودخانه برای هر زیرحوضه انتخاب شد (جدول ۱).

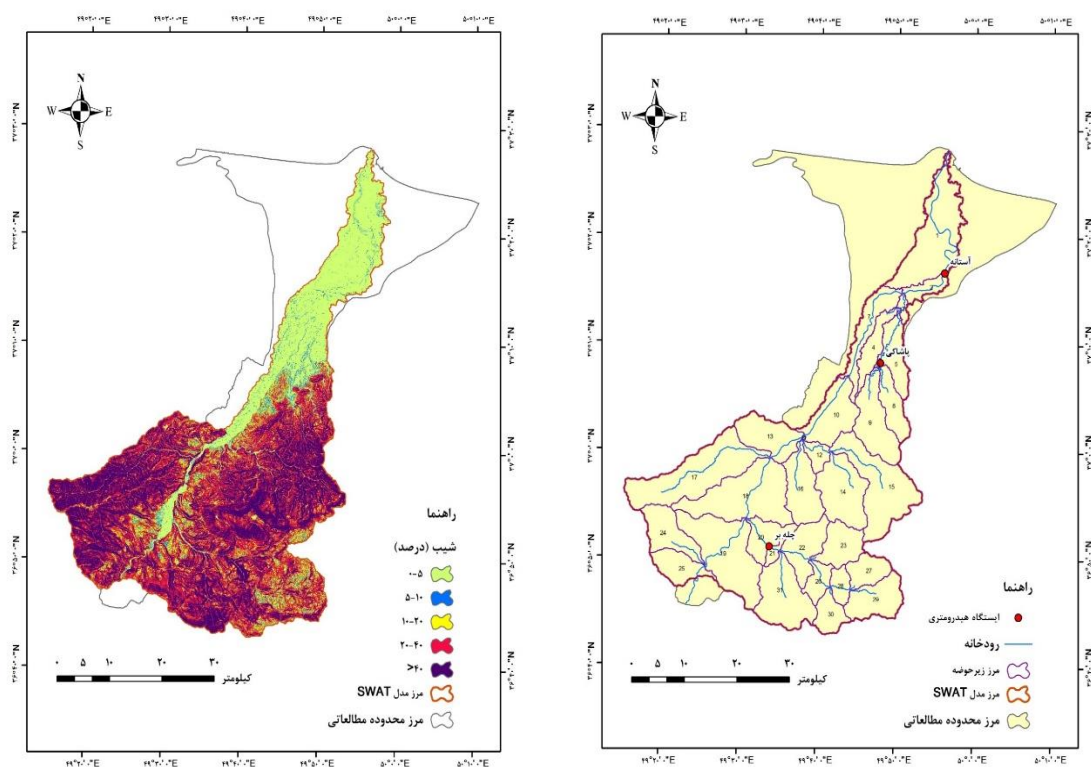
جدول ۱- برنامه‌ی مدیریت کشاورزی و آبیاری محصول برنج در منطقه‌ی مورد مطالعه

اقدامات	تاریخ	مقادیر کود (Kg/Ha)	عمق خالص (mm)	راندمان	عمق ناخالص (mm)
کود فسفات	۲۰۰۴/۴/۱۵	۵۰	--	--	--
کود اوره	۲۰۰۴/۴/۲۰	۳۳/۱۳۳	--	--	--
تاریخ کاشت	۲۰۰۴/۴/۲۹	--	--	--	--
آبیاری	۲۰۰۴/۴/۳۰	--	۱۲	۵۸۳/۰	۵۸۳/۲۰
آبیاری	۲۰۰۴/۵/۱۰	--	۲۰	۵۸۳/۰	۳۰۵/۳۴
آبیاری	۲۰۰۴/۵/۲۰	--	۲۶	۵۸۳/۰	۵۹۷/۴۴
آبیاری	۲۰۰۴/۵/۳۰	--	۳۳	۵۸۳/۰	۶۰۴/۵۶
کود اوره	۲۰۰۴/۶/۴	۶۶/۶۶	--	--	--
آبیاری	۲۰۰۴/۶/۹	--	۳۸	۵۸۳/۰	۱۸۰/۶۵
آبیاری	۲۰۰۴/۶/۲۰	--	۲۸	۵۸۳/۰	۰۲۷/۴۸
آبیاری	۲۰۰۴/۶/۳۰	--	۳۲	۵۸۳/۰	۸۸۹/۵۴
آبیاری	۲۰۰۴/۷/۱۰	--	۳۸	۵۸۳/۰	۱۸۰/۶۵
آبیاری	۲۰۰۴/۷/۲۱	--	۳۳	۵۸۳/۰	۶۰۴/۵۶
آبیاری	۲۰۰۴/۷/۳۱	--	۱۶	۵۸۳/۰	۴۴۴/۲۷
آبیاری	۲۰۰۴/۸/۱۰	--	۲۲	۵۸۳/۰	۷۳۶/۳۷
آبیاری	۲۰۰۴/۸/۲۱	--	۱۱	۵۸۳/۰	۸۶۸/۱۸
تاریخ برداشت	۲۰۰۴/۸/۳۱	--	--	--	--

مراحل اجرای مدل شامل معرفی نقشه رقمی ارتفاعی (DEM)، تعیین تعداد و جزییات آبراهه‌ها، تعیین نقاط ورودی و خروجی رودخانه در حوضه، انتخاب نقاط برداشت و ورود آب از و به حوضه، محاسبه پارامترهای زیرحوضه به منظور ارائه گزارش توپوگرافی، معرفی نقشه کاربری اراضی و بافت خاک، تعیین کلاس‌های شیب برای ایجاد نقشه شیب حوضه، ایجاد واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU)، اعمال اطلاعات هواشناسی، اعمال اطلاعات پوشش گیاهی و نوع محصول تحت کشت در حوضه، اعمال برنامه آبیاری، اعمال اطلاعات

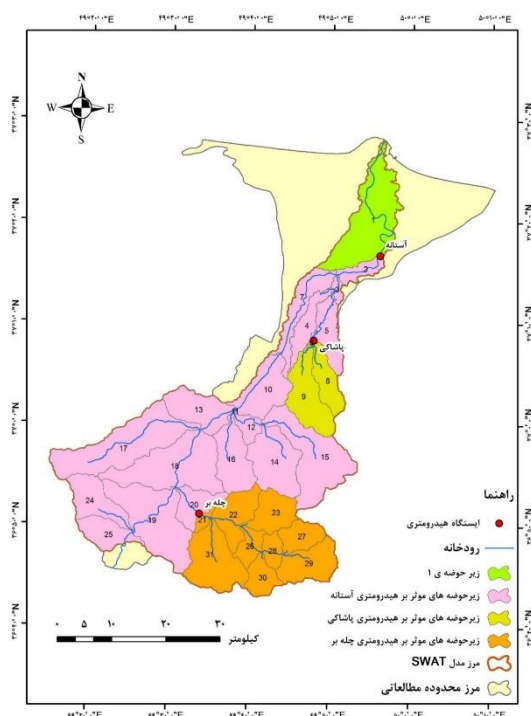
نقاط برداشت و ورود آب به حوضه، تنظیم و آماده‌سازی و اجرای مدل می‌باشد. ابتدا با استفاده از فایل DEM منطقه، مرزبندی حوضه و زیرحوضه‌ها، تعیین برخی مشخصات فیزیوگرافی و مکان‌های ورودی و خروجی انجام شد (شکل ۷). سپس HRU ها یا همان واحد پاسخ هیدرولوژیک مناطقی که از نظر خاک، کاربری اراضی و شیب زمین همگن هستند، ساخته شد.

در این مطالعه با توجه به درصد‌های مختلف از پوشش‌های خاک، کاربری اراضی و شیب در هر زیرحوضه، مقادیر حد آستانه برای تشکیل HRU ها برای هر سه پارامتر خاک، کاربری اراضی و شیب، ۵ درصد لحاظ شد. همچنین کاربری کشاورزی آبی نیز به دو زیر کاربری کشاورزی آبی و برنج، که محصول غالب این ناحیه است شکسته شد و با توجه به نقشه‌ی شالیزارها و مساحت آن‌ها این کار صورت گرفت به نحوی که ۴۷/۴۴ درصد از کاربری کشاورزی آبی به برنج اختصاص پیدا کرد. در انتها تعداد ۳۴۲ HRU برای حوضه‌ی مورد مطالعه توسط مدل در نظر گرفته شد. در این مطالعه با توجه به داده‌های موجود و وارد شده به مدل، از روش هارگریوز - سامانی برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده شده است، همچنین روش شماره منحنی برای برآورد رواناب سطحی و روش ماسکینگام برای روندیابی جریان انتخاب شد. دوره شبیه‌سازی از ابتدای سال ۲۰۰۴ تا انتهای سال ۲۰۱۵ به صورت گام زمانی ماهانه و دو سال نیز برای گرم کردن<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد.



