نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۲، مرداد - شهریور ۱۳۹۷، ص. ۶۶۵-۶۴۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 12, Agu.-Sep. 2018, p. 647-665

توسعه مدل SWAT-LU برای بررسی و شبیه‌سازی علل افت تراز دریاچه ارومیه و ارزیابی اثربخشی راه‌کارهای مطرح در احیای آن
بخش اول: توسعه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT-LU

اشکان فرخ‌نیا[۱]، سعید مرید[۲*]، کریم عباسپور[۳]، مجید دلاور[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴

چکیده

افت سریع تراز آب دریاچه ارومیه در دو دهه گذشته، نگرانی‌های جدی در خصوص آینده این دریاچه و تبعات منفی از بین رفتن آن بر حوزه‌های مختلف محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی را به دنبال داشته است. تخفیف مشکلات موجود و احیای دریاچه نیازمند پیاده‌سازی رویکرد جامعی است که بدون شناخت ریشه‌های وقوع وضعیت فعلی و ارزیابی صحیح از اثربخشی اقدامات مطرح در این زمینه، قابل دست‌یابی نخواهد بود. در تحقیق حاضر، تهیه یک نسخه اختصاصی از مدل جامع هیدرولوژیکی SWAT که با توجه به شرایط و فرآیندهای مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه اصلاح یافته (ویرایش SWAT-LU)، برای ارزیابی موارد مذکور هدف قرار داده شد. در مقاله حاضر (به عنوان نخستین مقاله از سه مقاله‌ای که به منظور ارایه نتایج تحقیق تهیه شده)، رویکردهای بکارگرفته شده در فرآیند توسعه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل مذکور ارایه می‌گردد. نتایج نشان داد که مدل SWAT-LU توانایی و قابلیت‌های مناسبی برای شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و پیکره آبی دریاچه دارد و اصلاحات انجام شده به خوبی توانسته این فرآیندها را تدقیق نماید. به نحوی که مقدار شاخص‌های واسنجی مدل برای حدود ۸۰ درصد از ایستگاه‌های هیدرومتری در سطح حوضه در محدوده قابل قبول قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی حجم آب دریاچه ارومیه نیز بسیار رضایت‌بخش است. هم‌چنین کنترل نتایج مدل برای سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی نیز نشان دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی آن‌ها بود. در مجموع نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که مدل توسعه داده شده اجزای چرخه هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی نموده و ابزار مناسبی برای تحلیل شرایط و ارزیابی اثر اقدامات مختلف بر مقدار مولفه‌های مختلف هیدرولوژیکی و اندرکنش بین آن‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، دریاچه ارومیه، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، مدل SWAT

مقدمه

دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین دریاچه داخلی کشور می‌باشد که به دلیل برخورداری از ارزش‌های کم‌نظیر طبیعی و اکولوژیک، به‌عنوان پارک ملی، سایت کنوانسیون رامسر[۵] و ذخیره‌گاه زیست کره در یونسکو به ثبت رسیده است (Abbaspour and Nazaridoust., 2007). این دریاچه طی دهه اخیر با افت شدید و کاهش قابل‌توجه بخشی از سطح و عمق خود مواجه شده که تبعات منفی آن در حوزه‌های مختلف محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی، نگرانی‌های ملی و بین‌المللی زیادی را به همراه داشته است (CIWP., 2008). در تلاش برای احیای دریاچه، سوالات راهبردی متعددی مطرح است که پیش از اتخاذ و اجرای اقدامات مورد نظر، باید پاسخ داده شوند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ۱) نقش عوامل اقلیمی و انسانی در کاهش تراز آب دریاچه ارومیه چگونه بوده است؟ ۲) مدیریت بخش کشاورزی و به‌خصوص اقداماتی که هم‌اکنون مدنظر کار گروه نجات دریاچه ارومیه می‌باشد، تا چه میزان ظرفیت تامین آب بیش‌تر را برای احیای دریاچه دارد؟ و ۳) تلفات آب در حوضه در چه بخش‌هایی بیش‌تر است؟

برای پاسخ به موارد فوق، رویکردهای متفاوتی را می‌توان دنبال نمود که با بررسی‌های انجام شده، استفاده از مدل‌های جامع

۱- عضو هیات علمی، گروه فرآیندها و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی، پژوهشکده منابع آب، موسسه تحقیقات آب
۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار گروه تحلیل سیستم‌ها، ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه، موسسه فدرال تحقیقات علوم و تکنولوژی سوئیس
۴- استادیار گروه مهندسی منابع آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تربیت مدرس
(* - نویسنده مسئول: Email: morid_sa@modares.ac.ir)

