

Evaluation of MIKE SHE and MIKE 11 Models for Simulating the Hydrology of Surface Water and Groundwater in the Foumanat Plain Aquifer

M. Sodori¹, S. Janatrostami^{2*}, K. Mohammadi³

1, 2- M.Sc. Graduate and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. 3- Senior Hydrogeologist and Groundwater Modeller, HLV2K Engineering Limited, Mississauga, Ontario, Canada.

* (Corresponding Author Email: janatrostami@guilan.ac.ir)

Received: 02-05-2024

Revised: 15-08-2024

Accepted: 20-08-2024

Available Online: 19-12-2024

ارزیابی مدل‌های MIKE SHE و MIKE 11 برای شبیه‌سازی هیدرولوژی آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت فومنات

مریم صدوری^۱، سمیه جنت رستمی^{۲*}، کورش محمدی^۳

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. ۳- کارشناس ارشد مدل‌سازی آب زیرزمینی، شرکت مهندسی HLV2K، اونتاریو، کانادا.

* (ایمانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: janatrostami@guilan.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

Abstract

Shallow alluvial aquifers in watersheds with multiple rivers experience complex hydrological and hydraulic interactions among different subsystems, such as the aerated zone, groundwater, and surface water. In such aquifers, combining hydrological models of surface water and groundwater is crucial for accurately simulating and describing these processes. This study focused on developing and evaluating the MIKE SHE integrated hydrological model and the MIKE 11 hydrodynamic model to simulate hydrological and hydraulic processes in the Foumanat aquifer. To establish a dependable model, groundwater levels and river flow were concurrently calibrated at the control points of observation wells and hydrometric stations within the study area. Calibration was performed based on sensitivity analysis, utilizing parameters such as saturated hydraulic conductivity, leakage coefficients, and Manning's roughness coefficient. Despite the natural heterogeneity of the region, the model demonstrated satisfactory performance, yielding an absolute error of less than one for groundwater level estimation and less than 0.5 for flow rate estimation at the hydrometric stations. During the wet season (October to March), the combined evaporation and transpiration (ETa) amounts to 0.4 times the total rainfall. In contrast, during the dry season (April to September), the combined evaporation and transpiration (ETa) equates to 7.3 times the total rainfall, emerging as the main contributor to water loss. These findings apply to a dry year, implying that these ratios would increase in dry and average years.

Keywords: Groundwater-Surface Water Interaction, Hydrological-Hydraulic Modeling, MIKE SHE, MIKE 11.

چکیده

آبخوان‌های آبرفتی کم‌عمقی که در حوضه‌های آبریز بارودخانه‌های متعدد واقع می‌شوند، با برهمکنش‌های پیچیده هیدرولوژیکی و هیدرولیکی که بین زیرسیستم‌های مختلف از جمله منطقه هواهی، آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی مواجه می‌شوند، ممکن است برای شبیه‌سازی و توصیف قابل اطمینان این فرآیندها، مدل‌های هیدرولوژیکی آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی به‌صورت ادغام شده ضروری باشد. در این مطالعه، مدل هیدرولوژیکی یکپارچه MIKE SHE به‌صورت متصل با مدل هیدرودینامیکی MIKE 11 در آبخوان فومنات، توسعه و ارزیابی شد. برای دستیابی به یک مدل قابل اطمینان، به‌صورت موازی سطوح آب زیرزمینی و جریان رودخانه در نقاط کنترل چاه‌های مشاهده‌ای و ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در محدوده مورد مطالعه، واسنجی انجام شد. براساس تحلیل حساسیت، واسنجی با استفاده از پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع، ضرایب نشت و ضریب زبری مانینگ انجام شد. با وجود ناهمگونی‌های عارضه‌های طبیعی در منطقه، عملکرد مدل به‌صورت میانگین با خطای مطلق کمتر از یک، برای برآورد تراز سطح آب زیرزمینی و کمتر از ۰/۵ برای برآورد دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری قابل قبول بود. در طول فصل تر (مهر تا اسفند)، تبخیر و تعرق واقعی با میانگین ۰/۴ برابر کل بارندگی این دوره و در طول فصل خشک (فروردین تا شهریور)، تبخیر و تعرق واقعی با میانگین ۷/۳ برابر کل بارندگی این دوره به مولفه اصلی تلفات آب تبدیل می‌شود. باتوجه‌به اینکه، این نتایج برای یک سال ترسالی است، این نسبت‌ها برای سال‌های خشک و نرمال افزایش خواهد یافت.

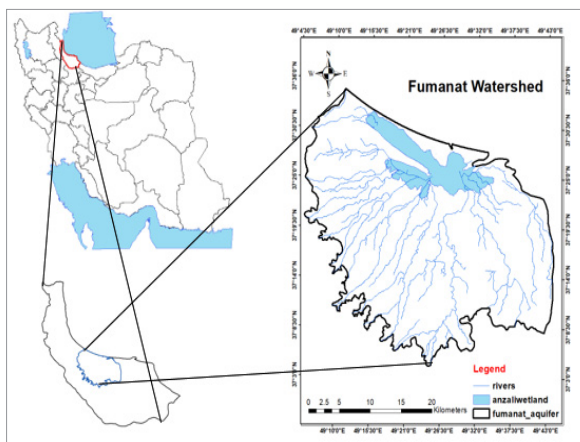
واژه‌های کلیدی: برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، MIKE SHE، MIKE 11.

هرچند که می‌توان منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را به‌عنوان اجزای مجزا تجزیه و تحلیل کرد، اما رویکرد تحلیل کلی برهمکنش‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند داده‌های بهینه را برای کاربردهای مدیریت آب بهتر ارائه دهد (Zhang و همکاران، ۲۰۰۷؛ Guermazi و همکاران، ۲۰۱۹). مدل‌سازی ارتباط رودخانه و آب‌زیرزمینی به دلیل تعداد زیادی داده و نیازهای نرم‌افزاری زمان‌بر است. با این حال، چنین مدل‌هایی در دسترس هستند که چنین مدل‌سازی را امکان‌پذیر می‌کنند. براساس بررسی ادبیات، SWAT-MODFLOW، GSFLOW، MIKE SHE و HydroGeoSphere رایج‌ترین مدل‌ها برای تحلیل شبیه‌سازی تعامل آب سطحی و زیرزمینی هستند (Margarita Ntona و همکاران، ۲۰۲۲). ارزیابی‌های عملکرد مدل‌ها نشان داد مدل MIKE SHE دینامیک هیدرولوژی را بهتر از چندین مدل توزیعی مبتنی بر فرایند (مانند APEX و SWAT) شبیه‌سازی می‌کند (Golmohammadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Wu و همکاران، ۲۰۱۸). MIKE SHE در سراسر دنیا در سیستم‌های یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی استفاده شده است (Botero-Acosta و همکاران، ۲۰۱۸؛ Shu و همکاران، ۲۰۱۸). این مدل کل فرایندهای چرخه هیدرولوژیکی شامل مدل‌های فرایند برای تبخیر و تعرق، جریان زمینی، جریان غیراشباع، جریان آب‌زیرزمینی و جریان کانال و همچنین تعاملات بین آن‌ها را در مدل‌سازی در نظر می‌گیرد. هر یک از این فرایندها می‌توانند در سطوح مختلف توزیع مکانی و پیچیده با توجه به اهداف مطالعه مدل‌سازی، در دسترس بودن داده‌های میدانی و گزینه‌های کاربر نشان داده شوند (Graham و Butts، ۲۰۰۵؛ Shu و همکاران، ۲۰۱۲؛ Doummar و همکاران، ۲۰۱۲). MIKE SHE برای شبیه‌سازی جریان در سیستم رودخانه به MIKE 11 متصل شد. تاکنون در مطالعات زیادی از اتصال مدل MIKE SHE با MIKE 11 استفاده شده است. به‌عنوان مثال Voeckler و همکاران ۲۰۱۴، برای بررسی سهم پتانسیل تغذیه از ذوب برف در آبخوان، Sandu و Vista (۲۰۱۵)، برای ارزیابی فرایند بارش-رواناب، Sterte و همکاران (۲۰۱۸) برای بررسی تأثیر ویژگی‌های حوضه و فرایندهای انجماد-ذوب^۱ بر تبادلات آب سطحی و زیرزمینی و Waseem و همکاران، ۲۰۲۰، با بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در حوضه یک رودخانه، تأثیر نوع کاربری زمین و شرایط جوی محلی را در توزیع مکانی بیلان آب بررسی کردند (Margarita Ntona و همکاران، ۲۰۲۲). با وجود عملکرد موفق MIKE SHE در مدل‌سازی‌ها، MODFLOW یکی دیگر از نرم‌افزارهای پرکاربرد مدل‌سازی آب زیرزمینی است که در بسیاری از مطالعات آب‌های زیرزمینی استفاده شده است (Margarita Ntona و همکاران، ۲۰۲۲؛ Prucha و همکاران، ۲۰۱۶). Akram و همکاران، ۲۰۱۲ با توجه به مزایای خاص دو مدل MIKE SHE و MODFLOW نسبت به