شکل ۷- نقشه زیرحوضه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری و شیب

پس از اجرای مدل، واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از برنامه SWAT CUP و الگوریتم SUFI2 انجام شد. در این مطالعه برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های دبی مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری آستانه، پاشاکی و چله‌بر استفاده شد (**Error!** Reference source not found. ۷). به این ترتیب از داده‌های سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳ برای واسنجی و داده‌های سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ برای صحت‌سنجی استفاده شد. پارامترهای واسنجی برای هر ایستگاه هیدرومتری به صورت جدا و بر اساس زیرحوضه‌های تاثیر گذار بر دبی آن ایستگاه در SWAT CUP لحاظ شد (شکل ۸). همچنین پارامتر CN2 برای هر کاربری اراضی به صورت جداگانه واسنجی شد تا دقت آن بالاتر رود (جدول ۲).



شکل ۸- زیرحوضه‌های تاثیرگذار بر دبی مشاهداتی هر ایستگاه هیدرومتری

جدول ۲- مشخصات پارامترهای انتخابی برای واسنجی مدل و بازه‌ی مقادیر اولیه آن‌ها

بازه‌ی اولیه		علامت اختصاری	پارامتر
حد بالا	حد پایین		
۸۹	۸۱	v_CN2_AGRL.mgt	شماره منحنی کاربری کشاورزی آبی
۸۹	۸۱	v_CN2_RICE.mgt	شماره منحنی کاربری برنج
۹۶	۸۹	v_CN2_BARR.mgt	شماره منحنی کاربری بی‌ثمر
۹۲	۸۵	v_CN2_URBN.mgt	شماره منحنی کاربری شهری
۸۱	۷۱	v_CN2_FRST.mgt	شماره منحنی کاربری جنگل
۸۶	۷۷	v_CN2_PAST.mgt	شماره منحنی کاربری مرتع
۸۵	۷۵	v_CN2_ORCD.mgt	شماره منحنی کاربری باغ
۱	۰	v_ALPHA_BF.gw	ضریب پاسخ جریان پایه (روز)
۵۰۰	۰	v_GW_DELAY.gw	زمان تاخیر جریان زیرزمینی (روز)
۵۰۰۰	۰	v_GWQMN.gw	عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق برای برگشت جریان
۰/۲	۰/۰۲	v_GW_REVAP.gw	ضریب آبی که از سفره‌های کم‌عمق به پروفیل خاک بر می‌گردد
۵۰۰	۰	v_REVAPMN.gw	حد مجاز سطح آب در آبخوان کم‌عمق برای revap (میلی‌متر آب)
۱	۰	v_RCHRG_DP.gw	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم‌عمق یا غیر محصور
۵۰۰۰	۰	v_SHALLST.gw	عمق اولیه آب در آبخوان کم‌عمق (میلی‌متر)
۰/۴	-۰/۴	r_SOL_AWC().sol	ظرفیت آب قابل دسترس
۰/۶	-۰/۵	r_SOL_BD().sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (گرم در سانتی‌متر مکعب)
۰/۶	-۰/۵	r_SOL_K().sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (میلی‌متر بر ساعت)
۰/۴	-۰/۴	r_SOL_Z().sol	ضخامت لایه‌ی خاک
۱	۰	v_ESCO.hru	ضریب تصحیح تبخیر خاک
۱	۰	v_EPCO.hru	فاکتور جبران جذب آب توسط گیاه
۲۴	۰/۰۵	v_SURLAG.bsn	ضریب تاخیر جریان سطحی
۳۰۰	۰	v_CH_K1.sub	هدایت هیدرولیکی مؤثر آبراهه فرعی (میلی‌متر بر ساعت)
۵۰۰	-۰/۰۱	v_CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر آبراهه اصلی (میلی‌متر بر ساعت)

سنجش میزان عدم قطعیت نتایج مدل که در برگزیده داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل می‌باشد، توسط شاخص‌های p-factor و r-factor انجام شده است. شاخص p-factor بیانگر درصد داده‌های مشاهداتی جریان رودخانه درون باند ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی و شاخص r-factor برابر نسبت میانگین ضخامت باند ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است (Abbaspour et al., 2007). همچنین از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی<sup>۱</sup> ( $R^2$ )، نش ساتکلیف<sup>۲</sup> (NS) و درصد اریبی (PBAIS) برای ارزیابی بهترین شبیه‌سازی انجام شده در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}$$

$$NS = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]$$

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \right]$$

که در این روابط، n تعداد مشاهدات،  $S_i$  و  $O_i$  مقادیر متناظر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی،  $\bar{O}$  و  $\bar{S}$  متوسط مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشند. در جدول (۳) طبقه‌بندی کیفی عملکرد اجرای مدل، بر اساس پارامترهای آماری PBIAS و NSE که برای شبیه‌سازی ماهانه جریان رودخانه پیشنهاد شده، ارائه شده است (Moriasi et al., 2007).

جدول ۳- طبقه‌بندی عملکرد اجرای مدل بر اساس پارامترهای آماری PBIAS و NSE (Moriasi et al., 2007)

PBIAS	NSE	عملکرد
$PBIAS < \pm 10$	$0/75 < NSE \leq 1$	خیلی خوب
$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0/65 < NSE \leq 0/75$	خوب
$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0/50 < NSE \leq 0/65$	مطلوب
$PBIAS \geq \pm 25$	$NSE \leq 0/5$	نا مطلوب

## نتایج و بحث

### نتایج شبیه‌سازی مدل MODFLOW

بعد از اجرای اولیه‌ی مدل با استفاده از داده‌های اولیه‌ی ورودی و در حالت ماندگار، نتایج اولیه‌ی مدل به دست آمد. از مهم‌ترین این نتایج، تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده می‌باشد که به عنوان خروجی مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعد از انجام آنالیز حساسیت، پارامترهای هدایت هیدرولیکی آبخوان و تغذیه سطحی به عنوان پارامترهای واسنجی انتخاب شدند. پس از انجام واسنجی مدل در حالت ماندگار، مدل در حالت غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفت. بعد از انجام آنالیز حساسیت در این حالت، پارامترهای هدایت هیدرولیکی آبخوان، تغذیه سطحی و ضریب آبدی ویژه به عنوان پارامترهای واسنجی انتخاب شدند. در نهایت بعد از واسنجی و مقایسه مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، نتایج آماری مدل برای دو حالت ماندگار و غیرماندگار در جدول ۴ آورده شده است که ارزیابی مقادیر آن حاکی از این است که خطاها نسبت به مرحله‌ی قبل از واسنجی کاهش چشم‌گیری یافته است و به حد قابل قبولی رسیده‌اند، به نحوی که مقادیر شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در حالت ماندگار در مرحله‌ی قبل از واسنجی از ۵/۶۲ متر به ۰/۷۵ متر در مرحله‌ی بعد از واسنجی کاهش یافته است، همچنین در حالت غیرماندگار نیز مقدار این شاخص از ۲/۷۳ متر در مرحله‌ی قبل از واسنجی به ۰/۵۳ متر در مرحله‌ی بعد از واسنجی رسیده است که حاکی از نزدیک شدن مقادیر سطح آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در چاه‌های مشاهده‌ای و کاهش خطای شبیه‌سازی است. همچنین در مورد دو شاخص دیگر یعنی میانگین خطا (ME) و میانگین خطای مطلق (MAE) نیز مقادیر نسبت به قبل از واسنجی کاهش یافته است که حاکی از کاهش خطای مدل می‌باشد.

1 - Coefficient of determination

2 - Nash-Sutcliffe



جدول ۴- مقادیر معیارهای آماری ارزیابی کمی خطاها در مدل MODFLOW

ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)		
۴/۷۳	۴/۷۵	۵/۶۲	قبل از واسنجی	شرایط ماندگار
-/۵۱	-/۶۳	۰/۷۵	بعد از واسنجی	
۲/۰۶	۲/۱۲	۲/۷۳	قبل از واسنجی	شرایط غیرماندگار
-/۴۱	-/۴۵	۰/۵۳	بعد از واسنجی	

یکی دیگر از خروجی‌های مهم مدل، خروجی بیلان آب زیرزمینی در محدوده‌ی مدل است. در جدول ۵ نتایج بیلان مدل در اولین دوره‌ی تنش حالت غیرماندگار (مهر ۱۳۹۱) و آخرین دوره‌ی تنش حالت غیرماندگار (شهریور ۱۳۹۲) آورده شده است. با توجه به این جدول، میزان تغذیه آب زیرزمینی در مهر ۱۳۹۱ برابر  $722222/2$  متر مکعب بر روز برآورد شده است. همانطور که قبلاً گفته شد تغذیه از سطح به آبخوان در این مطالعه شامل نفوذ از بارش و آب برگشتی و آب‌بندان‌ها می‌باشد. مقادیر جریان‌های ورودی از مرزهای آبخوان  $55862/72$  متر مکعب بر روز و مقدار جریان‌های خروجی از مرزهای خروجی آبخوان  $5349/591$  متر مکعب بر روز به دست آمده است. مقادیر پمپاژ از چاه‌های بهره برداری نیز  $74788/14$  متر مکعب بر روز برآورد شده است. همچنین در این جا مقادیر جریان ورودی از رودخانه به آبخوان مقدار  $67778/58$  متر مکعب بر روز و مقدار جریان خروجی از آبخوان به رودخانه  $171156/7$  متر مکعب بر روز می‌باشد که نشان می‌دهد در ماه مهر مقدار  $103378/12$  متر مکعب بر روز آب از آبخوان وارد رودخانه می‌شود. همچنین در این قسمت مقادیر تبخیر از آب زیرزمینی که به عنوان خروجی از آبخوان لحاظ می‌شود و همچنین مقادیر جریان‌های ورودی از زهکش‌ها به آبخوان و خروجی از آبخوان به زهکش‌ها نشان داده شده است.