5- Ramsar convention

هیدرولوژیکی گزینه مناسبی به‌شمار می‌رود. از این منظر که چنین مدل‌هایی قابلیت ارزیابی تغییر و اندرکنش بین کلیه مولفه‌های بیلان آب تحت تاثیر تغییرات شرایط اقلیمی و مدیریتی در سطح حوضه آبریز را فراهم می‌سازند. در بین مدل‌های هیدرولوژیکی، SWAT[1] یکی از مناسب‌ترین مدل‌ها است که توانایی شبیه‌سازی طیف متنوعی از فرآیندهای حاکم بر شرایط هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز را دارا می‌باشد (Neitsch et al., 2011). این مدل از اوایل دهه ۱۹۹۰ تاکنون به‌طور مستمر در حال توسعه و ارتقا بوده و طی این مدت، مطالعات فراوانی با استفاده از آن صورت گرفته است (Arnold et al., 2012). هم‌چنین مدل SWAT در تحقیقات متعددی به‌منظور تفکیک اثرات تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی مورد استفاده قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به کارهای فان و همکاران ، ژانگ و همکاران و لی و همکاران اشاره نمود (Fan et al., 2010; Zang et al., 2013; Li et al., 2014). در مقایسه‌ای که توسط دامی و پندی در خصوص قابلیت‌های ذاتی و سوابق کاربرد ۹ مدل هیدرولوژیکی متداول انجام شد، این مدل به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای شبیه‌سازی جامع در سطح حوضه‌های آبریز توصیه شد (Dhami and Pandey., 2013). SWAT یک مدل نیمه توزیعی و پیوسته زمانی است که برای ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی بر چرخه آب، رسوب و مواد مغذی در حوضه‌های بزرگ و دارای کمبود آمار توسعه داده شده است (Arnold et al., 2012). این مدل فرآیندمحور[2] بوده و جریان آب (در سطح زمین، رودخانه، خاک و آب زیرزمینی)، رشد گیاهان (کشاورزی و طبیعی)، چرخه مواد مغذی و سموم، فرسایش و هم‌چنین اثرات زیست – محیطی اقدامات مدیریتی بر این پدیده‌ها را شبیه‌سازی می‌نماید (Gassman et al., 2007). علاوه بر این ویژگی‌ها، امتیاز مثبت دیگر SWAT رایگان و در اختیار بودن کد مدل می‌باشد که سفارشی‌سازی آن را برای استفاده مطابق با شرایط خاص حوضه مورد مطالعه ممکن می‌سازد (Beven., 2011). به‌عنوان مثال، توسعه ویرایش‌هایی از این مدل تحت عنوان SWAT-G برای بهبود شبیه‌سازی رواناب در مراتع کوهپایه‌ای[3]، ESWAT و SWAT-K با تدقیق روابط مربوط به شبیه‌سازی بهتر کمیت و کیفیت آب در رودخانه‌های کشور کره‌جنوبی، نمونه‌ای از این اقدامات می‌باشد (Eckhardt et al., 2002; Van Griensven and Bauwens., 2005; Kim et al., 2008). مجموع این شرایط موجب گردیده تا استفاده از این مدل برای تحلیل مسایل مختلف مرتبط با آب در کشورهای مختلف به‌طور روز افزون رشد یابد، به نحوی که در زمان نگارش این متن، بیش از ۲۰۰۰ مقاله مستخرج از کاربردهای مختلف آن در نشریات معتبر بین‌المللی به چاپ رسیده است[4].

با توجه به اهداف مورد نظر تحقیق که ابتدا بیان گردیدند و به منظور ایجاد بستر لازم برای پاسخ به سوالات تحقیق؛ لازم بود تا در مدل SWAT متناسب با نیازهای تحلیلی و شرایط خاص حوضه آبریز دریاچه ارومیه، اصلاحاتی صورت گیرد که منجر به توسعه ویرایش نسخه SWAT-LU گردید. بدین ترتیب مبانی مدل، اصلاحات اعمال شده و سپس فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی آن برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقاله حاضر ارایه گردید. در ادامه نیز طی دو مقاله متوالی، پاسخ به سوالات تحقیق ارایه خواهد شد که امید است، در برنامه احیای دریاچه ارومیه مورد توجه قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحتی بالغ بر ۵۲ هزار کیلومترمربع در شمال‌غرب ایران قرار گرفته است و قسمت‌هایی از دامنه شمالی کوه‌های زاگرس و دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و نیز دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند، آن را احاطه نموده‌اند (**Error! Reference source not found.**). از نظر تقسیمات سیاسی، حوضه آبریز دریاچه ارومیه در محدوده سه استان آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان قرار می‌گیرد که به ترتیب ۴۹، ۳۸ و ۱۳ درصد از سطح حوضه را در خود جای داده‌اند.