منابع آب‌های زیرزمینی یکی از منابع ارزشمند برای توسعه و پایداری جوامع بشری است (Margarita Ntona و همکاران، ۲۰۲۲). در گذشته برداشت از این منابع برای مصارف مختلف پایدار در نظر گرفته می‌شد، در صورتی که امروزه بررسی وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد این منابع در برخی کشورها به‌طور جدی در معرض کاهش است. به دلیل این تهدید، درک فرآیندهایی که آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مهم است (Akram و همکاران، ۲۰۱۲). در مدیریت برداشت سفره‌های کم‌عمقی که مستقیماً به پیکره آب سطحی متصل هستند، باید دقت شود ارتباط دو سیستم آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در نحوه جریان آب داشته باشد. یکی از ویژگی‌های خاص مناطق با سطح ایستابی کم‌عمق، واکنش سریع و قابل توجه سطح آب نسبت به تنش‌ها (بارش) به دلیل رفتار دینامیکی خاص آن‌ها است (Waseem و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش‌های Sophocleous (۱۹۸۵) و Bizhanimanzar و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد، مقدار نوسانات سطح آب زیرزمینی در این مناطق می‌تواند بسیار بیشتر از آن چیزی باشد که با فرض مقدار آبدهی ویژه ثابت در مدل‌های ادغام شده آب سطحی و زیرزمینی انتظار می‌رود.

در چرخه هیدرولوژیکی، آب از اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و خاک تبخیر می‌شود و بخار آب به داخل اتمسفر منتقل می‌شود و به شکل باران یا برف در زمین می‌بارد، به آب‌زیرزمینی نفوذ می‌کند و به‌عنوان جریان پایه به دریاها و رودخانه‌ها تخلیه می‌شود. چرخه هیدرولوژیکی یک حلقه بسته است و مداخلات انسان‌ها آب را حذف نمی‌کند اما نسبتاً بر حرکت و انتقال آب در چرخه هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد (Margarita Ntona و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به نقش مهم رواناب تولیدی در رودخانه‌ها و مناطق پست حوضه‌های آبریز بر روی تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های کم‌عمق، ارزیابی جامع شرایط هیدرولوژیکی ضروری است (Bizhanimanzar و همکاران، ۲۰۲۰). فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز سفره‌های کم‌عمق 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 و همکاران، ۲۰۲۰). مداخلات انسانی مانند کاربری زمین، زهکشی مصنوعی، برداشت آب زیرزمینی از طریق پمپ‌ها، سازه‌های هیدرولیکی رودخانه و غیره نیز بر بیلان طبیعی آب در آبخوان‌های کم‌عمق تأثیر می‌گذارد. درک تبادلات افقی و عمودی آب بین سیستم‌های سطحی و زیرسطحی بسیار مهم است و شاید سخت‌ترین بخش فرآیند مدل‌سازی باشد (Margarita Ntona و همکاران، ۲۰۲۲)، که به دلیل پیچیدگی و چالش‌های عددی، این مدل‌ها تاکنون به ندرت استفاده شده‌اند.

پست‌ترین نقطه برابر ۲۶ - متر می‌باشد. متوسط ارتفاع در بخش ارتفاعات برابر ۱۰۰/۳۶ متر و در بخش دشت برابر ۱۱/۶ متر نسبت به دریای آزاد می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز فومنات

رودخانه‌های بررسی شده در این مطالعه که از طریق تالاب انزلی به دریای خزر می‌پیوندند شامل بهمبر، مرغک، خالکایی ماسال، پلنگور، ماسوله رودخان، شاخرز، قلعه رودخان، پسیخان و گشت رود است. این رودخانه‌ها دارای جریان دائمی می‌باشند و از ارتفاعات جنوب غرب منطقه سرچشمه گرفته و در جهت شمال شرق جریان یافته و پس از عبور از دشت فومنات و آبیاری اراضی کشاورزی این منطقه به تالاب انزلی می‌ریزند. لازم به ذکر است که مدل ریاضی آب سطحی و زیرزمینی برای سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تهیه شد.

• جمع‌آوری اطلاعات و داده‌ها

یکی از مهمترین مراحل در مدل‌سازی، جمع‌آوری داده‌های لازم می‌باشد. در انجام این مدل‌سازی ابتدا آمار و اطلاعات مربوط به محدوده مطالعاتی فومنات از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان دریافت شد. این آمار شامل شیب فایل‌های محدوده فومنات و آبخوان به همراه شبکه‌بندی، لایه توپوگرافی منطقه، داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی، سینوپتیک و هیدرومتری، داده‌های مربوط به چاه‌های مشاهداتی و چاه‌های بهره‌برداري منطقه به همراه مقادیر تخلیه و همچنین داده‌های مربوط به مقاطع رودخانه‌های حوضه می‌باشند. داده‌ها برای یک دوره یک ساله از مهر ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵ آماده شد. بعد از تهیه مدل مفهومی، محدوده آبخوان با سلول‌هایی به ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر (۵۷ ستون و ۵۷ ردیف) شبکه‌بندی شد.