همچنین در جدول ۵ نتایج بیلان مدل در آخرین دوره‌ی تنش حالت غیرماندگار یعنی شهریور ۱۳۹۲ نشان داده شده است. در این جدول نیز مقادیر تغذیه به آبخوان مقدار  $506045/2$  متر مکعب بر روز و مقادیر جریان‌های ورودی و خروجی از مرزهای ورودی و خروجی آبخوان به ترتیب  $54692/34$  و  $5558/707$  متر مکعب بر روز و میزان پمپاژ از چاه‌ها  $86688/69$  متر مکعب بر روز می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در شهریور ۹۲ نسبت به مهر ۹۱ میزان جریان ورودی از مرزهای ورودی به آبخوان و تغذیه، کاهش و میزان پمپاژ و جریان خروجی از مرزهای خروجی افزایش یافته است. در این دوره جریان نشت از رودخانه به آبخوان مقدار  $41297/55$  متر مکعب بر روز و جریان از آبخوان به رودخانه  $147316$  متر مکعب بر روز می‌باشد که نسبت به مهر ماه مقادیر هر دو کمتر ولی همچنان  $106018/45$  متر مکعب بر روز از آبخوان وارد رودخانه می‌گردد، که مقایسه این مقدار با مهرماه نشان می‌دهد که خروجی از آبخوان به رودخانه در شهریور ماه افزایش یافته است. همچنین در این قسمت مقادیر تبخیر از آب زیرزمینی که به عنوان خروجی از آبخوان لحاظ می‌شود و همچنین مقادیر جریان‌های ورودی از زهکش‌ها به آبخوان و خروجی از آبخوان به زهکش‌ها نشان داده شده است.

جدول ۵- بیلان آب زیرزمینی در اولین و آخرین دوره‌ی تنش (مهر ۱۳۹۱ و شهریور ۱۳۹۲) (مترمکعب بر روز)

شهریور		مهر		مولفه بیلان
خروجی	ورودی	خروجی	ورودی	
۶۸۰۷/۰۱	۳۹۰۷۸۵/۸۰	۲/۱۰	۲/۵۷	ذخیره
۸۶۶۸۸/۶۹	۰/۰۰	۷۴۷۸۸/۱۴	۰/۰۰	برداشت از طریق چاه‌های پمپاژ
۱۴۷۳۱۶/۰۰	۴۱۲۹۷/۵۵	۱۷۱۱۵۶/۷۰	۶۷۷۷۸/۵۸	تغذیه یا زهکشی از بستر رودخانه
۵۵۵۸/۷۱	۵۴۶۹۲/۳۴	۵۳۴۹/۵۹	۵۵۸۶۲/۷۲	جریان آب زیرزمینی از مرزها
۰/۰۰	۵۰۶۰۴۵/۲۰	۰/۰۰	۷۲۲۲۲۲/۲۰	تغذیه
۷۴۲۸۵۲/۷۰	۰/۰۰	۵۹۰۷۲۹/۰۰	۰/۰۰	تبخیر از آبخوان
۴۷۹۸/۱۱	۱۱۹۹/۵۳	۵۱۲۰/۰۲	۱۲۸۰/۰۱	تغذیه یا تخلیه از طریق زهکش‌ها
۹۹۴۰۲۱/۲۰	۹۹۴۰۲۰/۴۰	۸۴۷۱۴۵/۵۰	۸۴۷۱۴۶/۱۰	مجموع
-/۰/۸۰		۰/۵۲		تغییرات ورودی و خروجی

### نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT

بعد از اجرای مدل SWAT، نتایج اولیه‌ی دبی‌های شبیه‌سازی شده در خروجی زیرحوضه‌ها به دست آمد که مقادیر آن‌ها در سه ایستگاه



هیدرومتری آستانه، پاشاکی و چله‌بر در اغلب زمان‌ها کمتر از دبی‌های مشاهده‌ای برآورد شد. خلاصه نتایج آماری سه ایستگاه مذکور در جدول ۸ آورده شده است. طبق مقادیر به‌دست آمده برای این پارامترها ایستگاه هیدرومتری آستانه شرایط بهتری را در حالت قبل از واسنجی دارد. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و شاخص نش - ساتکلیف (NS) آن بالاتر از دو ایستگاه دیگر و نزدیک‌تر به مقدار بهینه این دو شاخص یعنی یک می‌باشد که نشان از تطابق بیشتر و بهتر دبی‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در ایستگاه آستانه می‌دهد. همچنین شاخص درصد اریبی (PBAIS) که مقدار بهینه‌ی آن صفر می‌باشد، برای هر سه ایستگاه دارای مقادیر مثبت و نامطلوب می‌باشد، که بیانگر کم برآورد شدن مقادیر شبیه‌سازی نسبت به مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد.

برای انجام تحلیل حساسیت در ابتدا تعداد نسبتاً زیادی از پارامترها با توجه به مطالعات پیشین و حوضه‌ی مورد مطالعه انتخاب شد که نتایج آن در الگوریتم SUFI2 با توجه به دو معیار P-Value و T-Stat به صورت جدول ۷ آورده شده است. معیار P-Value نشان دهنده اهمیت حساسیت پارامتر است که هر چه معیار به صفر نزدیک‌تر باشد، پارامتر برای مدل مهم‌تر است و معیار T-Stat اندازه حساسیت را نشان می‌دهد که هر چه قدر مطلق آن بزرگتر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است.