اطلاعات مورد استفاده

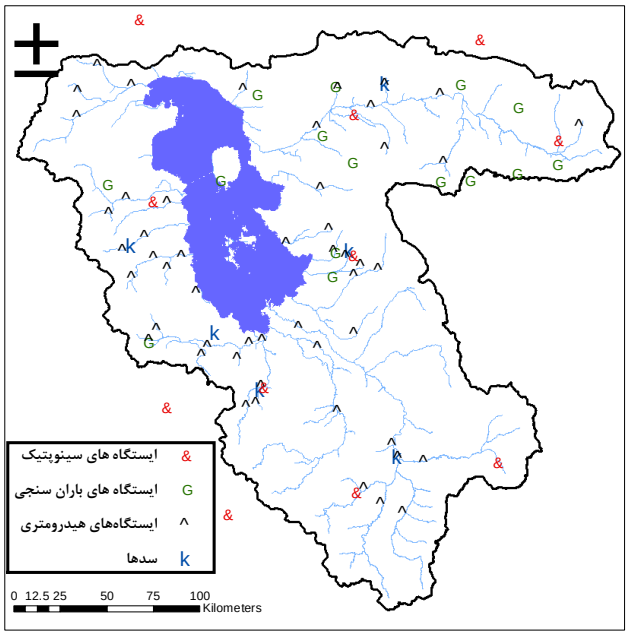
داده‌های اقلیمی

برای این قسمت ابتدا آمار و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی کشور و هم‌چنین اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو جمع‌آوری و بررسی شدند که در نهایت اطلاعات سازمان هواشناسی مناسبت‌تر تشخیص داده شدند. از این مجموعه نیز ۳۰ ایستگاه که موقعیت‌شان در شکل ۱ آمده، به‌دلیل طول دوره آماری مناسب و نواقص کم‌تر آماری، مبنای مراحل بعدی کار قرار گرفتند.

داده‌های جریان رودخانه

در این بخش نیز داده‌های ثبت شده جریان رودخانه‌های حوضه در ۱۳۲ ایستگاه هیدرومتری متعلق به وزارت نیرو در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه تهیه و پس از بررسی‌های لازم، ۵۴ ایستگاه هیدرومتری مناسب تشخیص داده شدند. هم‌چنین، آمار جریان‌های ورودی به سدهای بوکان، مهاباد و علویان تهیه گردید (شکل ۱).

1- Soil and Water Assessment Tool
2- Process-based model
3- Low mountain ranges
4- www.swat.tamu.edu



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده برای دما، بارش و جریان رودخانه در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه

اطلاعات فیزیکی و هیدرولوژیکی سدها

اطلاعات اخذ شده از شرکت مدیریت منابع آب ایران نشان می‌دهد تا سال ۱۳۸۸ تعداد ۳۴ سد بزرگ و کوچک در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دست بهره‌برداری قرار داشته که مجموع ظرفیت مخازن آن‌ها در حدود ۱۳۱۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. در این بین ۶ سد مهم، شامل سدهای بوکان، مهاباد، شهرچای، علویان، نهند و حسنلو با مجموع حجم مخزن ۱۲۶۳ میلیون مترمکعب، ۹۶ درصد کل حجم مخازن سدهای حوضه را شامل می‌شوند. داده‌های مربوط به شرایط فیزیکی و جریان‌های ورودی و خروجی آب این سدها از سیستم اطلاعات سدهای مخزنی در حال بهره‌برداری[1] شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه گردید. موقعیت سدهای مذکور نیز در شکل ۱ آمده است.

نقشه‌های رقومی

برای این قسمت نیز نقشه رقومی ارتفاعی[2] (DEM) تهیه شده توسط سازمان جغرافیای نیروهای مسلح کشور مورد استفاده قرار گرفت که قدرت تفکیک مکانی آن در حدود ۸۵ متر می‌باشد. برای نقشه بافت خاک مورد نیاز برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی نیز از نقشه بافت خاک جهانی استفاده گردید (FAO, 2012). همان‌گونه که قبلا نیز اشاره شد، برای استخراج رابطه سطح – حجم – ارتفاع دریاچه ارومیه، نقشه بسیمتری تهیه شده توسط موسسه تحقیقات آب، دیگر اطلاعات رقومی بود که مورد استفاده قرار گرفت (بی‌نام، ۱۳۹۲).

نقشه‌های کاربری اراضی حوضه در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۶ نیز بر اساس مرجع فرخنیا (۱۳۹۴) که از تصاویر ماهواره Landsat-TM استخراج گردیده‌اند، مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است، تحلیل تغییرات شرایط کاربری اراضی در سطح حوضه در دو مقطع زمانی مذکور به ترتیب نشان دهنده افزایش ۳۲ و ۲۳ درصدی وسعت اراضی فاریاب (۱۳۷ هزار هکتار) و دیم (۱۶۰ هزار هکتار) در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه بود.

الگوی کشت و مدیریت آب کشاورزی

برای الگوی کشت و مدیریت آب کشاورزی از رویکرد احمدزاده و همکاران در شبیه‌سازی حوضه زرینه‌رود استفاده شد. در این تحقیق نیز محصولات اصلی و معرف حوضه شامل گندم، سیب، یونجه و گوجه بود که به ترتیب نماینده محصولات زراعی، باغی، علوفه‌ای و صیفی انتخاب شدند (Ahmadzadeh et al., 2016). هم‌چنین کلیه اراضی دیم حوضه، زیرکشت گندم در نظر گرفته شد. اطلاعات عملیات کشاورزی (مانند: تاریخ کاشت، داشت و برداشت، نوع و مقدار کود مصرفی، میزان آب مصرفی و راندمان‌های آبیاری) نیز از تحقیق احمدزاده (۱۳۹۱) استخراج گردید.