- داده‌های آب زیرزمینی: لایه توپوگرافی سطح زمین از نقشه DEM منطقه با مقیاس ۹۰ متر تهیه شد. پارامترهای هیدرولیکی آبخوان برای مدل‌سازی در محیط اشباع شامل قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی افقی، هدایت هیدرولیکی عمودی، ضریب ذخیره و آبدی ویژه

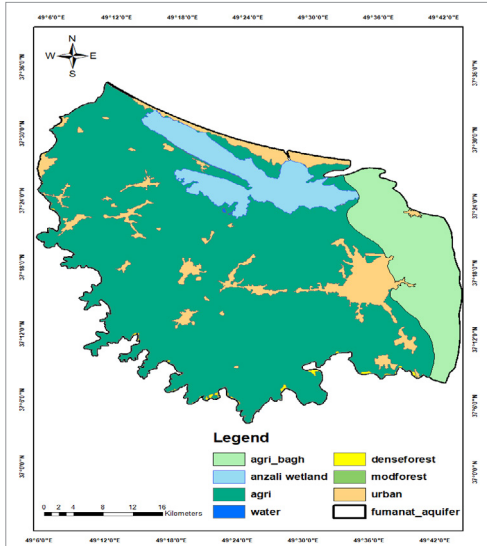
یکدیگر، دو مدل را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با اینکه هر دو مدل MIKE SHE و MODFLOW مسائل جریان آب زیرزمینی را با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌کنند، با این حال تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. مزیت اصلی مدل MIKE SHE نسبت به مدل MODFLOW این است که مدل MIKE SHE تمام اجزای منفرد چرخه هیدرولوژیکی را از طریق پنج ماژول اساسی به درستی در نظر می‌گیرد و از طریق آمیختن رواناب سطحی و منطقه غیراشباع، نفوذ و تبخیر و تعرق مرجع و تغذیه را مطابق قوانین فیزیکی مرتبط محاسبه می‌کند. درحالی‌که MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی فقط در منطقه آب زیرزمینی اشباع محدود شده است و محاسبات ناحیه غیراشباع باید قبل از توسعه مدل MODFLOW به‌طور جداگانه انجام شود. قابلیت کالیبراسیون خودکار و استفاده از داده‌های کمتر برای توسعه مدل از دیگر مزایای مدل MODFLOW نسبت به MIKE SHE است. بنابراین واضح است که برای مسائل ساده جریان آب زیرزمینی که آبیاری وجود ندارد، MODFLOW مدل مناسب‌تری است (Akram و همکاران، ۲۰۱۲).

آبخوان فومنات که در مجاورت تالاب انزلی واقع در استان گیلان است، یک آبخوان کم عمق است که تراز سطح آب زیرزمینی در آن نزدیک سطح زمین است. بنابراین، باید دقت شود که ارتباط دو سیستم آب سطحی و زیرزمینی در این محدوده، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در نحوه جریان آب داشته باشد. زیرا در چنین سیستم‌هایی به دلیل رفتار فیزیکی خاص آن‌ها، سطح آب نسبت به تنش‌های اعمال شده واکنش سریع و قابل توجهی دارد. به این ترتیب، در این مطالعه از یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی، MIKE SHE، همراه با یک مدل هیدرودینامیکی (MIKE 11) برای تهیه مدل شبیه‌سازی آب سطحی و زیرزمینی آبخوان فومنات استفاده شد.

مواد و روش‌ها

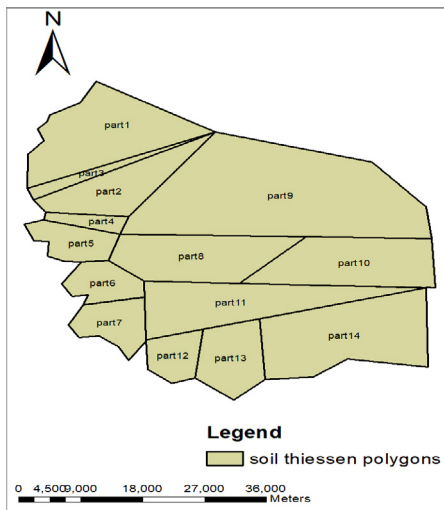
• معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی فومنات در شمال ایران، استان گیلان قرار دارد. این محدوده از شمال به تالاب انزلی و دریای خزر، از شرق به محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان، از جنوب و غرب با واسطه خط الرأس ارتفاعات تالش با محدوده‌های مطالعاتی طارم-خلخال و تالش مجاورت پیدا می‌کند. از طریق دریای خزر امکان ارتباط با مناطق ساحلی استان‌های گیلان و مازندران و کشورهای واقع در حاشیه دریای خزر فراهم می‌باشد. وسعت محدوده مطالعاتی برابر ۳۸۲۸/۸ کیلومتر مربع است که ۲۰۲۷/۳ کیلومتر مربع (۵۳ درصد) آن را دشت و ۱۸۰۱/۵ کیلومتر مربع (۴۷ درصد) ارتفاعات تشکیل می‌دهند. ارتفاع بلندترین نقطه محدوده برابر ۳۱۵۰ متر و



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی آبخوان فومنات

شرایط خاک در محیط غیراشباع: ناحیه غیر اشباع معمولاً ناهمگن و به صورت عمودی می‌باشد زیرا نیروی ثقل در طول فرایند نفوذ نقشی اساسی ایفا می‌کند. بنابراین جریان غیراشباع در MIKE SHE به صورت عمودی و تنها در یک بعد محاسبه می‌شود. در این مطالعه، برای محاسبه جریان در ناحیه غیر اشباع، از روش بیلان آب به صورت دو لایه‌ای استفاده شد، این روش ناحیه غیر اشباع را به دو منطقه ریشه و منطقه بین ریشه و سطح ایستابی تقسیم می‌کند. برای تعیین مشخصات بافت خاک از روش تیسن بندی استفاده شد که نقشه آن در شکل (۴) و مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است. ناحیه‌های تیسن بندی شده از نظر جنس و مشخصات خاک و لاگ های حفاری موجود در منطقه با هم تفاوت دارند. باتوجه به تغییرات مکانی بافت خاک و کاربری زمین این اراضی یکپارچه، مدل حوضه به ۱۴ زیرحوضه تقسیم شد.

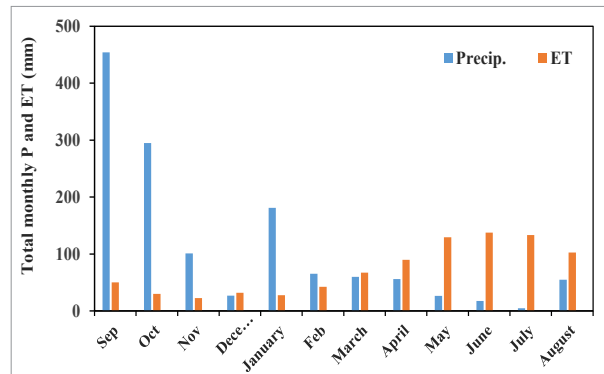


شکل ۴- تقسیم بندی پلیگون‌های جنس خاک در آبخوان فومنات

می‌باشد که از طریق آزمون‌های پمپاژ انجام شده و الگوهای حفاری موجود در منطقه، به صورت نقطه‌ای محاسبه و در محیط ArcGIS درون‌یابی و به صورت داده‌های رقومی به محیط مدل وارد شدند. لازم به ذکر است در این بخش از هدایت هیدرولیکی عمودی صرف نظر شد و مقدار هدایت هیدرولیکی افقی در بازه ۲ تا ۲۲ متر بر روز قرار می‌گیرد.

مقادیر اولیه تراز سطح ایستابی نقطه شروعی برای اجرای شرایط اولیه در شبیه‌سازی‌های پایدار و گذرا می‌باشد. انتخاب مقادیر اولیه ممکن است بر نرخ همگرایی عددی نیز تاثیرگذار باشد. به این منظور برای محاسبه بار هیدرولیکی اولیه از داده‌های سطح ایستابی مهر ۱۳۹۴ استفاده شد. اطلاعات مربوط به برداشت آب زیرزمینی باتوجه به مقادیر پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری به دست آمد. برای مقادیر تغذیه آب زیرزمینی، تغذیه حاصل از بارندگی، آب برگشتی کشاورزی و تغذیه توسط رودخانه در نظر گرفته شد.