جدول ۷- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل

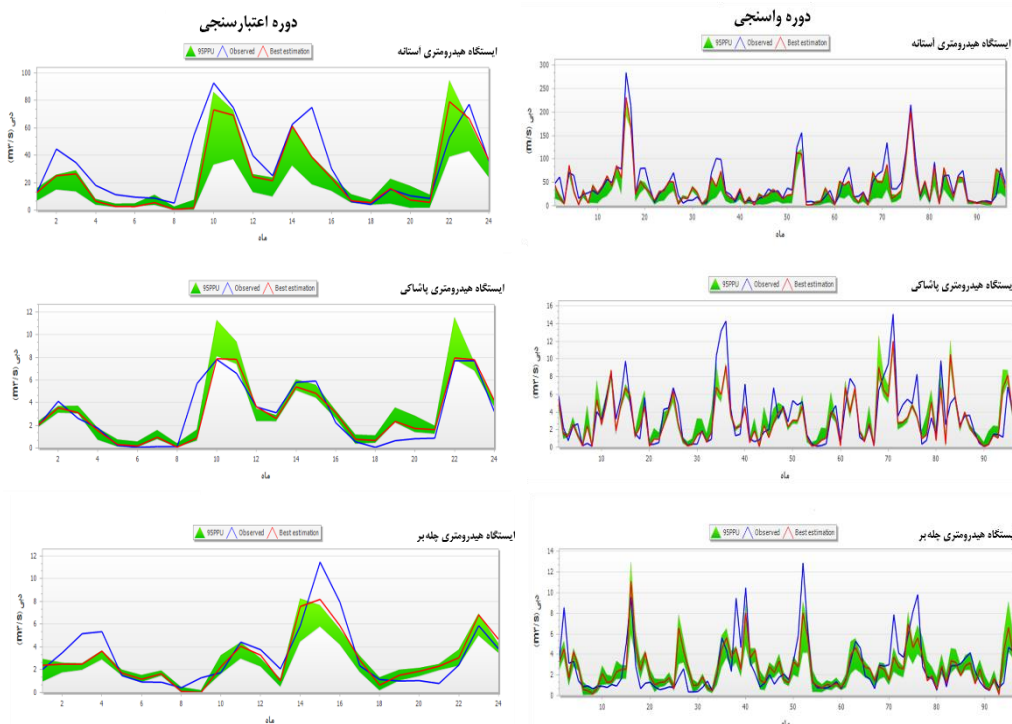
رتبه حساسیت	پارامتر	علامت اختصاری	P-Value	t-Stat
۱	شماره منحنی کاربری کشاورزی آبی	v_CN2_AGR_L.mgt	۰۰۰۰/۰	۴۱۰۹۹۳۹۶۳/۲۶
۲	شماره منحنی کاربری برنج	v_CN2_RICE.mgt	۰۰۰۰/۰	۴۱۰۰۹۴۱۹۲/۱۸
۳	شماره منحنی کاربری جنگل	v_CN2_FRST.mgt	۰۰۰۰/۰	۱۲۵۳۱۲۳۰۲/۱۱
۴	شماره منحنی کاربری مرتع	v_CN2_PAST.mgt	۷۷۴۸/۰	۲۸۷۹۰۰۸۴۰/۰
۵	شماره منحنی کاربری شهری	v_CN2_URBN.mgt	۹۴۸۱/۰	۰۶۵۵/۰-
۶	شماره منحنی کاربری باغ	v_CN2_ORCD.mgt	۹۵۶۳/۰	۰۵۵۰/۰
۷	شماره منحنی کاربری بی‌ثمر	v_CN2_BARR.mgt	۹۹۹۵/۰	۰/۰۰۰۶-
۱	هدایت هیدرولیکی مؤثر آبراهه اصلی (میلی متر بر ساعت)	v_CH_K2.rte	۰۰۰۰/۰	۱۱۰۸/۲۲-
۲	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (گرم در سانتی متر مکعب)	r_SOL_BD().sol	۰۰۰۰/۰	۱۱۲۳/۱۷
۳	عمق اولیه آب در آبخوان کم عمق (میلی متر)	v_SHALLST.gw	۰۰۰۰/۰	۶۲۵۸/۸
۴	ضخامت لایه‌ی خاک	r_SOL_Z().sol	۰۰۰۰/۰	۵۵۶۹/۷-
۵	فاکتور جبران جذب آب توسط گیاه	v_EPCO.hru	۰۰۰۰/۰	۹۰۲۶/۶-
۶	عمق آستانه آب در آبخوان کم عمق برای برگشت جریان	v_GWQMN.gw	۰۰۰۰/۰	۸۷۵۸/۶-
۷	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (میلی متر بر ساعت)	r_SOL_K().sol	۰۰۰۰/۰	۸۶۵۸/۵
۸	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق یا غیر محصور	v_RCHRG_DP.gw	۰۰۰۱/۰	۰۸۱۲/۴
۹	ضریب آبی که از سفره‌های کم عمق به پروفیل خاک بر می‌گردد	v_GW_REVAP.gw	۰۰۲۱/۰	۰۹۱۴/۳-
۱۰	ضریب تصحیح تبخیر خاک	v_ESCO.hru	۰۰۳۱/۰	۹۷۴۳/۲
۱۱	زمان تاخیر جریان زیرزمینی (روز)	v_GW_DELAY.gw	۰۰۱۵۹/۰	۴۱۹۱/۲-
۱۲	هدایت هیدرولیکی مؤثر آبراهه فرعی (میلی متر بر ساعت)	v_CH_K1.sub	۱۲۵۷/۰	۷۳۸۴/۱-
۱۳	حد مجاز سطح آب در آبخوان کم عمق برای revap (میلی متر آب)	v_REVAPMN.gw	۱۵۹۴/۰	۴۰۹۱/۱
۱۴	ظرفیت آب قابل دسترس	r_SOL_AWC().sol	۱۶۱۱/۰	۴۰۳۵/۱-
۱۵	ضریب پاسخ جریان پایه (روز)	v_ALPHA_BF.gw	۳۹۸۰/۰	۸۴۵۹/۰-
۱۶	ضریب تاخیر جریان سطحی	v_SURLAG.bsn	۵۷۶۹/۰	۵۵۸۲/۰-

بعد از تعیین پارامترهای حساس، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از نرم افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 انجام شد.

شاخص‌های ارزیابی مدل و همچنین مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای سه ایستگاه آستانه، پاشاکی و چله‌بر در جدول ۸ و شکل ۹ آورده شده است. در نتایج شبیه‌سازی دوره‌ی واسنجی، انطباق مناسبی میان داده‌های دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در هر سه ایستگاه وجود دارد و مدل توانسته است به خوبی روند تغییرات جریان را در حوضه شبیه‌سازی کند. مدل در تشخیص زمان اوج دبی‌ها تقریباً خوب عمل کرده و در مواردی که مقادیر دبی حداکثر را کمتر از مقادیر واقعی برآورد کرده می‌تواند به این علت باشد که از آنجا که مدل SWAT بارش را بر اساس متوسط دمای روزانه به صورت باران و برف تقسیم‌بندی می‌کند قادر به شبیه‌سازی دقیق ذوب برف نبوده و باعث برآورد ضعیف‌تر دبی‌های اوج شده است (Fontaine et al., 2002). Donigian, (2000). ضریب  $R^2$  را به این صورت طبقه‌بندی کرد که در صورتی که کمتر از  $0/6$ ،  $0/7-0/8$  و بزرگتر از  $0/8$  باشد همبستگی به ترتیب ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب است. بنابراین دبی ماهانه در مرحله واسنجی در دو ایستگاه آستانه و پاشاکی به صورت بسیار خوب و خوب و برای ایستگاه چله‌بر به صورت متوسط و مطلوب است که قابل قبول می‌باشد. البته در برخی موارد دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دارای اختلاف می‌باشند (شکل ۹) که دلیل آن را می‌توان به کنترلی بودن حوضه توسط سدها و کانال‌های انتقال آب و کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری با دقت بالا اشاره کرد. همچنین براساس شاخص P-Factor در مرحله واسنجی ۴۵ تا ۵۵ درصد داده‌های مشاهداتی در سه ایستگاه مذکور، در پهنای باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته‌اند و پهنای باند عدم قطعیت نیز قابل قبول است.

همانطور که در جدول ۸ و شکل ۹ مشاهده می‌شود، در مرحله‌ی اعتبارسنجی مقادیر شاخص‌های آماری در ایستگاه آستانه دارای کاهش نسبی بوده و در دو ایستگاه دیگر شرایط مطلوب‌تر است ولی در کل نتایج اعتبارسنجی مناسب و مطلوب ارزیابی می‌شود. از جمله دلایل کاهش نسبی شاخص‌های آماری در مرحله‌ی اعتبارسنجی در ایستگاه آستانه نسبت به مرحله‌ی واسنجی، می‌توان به کوتاه بودن طول دوره‌ی واسنجی اشاره کرد که به‌طور مطلوبی دوره‌های ترسالی و خشکسالی را در بر نمی‌گیرد. از دیگر علت‌هایی که برای اختلاف مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در این مطالعه می‌توان بیان کرد، تعداد کم ایستگاه‌های هواشناسی که دارای داده‌های مناسب و کافی باشند و جدید التاسیس بودن ایستگاه سینوپتیک کپاشهر و متعاقباً نبود داده‌های کافی آن برای انتخاب به عنوان ایستگاه انتخابی برای مولد داده‌های اقلیمی و استفاده از ایستگاه سینوپتیک رشت به جای آن که در بیرون حوضه و فاصله‌ی بیشتری قرار دارد، می‌باشند.

در نهایت مقادیر بهینه‌ی پارامترهای واسنجی شده که در آخرین تکرار مرحله‌ی واسنجی تعیین شده بودند در مدل SWAT اعمال گردید و مدل دوباره برای دوره‌ی آماری ۱۲ ساله (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۵) اجرا گردید و نتایج آن به دست آمد.