مبانی مدل SWAT

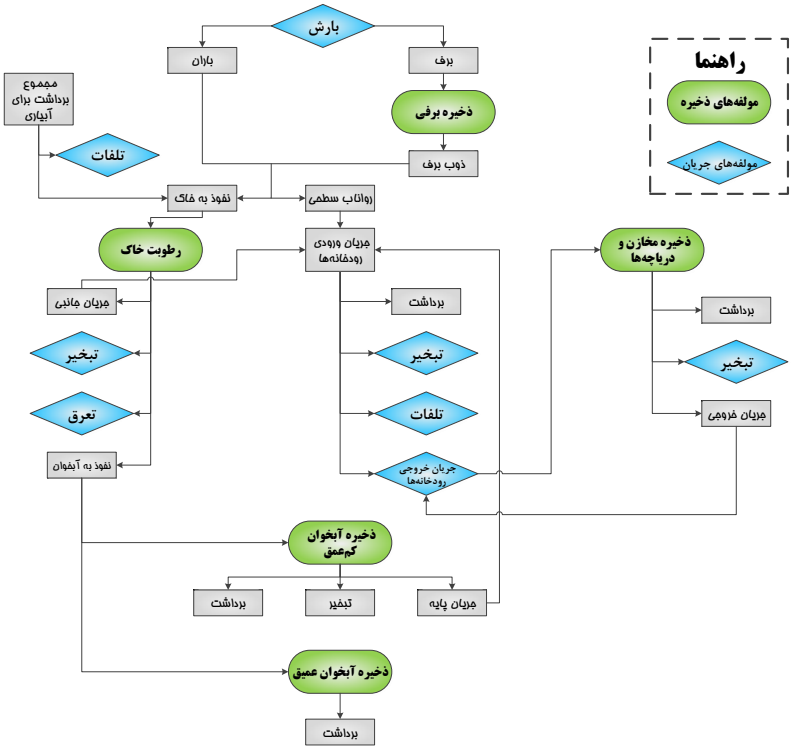
همان‌طور که پیش از این ذکر گردید، SWAT از نظر شیوه تصویرسازی مکانی حوضه‌های آبریز در دسته مدل‌های نیمه توزیعی

1- http://dams.wrm.ir/
2- Digital Elevation Model

قرار می‌گیرد. از نظر مکانی، کوچک‌ترین واحد محاسباتی مدل SWAT، واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) نام دارد که بر اساس یکسان بودن نوع نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب اراضی مشخص می‌شود. در مدل SWAT چرخه هیدرولوژیکی بر اساس معادله بیلان آب برای هر HRU طبق رابطه ۱ شبیه‌سازی می‌گردد.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

که در آن SWt مقدار آب در خاک در زمان t، SW0 مقدار اولیه آب در خاک و Rday، Qsurf، Ea، Wseep و Qgw نیز به ترتیب عبارتند از مقدار بارندگی، رواناب سطحی، تبخیر – تعرق، آب نفوذ یافته از خاک به لایه آب غیراشباع و آب برگشتی از آب‌های زیرزمینی در زمان i. مدل SWAT دارای زیربرنامه‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی ذوب برف، دما و رطوبت خاک، ذخیره برگابی و چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی کم‌عمق و عمیق، مخازن سطحی و فعالیت‌های مختلف کشاورزی می‌باشد. نظر به این‌که نیاز بود تا متناسب با اهداف تحقیق در کد مدل تغییراتی به وجود آید، نحوه شبیه‌سازی جریان و ارتباط زیربرنامه‌های مختلف آن مورد بررسی دقیق قرار گرفت. شکل ۲ چرخه کلی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT و نحوه ارتباط بین مولفه‌های مختلف در این چرخه را نشان می‌دهد. جزییات رویکردها و روابط مورد استفاده در شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی و سایر مولفه‌های قابل ارزیابی توسط مدل SWAT در مرجع نیتچ و همکاران آمده است (Neitsch et al., 2011).



شکل ۲- فلوچارت انجام محاسبات و ارتباط بین بخش‌های مختلف چرخه هیدرولوژی در مدل SWAT

اصلاح مدل و توسعه SWAT-LU

مدل SWAT شامل بیش از ۳۰۰ زیربرنامه می‌باشد که شبیه‌سازی‌های حوضه آبریز را در دو فاز سطح حوضه و متعاقبا روندیابی در رودخانه‌ها را به انجام می‌رساند. اصلاحات اعمال شده برای توسعه SWAT-LU[1] را می‌توان در دو دسته کلی مرتبط با ۱) شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی و مدیریتی در سطح حوضه و ۲) شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب دریاچه، تقسیم نمود. برای اصلاحات مذکور، تغییراتی در ۱۲ زیربرنامه از مدل انجام شد و یک زیربرنامه جدید نیز برای شبیه‌سازی موارد مربوط به پیکره آبی دریاچه به مدل اضافه گردید. این تغییرات در ادامه به اختصار تشریح می‌گردند و شرح بیش‌تر آن‌ها در مرجع (فرخنیا، ۱۳۹۴) قابل دسترس هستند.