- بارش و تبخیر و تعرق مرجع: بارش با استفاده از داده‌های روزانه برای یک سال، با مراجعه به ایستگاه باران‌سنج هواشناسی در ایستگاه مورد نظر به دست آمد. تبخیر و تعرق مرجع نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک شامل طول و عرض جغرافیایی، رطوبت، ساعات آفتابی، سرعت باد و غیره به روش پنمن-مانتیث (Allen و همکاران، ۲۰۰۶) برای ایستگاه مورد نظر به دست آمد.



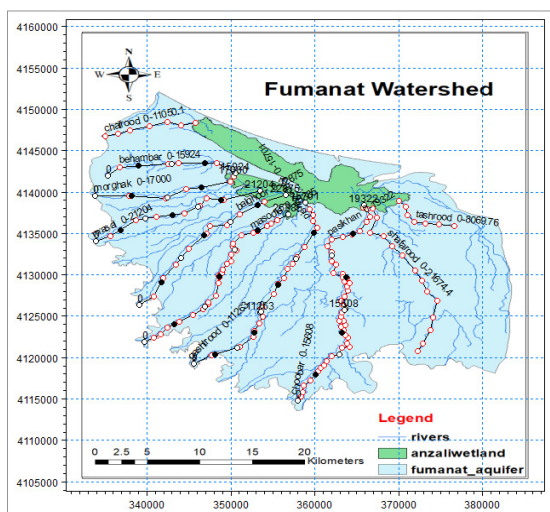
شکل ۲- مقادیر بارش و تبخیر تعرق مرجع در سال آبی ۱۳۹۴-۹۵

- کاربری اراضی: کاربری اراضی نقش بسیار مهمی در هیدرولوژی دارد. برای تعریف خصوصیات سطح زمین از نقشه کاربری اراضی، داده‌های حداکثر عمق توسعه ریشه (RD) و شاخص سطح برگ (LAI) استفاده می‌شود. نقشه کاربری اراضی در شکل (۳) آورده شده است. باتوجه به این نقشه، سطح وسیعی از پوشش گیاهی منطقه شالیزارهای برنج است و بقیه اراضی شامل باغات (باغات چای) و سطح آب است. حداکثر عمق توسعه ریشه (RD) و شاخص سطح برگ (LAI) برای باغات چای، شالیزارهای برنج باتوجه به چهار مرحله نشاء، پنجه زنی، خوشه دهی و رسیدن، از فائو ۵۶ (Allen و همکاران، ۱۹۹۸) استفاده شد.

جدول ۱- بافت خاک مربوط به پلیگون‌های جنس خاک

Part1	sand,clay,rubble,gravel
part2	clay,rubble,sand,sandyclay
Part3	silty sand,sand,gray clay
Part4	sand,silt,clay,grayclay,rubble
Part5	sandy clay,sand,gravel
Part6	brown clay,gray clays,sandy gravel
Part7	sandy clay,sand,rubble
Part8	clay,gravel,sandy gravel
Part9	sand,gravel,sandygravel,rubble,clay
Part10	clay,sand,sandyclay,stickyclay
Part11	clay,sand,rubble
Part12	sticky brown clay,silt,sand,rubble,gray clay
Part13	loam,rubble,sand,clay
Part14	sandy clay,sand,rubble,sandy gravel

مشخص شد. سپس نقاطی به‌عنوان نقاط ورودی حوضه آبریز برای مدل رواناب بارش در طول شاخه رودخانه تعیین شد. این نقاط دیجیتالی، شامل مختصات جغرافیایی می‌باشند که در این بخش نرم‌افزار امکان ویرایش دارند. در ادامه زنجیره‌هایی باتوجه‌به نقاط دیجیتالی متعلق به هرکدام از شاخه‌های رودخانه‌های منتهی به تالاب، تعریف شد (شکل ۶). طول این زنجیره‌ها از بالادست تا پایین‌دست تالاب متغیر می‌باشد.



شکل ۶- ترسیم مسیر رودخانه‌ها در محدوده آبخیز فومنات

• ارزیابی مدل MIKE SHE

برای بررسی کارکرد مدل و ارزیابی آن، از آماره‌های میانگین خطای مطلق MAE ^۲، ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ و ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) ^۳ استفاده شد. معادلات هر یک از آماره‌های نام‌برده در ادامه آورده شده است. در روابط (۱ تا ۳)، Y_{obs_t} و Y_{est_t} به‌ترتیب مقدار برآورد شده و مقدار مشاهده‌ای پارامتر Y در زمان t ؛ کل دوره زمانی T میانگین مقادیر مشاهده‌ای پارامتر Y است.

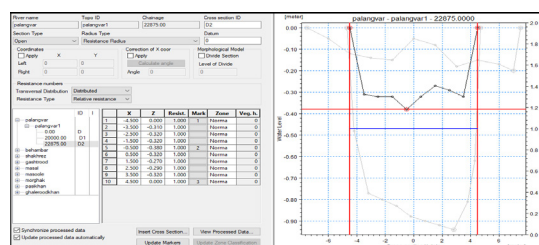
$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |Y_{est_t} - Y_{obs_t}| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Y_{est_t} - Y_{obs_t})^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Y_{est_t} - Y_{obs_t})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_{obs_t} - \bar{Y}_{obs})^2} \quad (3)$$

مقادیر MAE و $RMSE$ هر چه به صفر نزدیکتر باشد به معنای کمتر بودن مقدار خطا یا همان اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده است. مقادیر NSE بین ۱ تا $-\infty$ به‌دست می‌آید و هنگامی که NSE برابر یک می‌شود، مقدار پارامتر برآورد شده با مقدار پارامتر مشاهده‌ای برابر است و به این معنا است که مدل از نظر عملکرد و دقت در بهترین وضعیت است. بنابراین در ارزیابی مدل‌سازی هر چقدر NSE به ۱ نزدیکتر باشد، بهتر است.

داده‌های سطح مقطع رودخانه: مقاطع عرضی مورد استفاده در مدل همراه با اطلاعات آن‌ها از قبیل دبی، فاصله طولی، عمق و سطح مقطع توسط سازمان آب و فاضلاب استان گیلان در قالب مطالعات حد و حریم بستر رودخانه‌های فومنات منتهی به تالاب انزلی، تهیه شد. سپس مشخصات مربوط برای هر رودخانه در بخش مقاطع عرضی وارد شد که این اطلاعات برای رودخانه پلنگور به‌عنوان نمونه در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵- داده‌های سطح مقطع رودخانه پلنگور با استفاده از مدل

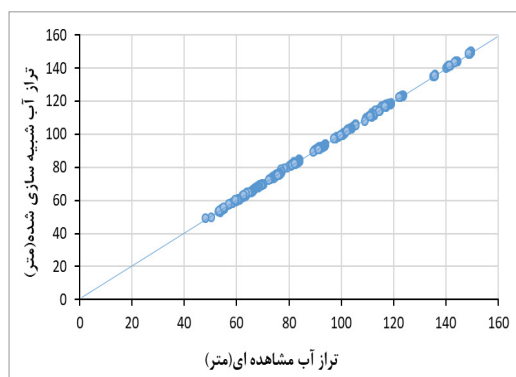
در ادامه، پارامترهای هیدرودینامیک مانند ضریب زبری، اصطکاک کف رودخانه، ضریب نشست و همچنین اطلاعات مربوط به فایل خروجی و غیره وارد شد. در قسمت شرایط مرزی مربوط به جریان رودخانه‌ها، شرایط مرزی بالادست به‌صورت جریان دبی و شرایط مرزی پایین دست به‌صورت سطح آب برحسب متر تعیین شد.