شکل ۹- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی جریان در ایستگاه هیدرومتری آستانه، پاشاکی و چله‌بر

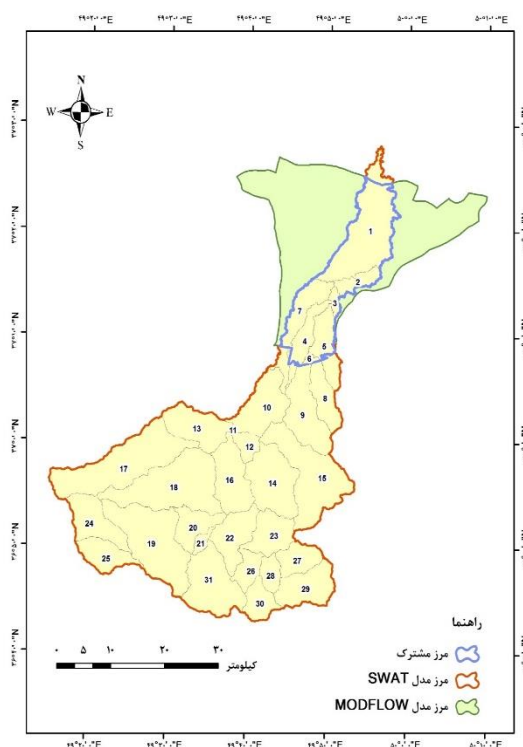
جدول ۸- خلاصه نتایج معیارهای آماری سه ایستگاه هیدرومتری آستانه، پاشاکی و چله‌بر

r-factor	p-factor	PBIAS	NS	R2	ایستگاه هیدرومتری	طول دوره آماری
-	-	۳۶/۱۰	۰/۷۴	۰/۸۸	آستانه	اجرای اولیه (قبل از واسنجی)
-	-	۳۷/۷۰	۰/۳۵	۰/۵۵	پاشاکی	
-	-	۲۷/۸۰	۰/۳۲	۰/۴۲	چله‌بر	
۰/۴۱	۰/۴۹	۱۳/۹۰	۰/۸۴	۰/۹۲	آستانه	دوره واسنجی
۰/۳۶	۰/۴۶	۱۲/۱۰	۰/۷	۰/۷۵	پاشاکی	
۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۶۱	چله‌بر	
۰/۶	۰/۵۴	۲۳/۶۰	۰/۶۳	۰/۷۲	آستانه	دوره اعتبارسنجی
۰/۴	۰/۵۴	-۲/۳۰	۰/۸	۰/۸۱	پاشاکی	
۰/۴۳	۰/۵۴	۶/۷۰	۰/۷۶	۰/۷۷	چله‌بر	

### ارزیابی تغذیه دو مدل SWAT و MODFLOW

در ابتدا، برای ارزیابی پارامتر تغذیه دو مدل، محدوده‌ی مکانی مشترک مدل‌ها به صورت شکل ۱۰ تعیین شد. مساحت ناحیه‌ی مشترک حدود ۲۷۴ کیلومتر مربع است که حدود ۳۶ درصد از مساحت محدوده‌ی آبخوان شبیه‌سازی شده است. در ادامه، مقادیر تغذیه‌ها در دوره‌ی زمانی مشترک بین دو مدل (سال آبی ۹۲-۱۳۹۱) بررسی و مقایسه شد.

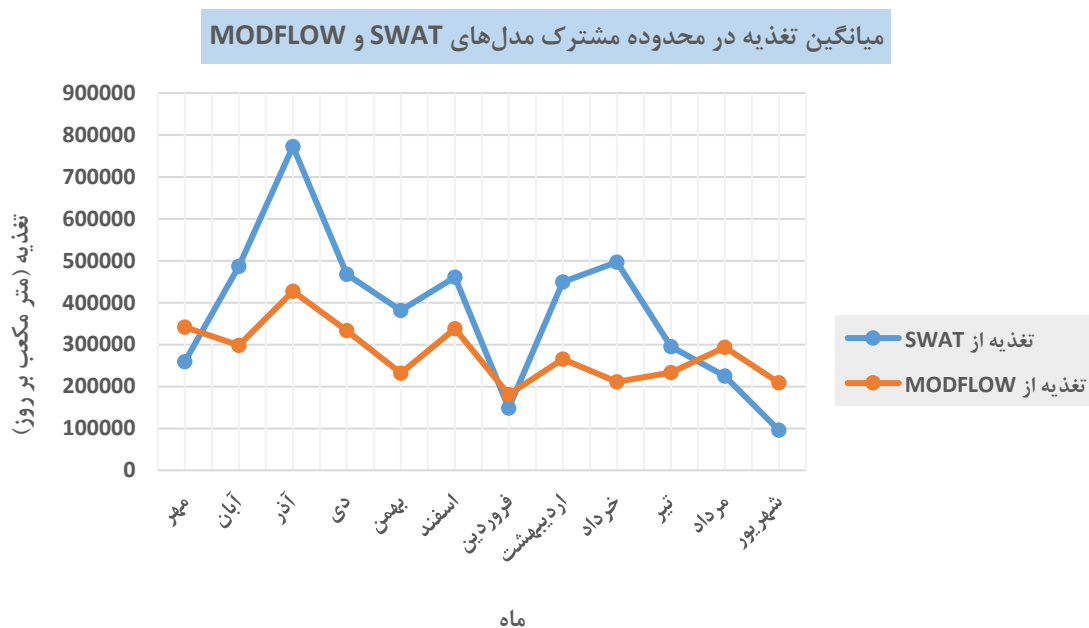
مقادیر تغذیه سطحی به آب زیرزمینی از مدل MODFLOW متشکل از نفوذ از بارش، آب برگشتی از چاه‌های کشاورزی و شرب و صنعت و همچنین نفوذ از آب‌بندان می‌باشد. در این مرحله برای ارزیابی و مقایسه با تغذیه از مدل SWAT به دلیل اینکه تغذیه از آب‌بندان در مدل SWAT در نظر گرفته نشده است، از مقادیر تغذیه مدل MODFLOW حذف شد.



شکل ۱۰- محدوده مشترک شبیه‌سازی در مدل‌های SWAT و MODFLOW

در شکل ۱۱ و جدول ۹ به ترتیب، مقادیر میانگین وزنی تغذیه کلی در کل محدوده‌ی هم‌پوشانی در ماه‌های مختلف که از دو مدل SWAT و MODFLOW حاصل شده است به صورت نمودار و جدول، با واحدهای مترمکعب بر روز و میلیون مترمکعب مشاهده می‌شود.

همانطور که نشان داده شده است مقادیر تغذیه کلی به آبخوان در فصل پاییز افزایش قابل توجهی داشته است، که از مهم‌ترین علل آن می‌توان به افزایش طول مدت و مقدار بارش‌ها در این فصل در محدوده‌ی مورد نظر اشاره کرد که منجر به تغذیه‌ی بیشتر آبخوان، بخصوص بعد از فصل خشک تابستان شده است. در فصل زمستان مقدار تغذیه به نسبت فصل پاییز کمتر ولی همچنان به نسبت فصل خشک بالاتر می‌باشد. در اوایل بهار کاهش تغذیه به آبخوان رخ داده است ولی در ماه‌های اردیبهشت و خرداد تغذیه به طور چشمگیری افزایش داشته است که از علل مهم آن می‌توان به شروع فصل کشت برنج و رهاسازی آب سد سفیدرود برای آبیاری شالیزارها و متعاقباً ماندابی شدن شالیزارهای برنج اشاره کرد که منجر به تغذیه‌ی بیشتر در این ماه‌ها شده‌اند. در ادامه روند تغذیه به آبخوان در تابستان با شیب نزولی رو به کاهش نهاده است که از علل مهم آن کاهش بارش‌ها و افزایش دمای هوا و تبخیر آب می‌توان اشاره کرد. به طور کلی روند این فرآیند در خروجی تغذیه از مدل SWAT نسبت به خروجی تغذیه‌ی واسنجی شده از مدل MODFLOW، بسیار واضح‌تر، بهتر و منطقی‌تر نشان داده شده است که گویای دقت این مدل در برآورد تغذیه به آب زیرزمینی می‌باشد.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین وزنی تغذیه از دو مدل SWAT و MODFLOW در کل محدوده‌ی هم‌پوشانی در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱

**جدول ۹- مقادیر تغذیه‌ی کلی به آبخوان در دو مدل SWAT و MODFLOW در کل محدوده‌ی هم‌پوشانی**

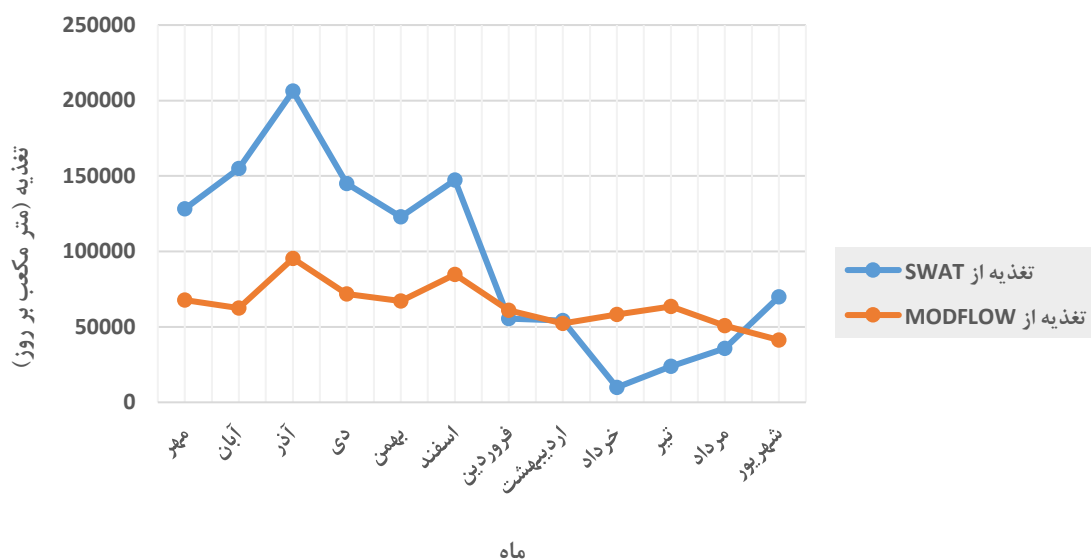
تغذیه کلی به آبخوان در MODFLOW		تغذیه کلی به آبخوان در SWAT		
(MCM)	(m <sup>3</sup> /d)	(MCM)	(m <sup>3</sup> /d)	
۱۰/۶	۳۴۱۸۹۸/۳	۸/۰	۲۵۹۱۶۶/۸	مهر
۹/۰	۲۹۸۳۲۲/۰	۱۴/۶	۴۸۶۶۰۲/۴	آبان
۱۳/۲	۴۲۷۲۰۹/۶	۲۴/۰	۷۷۲۶۹۷/۰	آذر
۱۰/۳	۳۳۳۰۰۰/۰	۱۴/۵	۴۶۷۴۵۹/۳	دی
۶/۵	۲۳۱۹۴۵/۴	۱۰/۷	۳۸۱۶۱۷/۶	بهمن
۱۰/۵	۳۳۷۹۴۹/۶	۱۴/۳	۴۶۰۵۲۵/۲	اسفند
۵/۴	۱۸۰۹۴۰/۴	۴/۵	۱۴۸۳۲۰/۲	فروردین
۸/۲	۲۶۵۶۰۳/۸	۱۳/۹	۴۴۹۷۴۶/۴	اردیبهشت
۶/۳	۲۱۱۳۱۳/۲	۱۴/۹	۴۹۷۰۶۵/۴	خرداد
۷/۲	۲۳۳۵۹۹/۰	۹/۲	۲۹۵۳۷۲/۳	تیر
۹/۱	۲۹۳۸۳۹/۰	۷/۰	۲۲۴۹۹۵/۰	مرداد
۶/۳	۲۰۹۰۵۰/۶	۲/۹	۹۵۶۴۴/۱	شهریور
۱۰/۲/۷	۳۳۶۴۶۷۰/۹	۱۳۸/۳	۴۵۳۹۲۱۱/۵	مجموع

همچنین مقادیر تغذیه از رودخانه به آبخوان که در مدل MODFLOW با استفاده از مجموعه River برحسب مترمکعب بر روز شبیه‌سازی شده است و در مدل SWAT از مقادیر تلفات آبراهه‌ی اصلی و فرعی که مقادیر آن تحت عنوان TLOSS در فایل خروجی اکسس مدل به ترتیب در سربرگ output.rch و output.hru به دست آمده است، بعد از تبدیل واحد و یکی کردن واحدها، در جدول ۱۰ بر حسب مترمکعب بر روز و میلیون مترمکعب نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۲ مقادیر میانگین وزنی تغذیه از رودخانه به آبخوان در کل محدوده‌ی هم‌پوشانی در ماه‌های مختلف که از دو مدل SWAT و MODFLOW حاصل شده است به صورت نمودار مشاهده می‌شود. به طور کلی مقادیر تغذیه از رودخانه در مدل SWAT و MODFLOW به ترتیب ۲۵/۳۷ درصد و ۲۳/۰۸ درصد از تغذیه‌ی کل آبخوان را تشکیل می‌دهند.

جدول ۱۰- مقادیر تغذیه از رودخانه به آبخوان در دو مدل MODFLOW و SWAT در کل محدوده‌ی هم‌پوشانی

تغذیه از رودخانه به آبخوان در MODFLOW		تغذیه از رودخانه به آبخوان در SWAT		
(MCM)	(m <sup>3</sup> /d)	(MCM)	(m <sup>3</sup> /d)	
۲/۰	۶۷۷۷۸/۶	۴/۰	۱۲۸۱۰۵/۱	مهر
۱/۹	۶۲۴۵۶/۳	۴/۶	۱۵۴۹۱۶/۹	آبان
۲/۹	۹۵۲۸۳/۷	۶/۴	۲۰۶۱۸۸/۶	آذر
۲/۲	۷۱۸۷۳/۱	۴/۵	۱۴۴۸۸۲/۵	دی
۲/۰	۶۷۱۱۳/۷	۳/۴	۱۲۲۹۱۳/۶	بهمن
۲/۶	۸۴۷۷۶/۴	۴/۶	۱۴۷۲۷۴/۸	اسفند
۱/۹	۶۱۰۴۹/۰	۱/۷	۵۵۴۸۹/۱	فروردین
۱/۶	۵۲۱۹۰/۴	۱/۷	۵۴۱۱۹/۷	اردیبهشت
۱/۸	۵۸۲۸۳/۹	-۰/۳	۹۸۸۹/۳	خرداد
۲/۰	۶۳۵۹۶/۸	-۰/۷	۲۳۸۹۹/۳	تیر
۱/۶	۵۰۸۷۹/۸	۱/۱	۳۵۶۲۵/۷	مرداد
۱/۳	۴۱۲۹۷/۶	۲/۱	۶۹۹۶۷/۱	شهریور
۲۳/۷	۷۷۶۵۷۹/۳	۳۵/۱	۱۱۵۳۲۷۱/۸	مجموع

میانگین تغذیه از رودخانه به آبخوان در محدوده مشترک مدل‌های SWAT و MODFLOW



شکل ۱۲- مقایسه میانگین وزنی تغذیه از رودخانه به آبخوان از دو مدل SWAT و MODFLOW در کل محدوده هم‌پوشانی در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱

در این مطالعه با توجه به داده‌های موثق و واسنجی دقیقی که در مدل‌سازی‌های آب زیرزمینی و بخصوص مدل‌سازی آب سطحی با SWAT نسبت به مطالعات پیشینی که در این ناحیه‌ی مطالعاتی و نواحی دیگر صورت گرفته، به کار برده شد، باعث افزایش مفهومی



سازی خصوصیات حوضه آبریز و آبخوان شده است و همچنین نتایجی به مراتب با عدم قطعیت کمتر به دست آمد. به نحوی که در مطالعات گذشته بر روی این آبخوان (اکبری نسب و جوادی، ۱۳۹۵) که از مدل SWAT نیز برای برآورد تغذیه استفاده کردند، بسیاری از پارامترهای موثر بر تغذیه آبخوان و فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه در مدل‌سازی با SWAT اعمال نشد. از جمله‌ی این پارامترهای موثر می‌توان به تاثیر سد سفیدرود بر دبی جریان در پایین دست و تغییرات دبی و حجم آب ناشی از کانال‌های انتقال آب و اعمال مدیریت‌های کشاورزی و برنامه‌ی آبیاری برای محصول غالب منطقه (برنج) و واسنجی مدل بر اساس نواحی موثر به صورت جداگانه و شماره منحنی‌های جداگانه‌ی کاربری‌های اراضی و... می‌توان نام برد که در نتیجه‌ی آن میزان تغذیه در ناحیه‌ی مشترک مدل‌ها در این مطالعه و مطالعه‌ی پیشین به ترتیب ۱۳۸/۳۴ و ۱۴۱ میلیون متر مکعب تخمین زده شد که در این مطالعه علاوه بر برآورد ماهانه‌ی تغذیه، مقادیر تغذیه از آبراهه نیز جداگانه به دست آمد که در مجموع تخمین قابل اطمینان تری از تغذیه حاصل شد و عدم قطعیت‌ها در سه بخش ورودی‌ها، مدل مفهومی و پارامترها کاهش پیدا کرده است. در این مطالعه از مدل MODFLOW که مدلی قدرتمند در زمینه‌ی مدل‌سازی آب زیرزمینی است نیز برای برآورد تغذیه استفاده شد که در قیاس با مطالعاتی نظیر (دولت آبادی و زمردیان، ۱۳۹۴) و (کریمی، ۱۳۹۸)، با جزئیات ساختاری و داده‌ها و اطلاعاتی به مراتب بیشتر مانند شبکه‌بندی کوچک‌تر و اعمال رودخانه و زهکش‌ها و مشخصات آن‌ها در مدل و اعمال تبخیر- تعرق به مدل با توجه به تراز سطح آب زیرزمینی و تخلخل آبخوان و نفوذ از آبندها و آب برگشتی از چاه‌ها و غیره به کار برده شد که با توجه به موثق بودن داده‌ها از عدم قطعیت نتایج تغذیه به آبخوان کاسته شده است.