1- SWAT- Lake Urmia version

تغییرات مربوط به شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژی در سطح حوضه

تلفات جریان رودخانه بین مرز زیرحوضه دریاچه تا ورود به دریاچه

براساس ساختار SWAT، برای شبیه‌سازی کل حوضه لازم بود تا دریاچه در یک زیرحوضه[1] تعریف گردد و زیرحوضه‌های بالادست همگی به آن تخلیه شوند. اما، مرز این زیرحوضه با مرز پیکره آبی دریاچه متفاوت است (شکل ۳). مرز اول ثابت (حدود ۶۲۰۰ کیلومترمربع) و مرز دوم بسته به حجم آب موجود دریاچه در زمان متغیر می‌باشد. ازطرفی، فرآیندهای متفاوتی نیز بین دو مرز اتفاق می‌افتد (مانند ورودی رودخانه‌ها، پخش‌شدگی آب، تبخیر گسترده و دریافت بارش) که می‌تواند تغییرات قابل ملاحظه‌ای را بین ورودی به مرز اول و دوم سبب گردد. به‌عنوان مثال، شکری و مرید (۱۳۹۳) متوسط کاهش ۱۲ درصدی جریان سطحی را بین این دو مرز (حد فاصل سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۶) گزارش کردند. در مطالعه مذکور و سایر مطالعات مشابه، ۳ جز از معادله بیلان بین مرز اول (از محل آخرین ایستگاه‌های هیدرومتری) تا ورودی به دریاچه مجهول بوده که شامل برداشت آب برای آبیاری اراضی کشاورزی در این بین، آبدهی میان حوضه‌ای و تلفات جریان ناشی از نشت و تبخیر می‌باشد (رضایی، ۱۳۹۳؛ بی‌نام، ۱۳۹۳).

با توجه به این‌که مدل SWAT قابلیت در نظر گرفتن برداشت آب کشاورزی و هم‌چنین برآورد آبدهی میان حوضه‌ای را دارا می‌باشد، تنها مجهول این مساله، میزان تلفات جریان رودخانه‌ها در پهنه‌های مسطح منتهی به دریاچه در اثر پخش و تبخیر آب پیش از رسیدن به پیکره آبی دریاچه است. بنابراین از این بابت روش‌شناسی این بخش کامل‌تر از مطالعات انجام شده قبلی می‌باشد. مولفه مجهول مذکور را می‌توان به عنوان تابعی از میزان جریان ورودی از رودخانه‌ها و هم‌چنین سطوح مسطح اطراف دریاچه در نظر گرفت که دومی خود تحت تاثیر پسروی و پیشروی آب دریاچه و به عبارت دیگر تابعی از مساحت دریاچه می‌باشد. به این صورت که افزایش مساحت دریاچه موجب کاهش پتانسیل تلفات آب در سواحل آن گردیده و به‌عکس. بنابراین برای این فرآیند، یک مدل مفهومی مطابق با شکل ۴ در نظر گرفته شد که بر اساس آن می‌توان رابطه‌ای به فرم زیر بین مساحت پیکره آبی دریاچه و مقدار تلفات جریان رودخانه پیش از رسیدن به آن (Q_{loss}) قابل تعریف است (رابطه ۲).

$$Q_{loss} = \frac{\alpha_1}{e^{\alpha_2 . SA}} Q_{River} \quad (۲)$$

که در آن Q_{River} مقدار جریان ورودی از رودخانه‌ها به محدوده دریاچه (مرز اول) بر حسب مترمکعب در ثانیه، SA مساحت پیکره آبی دریاچه بر حسب هزار کیلومترمربع و α_1 و α_2 پارامترهای رابطه هستند که در فرآیند واسنجی مدل قابل برآورد می‌باشند.

اصلاح فرآیند به‌روزرسانی کاربری اراضی

در مدل SWAT امکان تغییر کاربری اراضی از طریق به‌روزرسانی مساحت HRUها در زمان دل‌خواه وجود دارد. در کد اصلی مدل اصلاحات مربوط به مساحت‌ها و فاکتورهایی نظیر سطح تالابی واقع در هر HRU انجام می‌شود. اما مولفه‌هایی نظیر ذخیره آب زیرزمینی، آب موجود در خاک و برف و هم‌چنین مقدار نرخ تغذیه آب زیرزمینی به‌روزرسانی نمی‌شوند که این امر می‌تواند در هنگام محاسبه بیلان حجمی آب حوضه خطا ایجاد نماید. بنابراین ضروری بود که اصلاحات مربوط برای به‌روزرسانی این متغیرها در کد مدل صورت گیرد.