• اتصال دو مدل MIKE SHE و MIKE 11

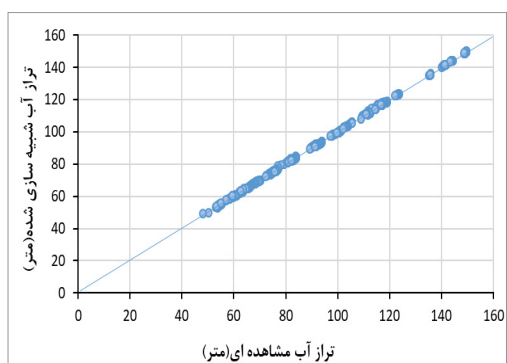
در تهیه سیستم رودخانه برای اتصال به مدل MIKE SHE، فایل با نام و فرمت mike11.sim آماده و به نرم‌افزار وارد شد. به‌این‌منظور ابتدا مسیر و شبکه رودخانه‌ها در بخش Network

در ارزیابی تراز سطح آب زیرزمینی چاه‌های منتخب نیز نشان داد مقادیر به عدد یک نزدیک هستند.

لازم به ذکر است که پس از مرحله واسنجی، برای اعتبارسنجی، مدل تهیه شده برای سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ اجرا و نتایج مدل‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد. نتایج اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی چند چاه منتخب در شکل (۱۱) و در شبیه‌سازی دبی رودخانه‌ها در چند ایستگاه هیدرومتری منتخب در شکل (۱۲) آورده شده است. مشاهده می‌شود دقت مدل در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی تفاوت چندانی نکرده است و باتوجه به مقادیر شاخص‌های آماری (جدول ۳) مدل‌سازی در این بخش رضایت بخش می‌باشد. در مرحله اعتبارسنجی، عملکرد مدل به صورت میانگین با خطای مطلق کمتر از ۰/۵ برای برآورد تراز سطح آب زیرزمینی و دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری به دست آمد. مقدار ضریب نش ساتکلیف در ایستگاه‌های هیدرومتری بسیار به یک نزدیک است که نشان از دقت مدل‌سازی در این بخش است و مقدار این ضریب در ارزیابی تراز سطح آب زیرزمینی چاه‌های منتخب نیز نشان داد مقادیر به عدد یک نزدیک هستند. مقادیر به دست آمده شاخص‌های آماری خطا در این مطالعه با مطالعات گذشته مانند Shu و همکاران (۲۰۱۸)؛ Zhang و همکاران (۲۰۲۱) و Waseem و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی داشت.



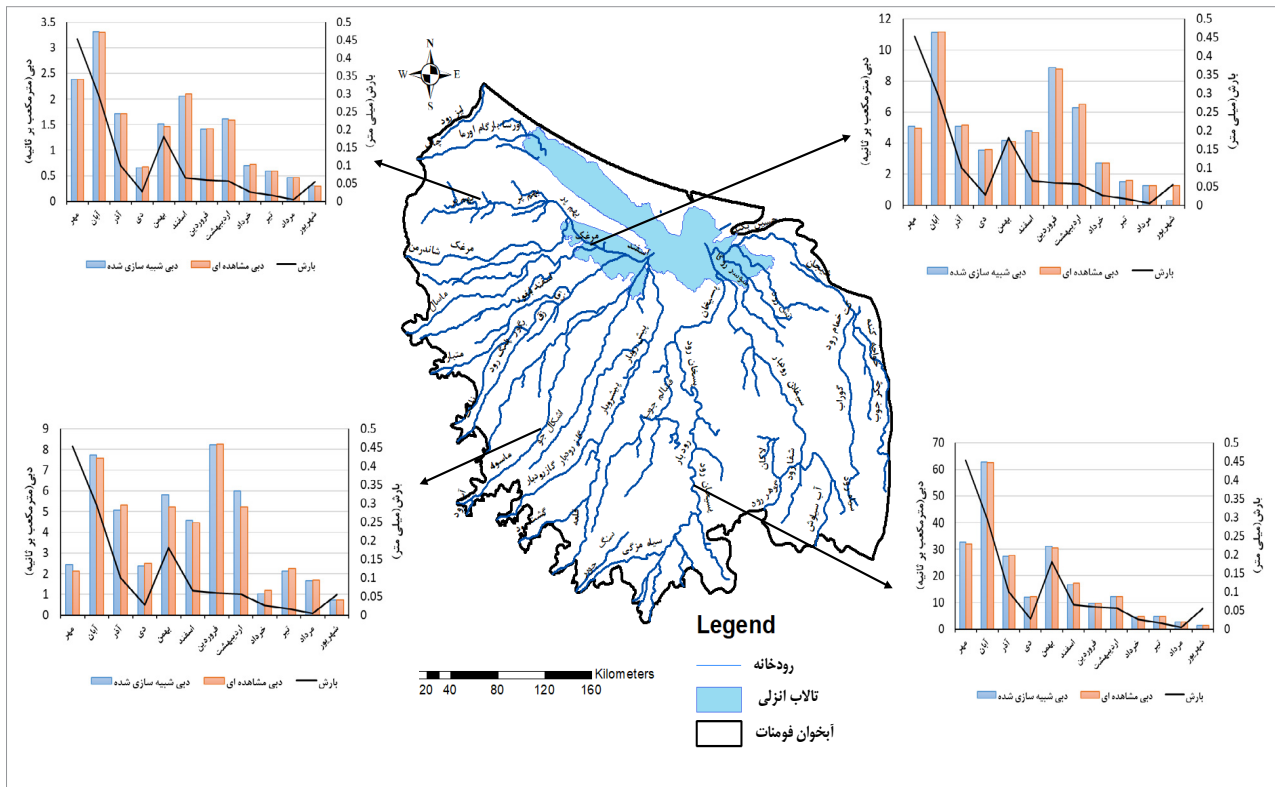
شکل ۷- مقایسه مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده پس از واسنجی