## نتیجه‌گیری

این مطالعه در راستای بهبود برآورد پارامتر تغذیه به آب زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم برای مدل‌سازی آب زیرزمینی در آبخوان‌های مختلف انجام شد. در این راستا، اقدام به برآورد و مقایسه‌ی تغذیه به آبخوان توسط دو مدل SWAT و MODFLOW شد که به ترتیب دو مدل آب سطحی و آب زیرزمینی می‌باشند. تغذیه سطحی در مدل MODFLOW که متشکل از تغذیه از بارش و آب برگشتی و نفوذ از آبندها در نظر گرفته شد، در کل آبخوان در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ برابر با ۲۳۲/۹۸ میلیون متر مکعب به دست آمد. همچنین میزان تغذیه سطحی MODFLOW در محدوده‌ی مشترک با مدل SWAT در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ برابر با ۷۸/۹۶ میلیون متر مکعب حاصل شد که با احتساب تغذیه از رودخانه به مقدار ۱۰۲/۷۱ میلیون متر مکعب افزایش یافت. بیشترین مقادیر تغذیه در اواخر فصل پاییز و ماه آذر ۱۳۹۱ رخ داده است و کمترین مقادیر تغذیه در اوایل فصل بهار و ماه فروردین ۱۳۹۲ اتفاق افتاده است. میزان تغذیه از رودخانه به آبخوان در محدوده‌ی مشترک با مدل SWAT در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ برابر با ۲۳/۷۱ میلیون متر مکعب به دست آمد که برابر با ۲۳/۰۸ درصد از تغذیه کلی به آبخوان می‌باشد. تحلیل حساسیت مدل MODFLOW نشان داد پارامترهای تغذیه از سطح، هدایت هیدرولیکی و ضریب آدهی ویژه به ترتیب دارای بیشترین حساسیت بودند. بنابراین تغذیه در مدل‌سازی آب زیرزمینی جایگاه ویژه‌ای در تعیین بیلان آب محدود دارد. در برآورد تغذیه در مدل MODFLOW علی‌رغم استفاده از داده‌ها و روش‌های ابتکاری در این تحقیق، به دلیل آنکه از روابط تجربی و نظریات کارشناسانه و استفاده از گزارش‌ها برای اعمال مقدار نفوذ و تغذیه به آب زیرزمینی در سلول‌های مختلف، استفاده شد، خروجی مدل برای این پارامتر دارای عدم قطعیت قابل توجهی بوده که بهتر است برای کاهش عدم قطعیت در برآورد آن، پارامترهای آب سطحی و زیرزمینی موثر بر تغذیه به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج حاصل از SWAT برای محاسبه تغذیه به آبخوان کم عمق که متشکل از تغذیه سطحی و تلفات آبراهه‌های فرعی زیرحوضه‌ها می‌باشد، نشان داد که تغذیه در محدوده‌ی مشترک با مدل MODFLOW در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ برابر با ۱۳۶/۲۷ میلیون مترمکعب است که با احتساب تغذیه از آبراهه اصلی ۱۳۸/۳۴ میلیون مترمکعب تخمین زده شد. بیشترین مقادیر تغذیه در اواخر فصل پاییز و ماه آذر ۱۳۹۱ رخ داده است و کمترین مقادیر تغذیه در اواخر فصل تابستان و ماه شهریور ۱۳۹۲ اتفاق افتاده است.

تغذیه برآورد شده در SWAT با توجه به در نظر گرفتن فرآیندهای آب سطحی، که مدل MODFLOW دارای ضعف در این قسمت بود، دارای دقت بالاتری بوده و با توجه به اعمال خصوصیات خاک و کاربری اراضی و سد و کانال‌های انتقال آب و غیره در مدل SWAT و واسنجی مناسب آن، خروجی‌های دقیق‌تری در این مطالعه، مانند تغذیه به آب زیرزمینی توسط مدل SWAT، در اختیار قرار گرفته است. همچنین روند تغییر مقادیر تغذیه با الگوهای بارش و رهاسازی آب سد سفیدرود و بارگذاری آب در کانال‌های انتقال آب، تناسب و هماهنگی بیشتری نسبت به تغذیه از مدل MODFLOW دارد و همانطور که ذکر شد مقدار کل تغذیه سطحی از SWAT بیشتر از MODFLOW به دست آمد که با توجه به اینکه مقادیر سطح آب شبیه‌سازی شده پایین‌تر از مقادیر سطح آب مشاهده شده در مدل MODFLOW قرار



می‌گرفت و نیاز به افزایش تغذیه دیده می‌شد، مقادیر تغذیه از SWAT برای کاربرد در مدل‌سازی آب زیرزمینی مناسب ارزیابی می‌شود.

### "هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- اکبری نسب، لیلا، ۱۳۹۵. تدقیق پارامترهای بیلان آب زیرزمینی با بکارگیری مدل SWAT و روش نفوذ CRD و مقایسه آن با GREEN AMPT (مطالعه موردی: دشت آستانه). پایان نامه کارشناسی ارشد مدیریت منابع آبی. موسسه آموزش عالی آل طه.
- بی‌نام، (۱۳۸۳)، «گزارش مطالعات بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان»، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، مهندسین مشاور پندام، جلد دهم.
- بی‌نام، (۱۳۸۵)، «گزارش مطالعات تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان و تلفیق مطالعات آب‌های سطحی و زیرزمینی محدوده مطالعاتی آستانه - کوچصفهان»، وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، معاونت مطالعات پایه منابع آب، مهندسان مشاور کمندآب.
- بی‌نام، (۱۳۸۸)، «راهنمای برآورد ضریب زهکشی زیرزمینی در اراضی تحت آبیاری مناطق خشک و نیمه خشک»، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، نشریه شماره ۴۹۲.
- بی‌نام، (۱۳۹۳)، «گزارش ادامه مطالعه دشتهای دارای شبکه سنجش کمی و کیفی، محدوده مطالعاتی آستانه - کوچصفهان سال آبی ۹۲-۹۱»، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، دفتر مطالعات پایه منابع آب، مهندسین مشاور طولاً رود گیل.
- دولت آبادی، س.، س.م.ع. زمردیان، ۱۳۹۴. بکارگیری مقادیر تغذیه استخراج شده از مدل SWAT در مدل ریاضی MODFLOW جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت فیروزآباد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شماره هفتادویکم، بهار ۱۳۹۴.
- رجا، امید؛ پارسى نژاد، مسعود و تجریشی، مسعود. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت مهاباد). مجله آب و خاک، (۱)۳۶، ۵۲-۳۱.
- سعادت پور، عالیبه؛ عزیزاده، امین؛ ضیائی، علی نقی و ایزدی، عزیزاله. (۱۳۹۸). مدل‌سازی یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در مناطق متکی بر سیستم کشاورزی آبی با استفاده از مدل SWAT-MODFLOW (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور). مجله آب و خاک، (۴)۳۳، ۵۳۶-۵۲۱.
- کریمی، جواد، ۱۳۹۸. بررسی اثر تغذیه آب‌های سطحی بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از ترکیب مدل‌های SWAT و MODFLOW (مطالعه موردی دشت بوانات، استان فارس). پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبخوانداری. دانشگاه یزد، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی نظریه، فرزانه؛ انصاری، حسین؛ ضیائی، علی نقی؛ داوری، کامران و ایزدی، عزیزاله. (۱۳۹۷). برآورد توزیع مکانی و زمانی تغذیه با استفاده از مدل توزیعی PRMS: مطالعه موردی دشت نیشابور. تحقیقات منابع آب ایران، (۱)۱۴، ۲۳۸-۲۲۶.

## REFERENCES

- Adeyeye, O. A., Ikpokonte, E. A., & Arabi, S. A., (2019). GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22 (2), 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.003>.
- Al-Djazouli, M. O., Elmorabiti, K., Rahimi, A., Amellah, O., & Fadil, O. A. M. (2021). Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: a case of Waddai, eastern Chad. *GeoJournal*, 86, 1881-1894. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10160-0>.
- Arnous, M. O., El-Rayes, A. E., Geriessh, M. H., Ghodeif, K. O., & Al-Oshari, F. A. (2020). Groundwater potentiality mapping of tertiary volcanic aquifer in IBB basin, Yemen by using remote sensing and GIS tools. *Journal of Coastal Conservation*, 24 (3), <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00744-w>.
- Awan, U. K. & Ismaeel, A. (2014). A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. *Journal of hydrology*, 519(27), 1368-1382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.049>.
- Bailey, R. T., Wible, T. C., Arabi, M., Records, R. M., & Ditty, J. (2016). Assessing regionalscale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes*, 30 (23), 4420-4433. <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>.
- Berhanu, K. G., & Hatiye, S. D. (2020). Identification of groundwater potential zones using proxy data: case study of Megech watershed, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100676. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100676>.