اصلاح عملکرد پارامتر راندمان آبیاری

راندمان آبیاری (به مفهوم کلاسیک آن) بیان کننده نسبت آب مصرف شده برای تبخیر – تعرق گیاه نسبت به کل آب برداشت شده از منبع مورد استفاده آن می‌باشد. امکان مقداردهی به راندمان آبیاری در مدل SWAT وجود دارد، اما در کد اصلی مدل این پارامتر مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (در حالت آبیاری دستی[2]). این مشکل قبلا نیز توسط احمدزاده و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده است (Ahmadzadeh et al., 2016). بنابراین تغییراتی در زیرمدل‌های برداشت آب آبیاری از مخازن، رودخانه‌ها و آب زیرزمینی داده شد تا این پارامتر تاثیرگذاری داشته باشد. از طرف دیگر، وضعیت آب اضافی برداشت شده از منبع آبیاری که به مزرعه نمی‌رسد و یا از پروفیل خاک خارج شده و در هر حال صرف تبخیر – تعرق گیاه نمی‌شود (تلفات اسمی آبیاری)، در مدل مشخص نشده است. بخشی از این آب از طریق تبخیر در سیستم انتقال، تبخیر از خاک، تبخیر – تعرق گیاهان هرز و یا ورود به منابع آب غیرقابل استحصال در عمل اتلاف می‌شود (تلفات واقعی) و بخش دیگر آن به دلیل بازگشت به منابع آب سطحی و زیرزمینی در عمل جزو تلفات نبوده و قابل استحصال و استفاده خواهد بود (Lankford., 2012). نمایش اجزای مولفه‌های فوق و ارتباط آن‌ها در شکل ۵ آمده است.

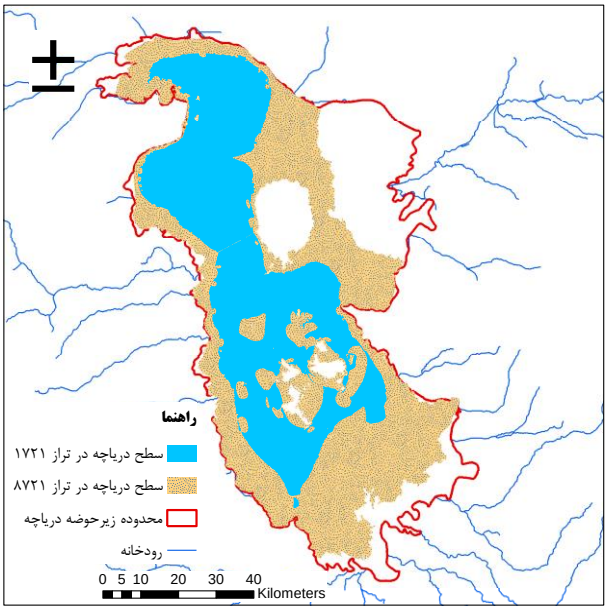
اصلاح در مقادیر بارش و دما

تغییرات این بخش بیش‌تر متوجه الگوریتم اعمال گرادیان‌های بارش و دما (به‌ترتیب PLAPS و TLAPS) می‌باشد. پارامترهای مذکور برای تعدیل مقادیر این متغیرهای اقلیمی در پهنه‌های ارتفاعی[3] نسبت به آمار ثبت شده در ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