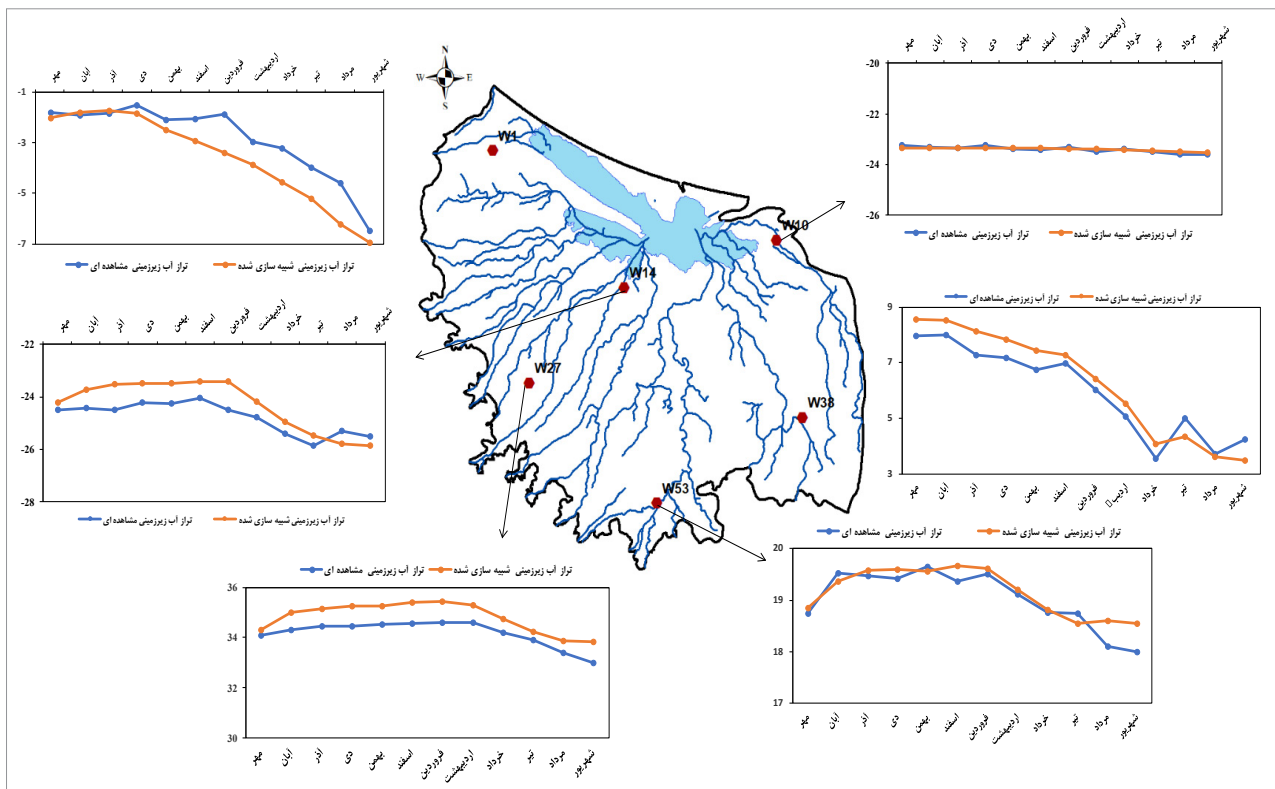
شکل ۸- مقایسه مقادیر دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده پس از واسنجی

تحلیل حساسیت به منظور بررسی تاثیر پارامترها بر خروجی مدل و جلوگیری از تغییرات غیرمنطقی پارامترها در فرآیند واسنجی انجام می‌شود. در واسنجی نیز سعی می‌شود تا حد امکان داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده منطبق شود و این فرآیند تا رسیدن به نتیجه قابل قبول تکرار خواهد شد. به این ترتیب مدل آبخوان فومنتات در دوره زمانی ۹۵-۱۳۹۴ باتوجه به شرایط مرزی مشخص شده شبیه‌سازی و باتوجه به نتایج آنالیز حساسیت واسنجی شد.

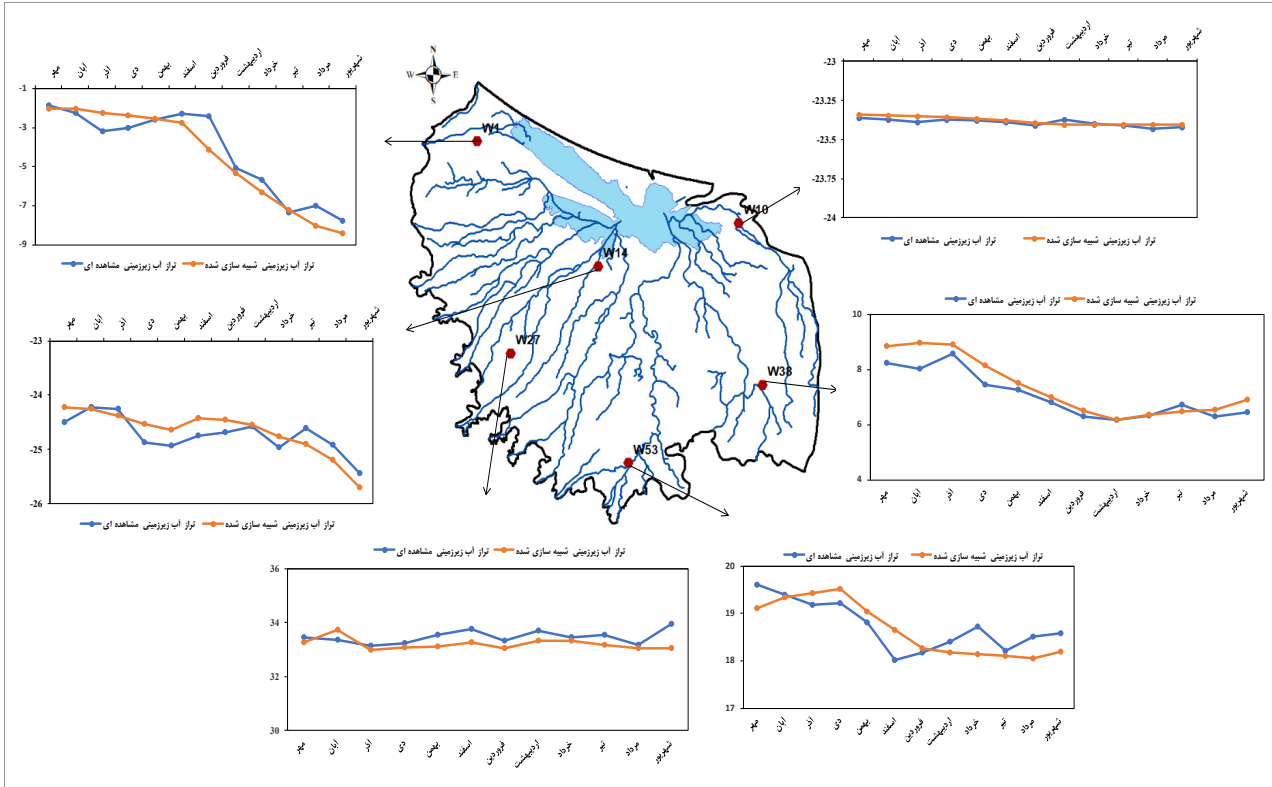
باتوجه به نتایج آنالیز حساسیت، در فرآیند واسنجی، ضرایب مانینگ و پارامترهای هیدرودینامیکی در مدل MIKE 11 بررسی شد و در مدل MIKE SHE نیز پارامترهایی از قبیل رطوبت اشباع، رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی بررسی شدند. در طول بازه زمانی مدل‌سازی، مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل مقایسه و طی واسنجی اختلاف این سطوح تا رسیدن به یک خطای قابل قبول کاهش پیدا کرد. شکل (۷) مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را پس از فرآیند واسنجی در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در محدوده مدل‌سازی نشان می‌دهد. همچنین، مقایسه مقادیر دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در رودخانه‌های واقع در محدوده مدل‌سازی در شکل (۸) آورده شده است. پراکنش نقاط نسبت به خط نیمساز در شکل‌های (۷) و (۸) همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دو مدل MIKE 11 و MIKE SHE را نشان می‌دهد که بیانگر قابل قبول بودن نتایج واسنجی است. علاوه بر این، رابطه بین بارش و دبی رودخانه‌ها در چند رودخانه منتخب در محدوده مدل‌سازی نیز به عنوان نمونه در شکل (۹) بررسی و مقایسه شد. ارزیابی‌ها نشان داد هیدروگراف‌های جریان شبیه‌سازی شده و بارندگی در بیشتر ماه‌ها روند مشابهی داشتند که سازگاری بین پارامترهای مدل را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در چند چاه منتخب در شکل (۱۰) آورده شده است. بررسی این شکل و مقایسه روند تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بیانگر منطقی بودن روندهای به دست آمده در مرحله شبیه‌سازی است. علاوه بر این، مقادیر شاخص‌های آماری مورد بررسی در این مطالعه در رودخانه‌ها و همچنین در چاه منتخب در شکل‌های (۹) و (۱۰) در جدول (۲) آورده شده است. باتوجه به مقادیر به دست آمده در جدول (۲) نتایج مدل‌سازی رضایت بخش بود. بعد از انجام واسنجی مدل، عملکرد مدل به صورت میانگین با خطای مطلق کمتر از یک برای برآورد تراز سطح آب زیرزمینی و کمتر از ۰/۵ برای برآورد دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری به دست آمد. مقدار ضریب نش ساتکلیف در ایستگاه‌های هیدرومتری بسیار به یک نزدیک است که نشان از دقت مدل‌سازی در این بخش است و مقدار این ضریب