- Bhowmick, A., & Ojha, J. R., (2019). Integrated GIS and remote sensing techniques for geospatial analysis of groundwater potential zones of Bilate river catchment, main Ethiopian Rift valley. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8 (6), 334–342.
- Anonymous. (2004). Rehabilitation Studies of the Sefidroud irrigation and drainage network, Gilan. Gilan Regional Water Authority, Pandam Consulting Engineers, Volume 10. (In Persian)
- Anonymous. (2006). Quantitative and qualitative modeling of the aquifer and integration of surface water and groundwater in the Astana-Kuchsefahan study area. Ministry of Energy, Gilan Regional Water Authority, Department of Basic Studies of Water Resources, Kamand Ab Consulting Engineers. (In Persian)
- Anonymous. (2009). Guidelines for estimating the subsurface drainage coefficient in irrigated fields in arid and semi-arid areas. Deputy of Strategic Planning and control of the President's Office, No. 492. (In Persian)
- Anonymous. (2014). Study of plains using quantitative and qualitative measurement networks in the Astana-Kuchsefahan study area. Iran Water Resources Management Company, Gilan Regional Water Authority, Department of Basic Studies of Water Resources, Toula Rood Gil Consulting Engineers. (In Persian)
- Bizhanimanzar, M., Leconte, R., & Nuth, M. (2020). Catchment-Scale Integrated Surface Water-Groundwater Hydrologic Modelling Using Conceptual and Physically Based Models: A Model Comparison Study. *Water*, 12(2), 363. <https://doi.org/10.3390/w12020363>.
- Chung, I. M., Kim, N. W., Lee, J. & Sophocleous, M. (2010). Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 18, 1253-1264. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0593-1>.
- Crosbie, R. S., Peeters, L. J., Herron, N., McVicar, T. R. & Herr, A. (2018). Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: use of regression kriging and the chloride mass balance method. *Journal of hydrology*, 561: 1063-1080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.003>.
- Dar, T., Rai, N., & Bhat, A. (2020). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(4), 292-307. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1726562>.
- Das, N., & Mukhopadhyay, S. (2018). Application of Multi-Criteria Decision Making Technique for the Assessment of Groundwater Potential Zones: A Study on Birbhum District, West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 931–955. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0227-7>.
- Dekongmen, B. W., Anornu, G. K., Kabo-Bah, A. T., Larbi, I., Sunkari, E. D., Dile, Y. T., Agyare, A., & Gyamfi, C. (2022). Groundwater recharge estimation and potential recharge mapping in the Afram Plains of Ghana using SWAT and remote sensing techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 17: 100741. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100741>.
- Doble, R. C., Pickett, T., Crosbie, R. S., Morgan, L. K., Turnadge, C., & Davies, P. J. (2017). Emulation of recharge and evapotranspiration processes in shallow groundwater systems. *Journal of hydrology*, 555, 894–908. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.065>.
- Donigian, A. S. (2000). HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture 19, Calibration and verification Issues, Slide L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.
- Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S., Arnold, J. G. & Hotchkiss, R. H. (2002). Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal Hydrology*, 262 (1-4), 209-223. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00029-X).
- Gemitzi, A., Ajami, H. & Richnow, H. H. (2017). Developing empirical monthly groundwater recharge equations based on modeling and remote sensing data – Modeling future groundwater recharge to predict potential climate change impacts. *Journal of Hydrology*, 546:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.005>.
- Guzman, J. A., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Steiner, J. L., Starks, P. J., Arnold, J. G., & Srinivasan, R. (2015). A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. *Environmental Modelling & Software*, 73, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.011>.
- Kim, N., Chung, I., Won, Y. & Arnold, J. (2008). Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of hydrology*, 356(1-2), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024>.
- Loukika, K. N., Venkata Reddy, K., Durga Rao, K. H. V., & Singh, A. (2020). Estimation of Groundwater Recharge Rate Using SWAT MODFLOW Model. *Applications of Geomatics in Civil Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering*, 33, 143–154. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7067-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7067-0_10).

- McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water- Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mosasea, E., Ahiablame, L., Park, S., & Bailey, R. (2019). Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with SWAT-MODFLOW. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100260>.
- Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Abbaspour, K. (2018). A comparison between ten advanced and soft computing models for groundwater qanat potential assessment in Iran using R and GIS. *Theoretical and Applied Climatology*, 131 (3–4), 967–984. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2022-4>.
- Nazarieh, F., Ansari, H., Ziaei, A. N., Davari, k., & Izadi, A. A. (2018). Estimation of the Recharge spatiotemporal pattern by Distribute PRMS model (Case study: Neishaboor watershed). *Iran-Water Resources Research*. 14(1): 226-238. (In Persian)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical document version 2009. *Texas water resource institute*.
- Ntona, M. M., Busico, G., Mastrocicco, M., & Kazakis, N. (2022). Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of The Total Environment*, 846, 157355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355>.
- Pirmoradian, N., & Davatgar, N. (2019). Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural water management*, 213, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003>.
- Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishy, M. (2022). Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain). *Journal of water and soil*, 36(1), 31-52. <https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74890.1138>. (In Persian)
- Saadatpour, A., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., & Izady, A. (2019). Integrated Surface and Groundwater Flow Modeling in Neishaboor Watershed with SWAT-MODFLOW. *Journal of water and soil*, 33(4), 521-536. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.74658>. (In Persian)
- Waseem, M., Kachholz, F., Klehr, W., & Tränckner, T. (2020). Suitability of a Coupled Hydrologic and Hydraulic Model to Simulate Surface Water and Groundwater Hydrology in a Typical North-Eastern Germany Lowland Catchment. *Applied sciences*, 10(4), 1281. <https://doi.org/10.3390/app1004128>.



## Accuracy assessment of groundwater recharge estimation using SWAT and MODFLOW models in paddy fields

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction:

Groundwater recharge values depend on surface hydrological processes temporally and spatially and change with changes in weather conditions, land use, soil, vegetation, etc. It is impossible to include these factors in the models used to simulate groundwater flow, and in most cases, only the effect of precipitation is considered. Aquifer recharge is entered into the model as a percentage of rainfall, and the recharge values are calibrated during the calibration of the model. Recently, advanced models have been developed to model groundwater recharge and determine potential recharge areas, and the SWAT model is one of these models. The SWAT model is designed to predict the effect of different land management methods on the amount of water, sediment, and agricultural chemicals in the level of complex and large watersheds with soil, land use, and different management conditions in the long term.

#### Objective:

In this study, because the SWAT model takes into account the factors affecting the groundwater recharge and in the groundwater balance equation of this model, the recharge parameter includes any surface recharge, including agricultural return water, rainfall, infiltration of rivers and surface runoff, estimation of Astane-Kochsefahan aquifer recharge was estimated by two models; SWAT and MODFLOW, and the results compared together.

#### Materials and methods:

Considering the amount of surface recharge of groundwater in the MODFLOW model consists of infiltration from precipitation, agriculture, drinking, and industrial return flow, as well as infiltration from dam reservoir, at this stage, the pond recharge is not considered in the SWAT model; therefore, it was removed from the recharge values of the MODFLOW model. In this way, the recharge values of the two models were compared.

#### Results and discussion:

Surface recharge in the MODFLOW model, which consists of recharge from precipitation and return flow and infiltration from dam's reservoirs, in the whole aquifer in 2011-2012 was equal to 232.98 million m<sup>3</sup>. Surface recharge rate MODFLOW in the common area with SWAT model in 1391-92 was equal to 78.96 million m<sup>3</sup>, which increased to 102.71 million m<sup>3</sup> along with recharge from the river. The sensitivity analysis of the MODFLOW model showed that the parameters of surface recharge, hydraulic conductivity, and specific drainage coefficient were the most sensitive. Therefore, recharge parameter in groundwater flow modeling has a key role in determining the water balance. The results of SWAT to calculate the recharge to the shallow aquifer showed that the recharge in the common area with the MODFLOW model in 1391-2012 is equal to 136.27 million m<sup>3</sup>, which was estimated to be 138.34 million m<sup>3</sup>, including the recharge from the rivers.

#### Conclusion:

One of the advantages of the SWAT model is that it considers surface water processes in calculation of aquifer recharge, while in MODFLOW, these processes are not considered. Therefore, the recharge values calculated by SWAT have higher accuracy. In addition, the recharge calculated with the SWAT model is more compatible with the trend of changes in recharge values than with MODFLOW because the patterns of precipitation, the release of the Sefidroud Dam, and the released of water in the water transfer channels are considered in the SWAT model. The comparison of the results showed that the total amount of surface recharge estimated by SWAT was more than the estimated amount by MODFLOW. Considering that the groundwater level values simulated by MODFLOW model were lower than the observed water level values, to reach answers close to reality, the recharge values from SWAT are evaluated in groundwater flow modeling.

**Keywords:** Shallow Aquifer, Astane-Kouchsefahan, Water Balance, Surface Recharge, SWAT, MODFLOW.