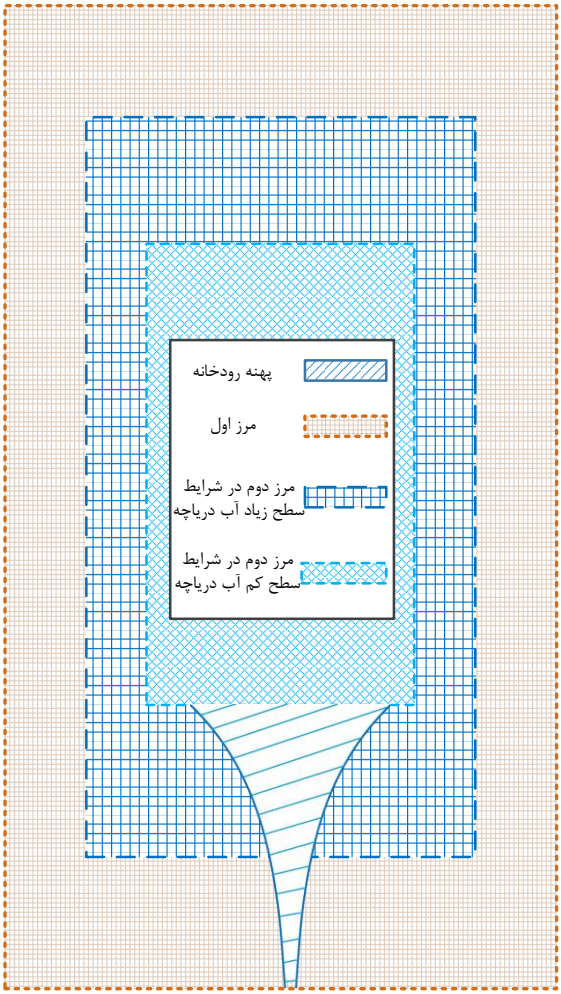
1- Subbasin

2- Manual irrigation

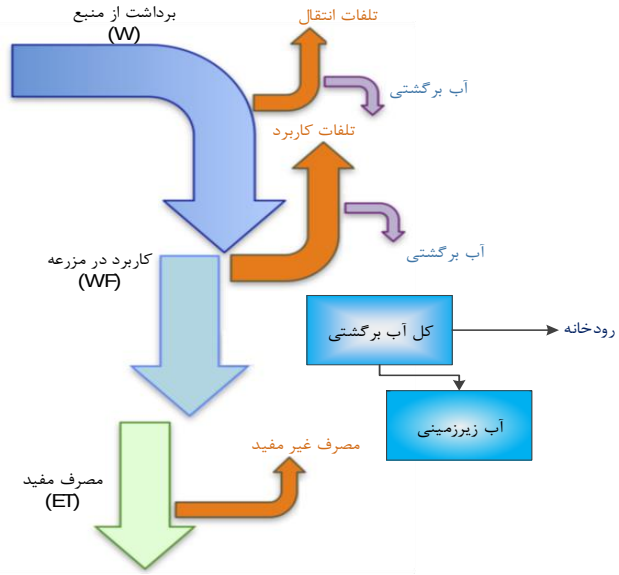
3- elevation bands



شکل ۳- محدوده ایجاد شده بین مرز زیرحوضه تا مرز پیکره آبی دریاچه در ترازهای مختلف آب دریاچه



شکل ٤- مدل مفهومی رابطه ۲ برای محاسبه تلفات جریان رودخانه بین دو مرز



شکل۵- مدل مفهومی بیلان آب آبیاری (Scott et al., 2014)

علت تغییرات به عمل آمده برای این بخش، نبود پراکنش مناسب ارتفاعی ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه آبریز ارومیه می‌باشد که عمدتا در در مناطق دشتی و کم ارتفاع‌تر حوضه قرار دارند. از این رو، اصلاح مقادیر بارش و دما بر اساس تغییرات ارتفاعی و رویکرد انجام آن در تحقیق حاضر از اهمیت فراوانی برخوردار بود. بدین منظور دو مورد تغییر در مدل اعمال شد که به شرح زیر هستند:

***الف)* اصلاح روش اعمال گرادیان بارش:** در الگوریتم اولیه مدل، مقدار PLAPS بدون در نظر گرفتن میزان بارش اعمال می‌شود. بدین معنی، فارغ از این‌که مقدار بارندگی روزانه ایستگاه به چه مقدار باشد، مقدار ثابتی برای اصلاح آن در ترازهای ارتفاعی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما، گالوان و همکاران ضمن اشاره به این‌که عمدتا در حوضه‌های آبریز دارای مناطق کوهستانی نرخ تغییرات بارش در ارتفاعات با میزان بارش روزانه مرتبط است، رابطه ۳ برای به‌کارگیری در مدل SWAT پیشنهاد نمودند (Galvan et al., 2014):

$$Rain_B = Rain_G \times \left[\frac{(ELV_B - ELV_G) \times PLAPS + P_{year}}{P_{year}}\right] \quad (۳)$$

که در آن $RAIN_B$ و $RAIN_G$ به‌ترتیب مقدار بارش روزانه در پهنه ارتفاعی مورد نظر و ایستگاه به میلی‌متر، ELV_B و ELV_G به‌ترتیب ارتفاع پهنه و ایستگاه به کیلومتر از سطح دریا و P_{year} مقدار بارش متوسط سالانه در ایستگاه می‌باشد.

ب) اصلاح بارش و دما متناسب با توزیع ارتفاعی کاربری‌های اراضی: در ویرایش اصلی مدل، مقدار بارش و دمای روزانه برای کل HRUهای واقع در یک زیرحوضه یکسان در نظر گرفته می‌شود. این مورد جزو نقطه ضعف‌هایی می‌باشد که توسط آرنولد و کریزانوا در مطالعه مروری خود در خصوص مدل SWAT نیز بدان اشاره شده است (Arnold and Krysanova., 2008). حال آن‌که در اغلب موارد، اراضی کشاورزی آبی و مناطق شهری در ترازهای ارتفاعی پایین‌تر زیرحوضه قرار دارند و کاربری‌هایی نظیر اراضی دیم و مراتع در بخش‌های مرتفع‌تر واقع شده‌اند. تعمیم دما و بارش متوسط زیرحوضه به این اراضی (که به دلیل بیش‌تر بودن متوسط ارتفاع حوضه نسبت به آن‌ها به ترتیب کم‌تر و بیش‌تر برآورد می‌شوند) می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر تبخیر – تعرق، بازدهی آبیاری، عملکرد گیاهان، تجمع و ذوب برف و هم‌چنین آبدهی مناطق مسکونی و اراضی زیرکشت آبی داشته باشد. بنابراین در محاسبه مقادیر تعدیل شده دما و بارش در HRUهای مذکور، کد مدل به نحوی اصلاح گردید که تفاوت بین این اراضی و سایر کاربری‌ها از نظر پراکنش ارتفاعی لحاظ شود.