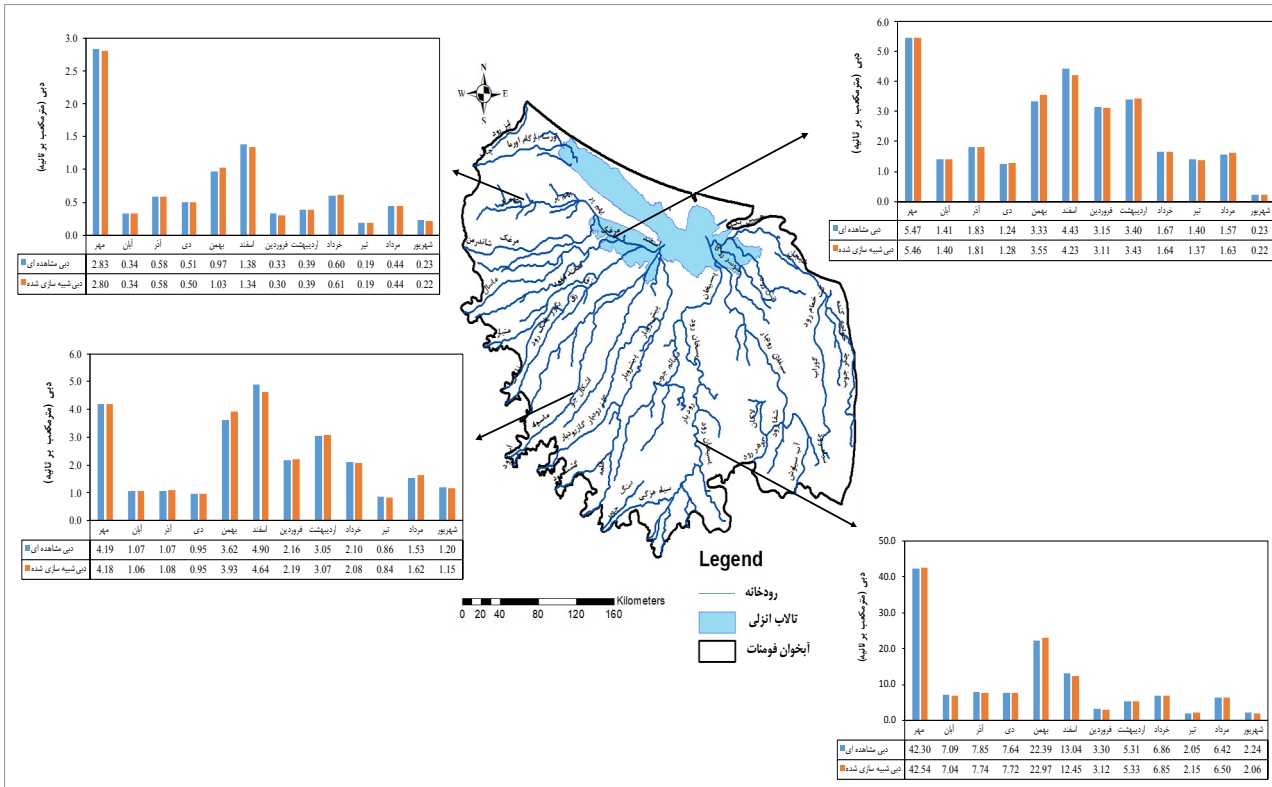
شکل ۹- مقایسه مقادیر بارش و دبی شبیه‌سازی شده در چند رودخانه منتخب در محدوده مدل‌سازی



شکل ۱۰- مقایسه روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در چاه‌های منتخب در محدوده مدل‌سازی



شکل ۱۱- مقایسه روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در چاه‌های منتخب در مرحله اعتبارسنجی



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر بارش و دبی شبیه‌سازی شده در چند رودخانه منتخب در مرحله اعتبارسنجی

جدول ۲- مقایسه شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در رودخانه‌ها و چاه‌های منتخب

شاخص آماری	رودخانه بهمبر	رودخانه مرغک	رودخانه ماسوله	رودخانه پسیخن	W1	W10	W14	W27	W38	W53
MAE	۰/۰۸۷	۰/۱۵۶	۰/۰۸۳	۰/۵۲۵	۰/۷۶۳	۰/۰۶۰	۰/۶۲۳	۰/۶۴۹	۰/۵۴۷	۰/۲۰۲
RMSE	۰/۲۵۲	۰/۳۸۲	۰/۲۴۲	۱/۱۸۲	۰/۹۳۲	۰/۰۶۷	۰/۶۶۶	۰/۶۷۸	۰/۵۸۱	۰/۲۵۵
Nash-Sutcliffe	۰/۹۸۵	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۵۷۵	۰/۶۷۸	۰/۳۹۵	۰/۹۳۲	۰/۸۵۷	۰/۷۷۵

جدول ۳- مقایسه شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در رودخانه‌ها و چاه‌های منتخب در مرحله اعتبارسنجی

شاخص آماری	رودخانه بهمبر	رودخانه مرغک	رودخانه ماسوله	رودخانه پسیخن	W1	W10	W14	W27	W38	W53
MAE	۰/۰۴۳	۰/۰۶۵	۰/۰۵۹	۰/۴۵۵	۰/۵۷۲	۰/۰۱۹	۰/۲۲۴	۰/۳۲۵	۰/۳۵۱	۰/۳۱۹
RMSE	۰/۱۳۹	۰/۱۴۶	۰/۱۳۸	۱/۰۵۸	۰/۷۳۸	۰/۰۲۱	۰/۲۴۶	۰/۳۹۲	۰/۴۳۷	۰/۳۶۷
Nash-Sutcliffe	۰/۹۹۳	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۸۷۹	۰/۰۰۷	۰/۴۱۹	۰/۷۴۸	۰/۷۱۲	۰/۴۴۴

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل هیدرولوژیکی یکپارچه همراه با یک مدل هیدرودینامیکی با هدف شبیه‌سازی آبخوان دشت فومنات توسعه داده شد. به دلیل اینکه در آبخوان‌هایی که تراز سطح آب زیرزمینی آن‌ها بسیار به سطح زمین نزدیک است، فرآیندهای هیدرولوژیکی در این مناطق تحت تاثیر برهمکنش‌های آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی هستند. بنابراین از مدل هیدرولوژیکی یکپارچه MIKE SHE که به صورت متصل با مدل هیدرودینامیکی MIKE 11 است برای شبیه‌سازی جریان آب سطحی و زیرزمینی آبخوان فومنات استفاده شد که تاکنون از این ابزارها برای شبیه‌سازی یکپارچه هیدرولوژیکی-هیدرولیکی در این منطقه استفاده نشده بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دقت مدل در ارزیابی تراز آب زیرزمینی و دبی جریان با خطای مطلق کمتر از ۰/۵ می‌باشد و ضریب نش ساتکلیف به عدد یک نزدیک است، که حاکی از اعتبار بالای مدل‌سازی است. نتایج اعتبارسنجی مدل نیز نتایج رضایت‌بخش و هماهنگی با داده‌های مشاهداتی را به همراه داشت. بنابراین، ارزیابی‌های انجام شده بر روی نتایج مدل، توانایی مدل‌های ادغام شده را برای توصیف هیدرولوژی دشت نشان داد. همچنین واسنجی هم‌زمان آب‌های سطحی و زیرزمینی در مدل‌های MIKE 11 و MIKE SHE، از مزایای نحوه مدل‌سازی است و بالا بودن درجه اطمینان نتایج یک مدل یکپارچه را نشان می‌دهد. این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی برای مدیریت منابع آب و طراحی استراتژی‌های پایدار در مواجهه با چالش‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد و پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده به بررسی تأثیرات ناشی از تغییرات اقلیمی و کاربری زمین بر منابع آب بپردازند تا تأثیرات احتمالی بر کیفیت و کمیت منابع آبی شناسایی و مدیریت شوند.

پی‌نوشت‌ها

- 1-freeze-thaw processes
- 2-Mean Absolute Error
- 3-Root Mean Square Error
- 4-Nash-Sutcliffe Efficiency

منابع

- Akram, F., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., & Amir, M.S.I.I. (2012). A Comparative View of Groundwater Flow Simulation Using Two Modelling Software - MODFLOW and MIKE SHE. 18th Australasian Fluid Mechanics Conference. Launceston, Australia.
- Allen, R., PEREIRA, L., RAES, D., & SMITH, M. (1998). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO, Paper No. 56. Water Resources, Development and Management Service. Rome, Italy.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Yrisarary J.B., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I., & Elliott R.L. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO 56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1), 1-22. doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007
- Bizhanimanzar, M., Leconte, R., & Nuth, M. (2019). Modelling of shallow water table dynamics using conceptual and physically based integrated surface-water-ground-

- SHE to Simulate Hydrology in Argesel River Catchment. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 517–524. doi: [10.1016/j.aaspro.2015.08.135](https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.135)
- Shu, Y., Villholth, K. G., Jensen, K.H., Stisen, S., & Lei, Y. (2012). Integrated hydrological modeling of the North China Plain: Options for sustainable groundwater use in the alluvial plain of Mt. Taihang. *Journal of Hydrology*, 464–465, 79–93. Doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.048.
- Shu, Y., Li, H., & Lei, Y. (2018). Modelling Groundwater Flow with MIKE SHE Using Conventional Climate Data and Satellite Data as Model Forcing in Haihe Plain, China. *Water*, 10(10), 1295. doi: [10.3390/w10101295](https://doi.org/10.3390/w10101295)
- Sophocleous, M. (1985). The Role of Specific Yield in Ground-Water Recharge Estimations: A Numerical Study. *Groundwater*, 23, 52–58. doi: [10.1111/j.1745-6584.1985.tb02779.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1985.tb02779.x)
- Sterte, E.J., Johansson, E., Sjöberg, Y., Karlsen, R. H., & Laudon, H. (2018). Groundwater-surface water interactions across scales in a boreal landscape investigated using a numerical modeling approach. *Journal of Hydrology*, 560, 184–201. doi: [10.1016/j.jhydrol.2018.03.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.011)
- Voeckler, H.M., Allen, D.M., & Alila, Y. (2014). Modeling coupled surface water groundwater processes in a small mountainous headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 517, 1089–1106. doi: [10.1016/j.jhydrol.2014.06.015](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.015)
- Waseem, M., Kachholz, F., Klehr, W., & Tränckner, J. (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. doi: [10.3390/app10041281](https://doi.org/10.3390/app10041281)
- Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., Lambert, F.H., Gillett, N.P., Solomon, S., Stott, P.A., & Nozawa, T. (2007). Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448, 461–465. doi: [10.1038/nature06025](https://doi.org/10.1038/nature06025)
- Zhang, J., Zhang, M., Song, Y., & Lai, Y. (2021). Hydrological simulation of the Jialing River Basin using the MIKE SHE model in changing climate. *Journal of Water and Climate change*, 12(6), 2495–2514. doi: [10.2166/wcc.2021.253](https://doi.org/10.2166/wcc.2021.253)
- Wu, W., Yang, Z., Tian, B., Huang, Y., Zhou, Y., & Zhang, T. (2018). Impacts of coastal reclamation on wetlands: Loss, resilience, and sustainable management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 210, 153–161. doi: [10.1016/j.ecss.2018.06.013](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.06.013)
- water hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5), 2245–2260. doi: [10.5194/hess-23-2245-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-2245-2019)
- 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. doi: [10.3390/w12020363](https://doi.org/10.3390/w12020363)
- Botero-Acosta, A., Chu, M.L., & Huang, C. (2018). Impacts of environmental stressors on nonpoint source pollution in intensively managed hydrologic systems. *Journal of Hydrology*, 579, 124056. doi: [10.1016/j.jhydrol.2019.124056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124056)
- Doumar, J., Sauter, M., & Geyer, T. (2012). Simulation of flow processes in a large-scale karst system with an integrated catchment model (Mike She) – Identification of relevant parameters influencing spring discharge. *Journal of Hydrology*, 426–427, 112–123. doi: [10.1016/j.jhydrol.2012.01.021](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.021)
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., & Rudra, R. (2014). Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1(1), 20–39. doi: [10.3390/hydrology1010020](https://doi.org/10.3390/hydrology1010020)
- Graham, D.N., & Butts, M. B. (2005). Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. In *Watershed Models*, Editors: V.P. Singh & D.K. Frevert, Pages 245–272, CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Guermazi, E., Milano, M., Reynard, E., & Zairi, M. (2019). Impact of climate change and anthropogenic pressure on the groundwater resources in arid environment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(1), 73–92. doi: [10.1007/s11027-018-9797-9](https://doi.org/10.1007/s11027-018-9797-9)
- Margarita Ntona, M., Busico, G., Mastrociccio, 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. doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.157355](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355)
- Prucha, B., Graham, D., Watson, M., Avenant, M., Esterhuysen, S., Joubert, A., Kemp, M., King, J., Roux, P., Redelinghuys, N., Rossouw, L., Rowntree, K., Seaman, M., Sokolic, F., Rensburg, L., Waal, B., Tol, J., & Vos, T. (2016). MIKE-SHE integrated groundwater and surface water model used to simulate scenario hydrology for input to DRIFT-ARID: the Mokolo River case study. *Water SA*, 42(3), 384–398. doi: [10.4314/wsa.v42i3.03](https://doi.org/10.4314/wsa.v42i3.03)
- Sandu, M., & Virsta, A. (2015). Applicability of MIKE