تغییرات مربوط به شبیه‌سازی فرایندهای بیلان در سطح دریاچه

تبخیر دریاچه و اثر تغییر شوری بر آن

تبخیر اصلی‌ترین (و بنا بر فرض انجام شده در تحقیق حاضر تنها) مولفه خروج آب از دریاچه ارومیه می‌باشد و از این رو برآورد آن در محاسبات بیلان آب دریاچه بسیار تعیین کننده است. به طور معمول برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه‌ها، از آمار تشتک تبخیر با اعمال یک ضریب اصلاحی استفاده می‌شود. اما، مقدار ضریب تبدیل تشتک به عواملی نظیر نوع و غلظت املاح موجود در آب نیز بستگی دارد (Leaney and Christen., 2000) که برای دریاچه ارومیه به‌دلیل غلظت نمک زیاد و تغییرات شدید آن به واسطه تغییر حجم آب

دریاچه بسیار حایض اهمیت است. برای این قسمت براساس مراجع مختلف، رابطه مطلوب برآورد مقدار تبخیر واقعی دریاچه (E_{UL}) مطابق رابطه ۴ تعیین شد (Snyder., 1992; Ahmadzadeh Kokya and Ahmadzadeh Kokya., 2008):

$$E_{UL} = f(V_{UL}) \times ETP \quad (۴)$$

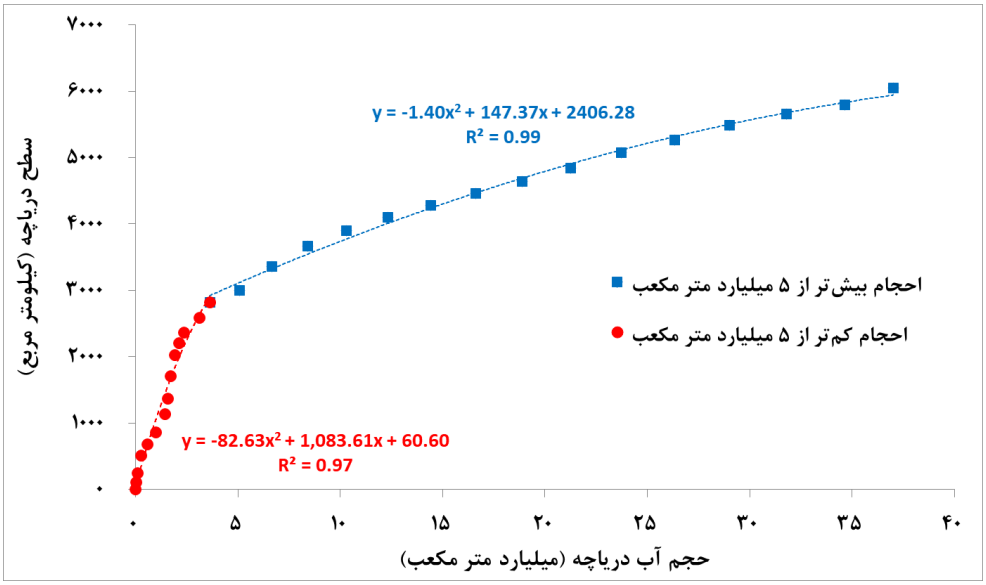
که در آن ETP تبخیر و تعرق پتانسیل و $f(V_{UL})$ ضریب تبدیل تبخیر – تعرق پتانسیل به تبخیر از سطح دریاچه ارومیه می‌باشد که تنها تابعی از حجم آب دریاچه در هر زمان (V_{UL}) است که از رابطه ۵ قابل برآورد می‌باشد:

$$f(V_{UL}) = \beta_1 - \frac{\beta_2}{e^{\beta_3 \times V_{UL}}} \quad (۵)$$

که در آن β_1 ، β_2 و β_3 پارامترهای رابطه هستند که در فرآیند واسنجی مدل قابل برآورد می‌باشند. لازم به ذکر است که رابطه فوق بر اساس تلفیق نتایج مطالعات اشنایدر و همچنین لینی و کریستن شکل گرفته است (Snyder., 1992; Leaney and Chirsten., 2000).

رابطه حجم – سطح دریاچه

در مدل SWAT برآورد سطح دریاچه بر اساس حجم برآورد شده آن و با استفاده از یک رابطه ساده بین سطح و حجم صورت می‌گیرد. این روش در خصوص دریاچه ارومیه که رابطه بین سطح و حجم آن در مقادیر مختلف موجودی آب دریاچه به شدت متغیر می‌باشد، قابل کاربرد نیست. بنابراین لازم بود تا رابطه مناسب برای برآورد سطح دریاچه بر اساس موجودی آب آن، در مدل اعمال گردد. بدین منظور رابطه حجم – سطح دریاچه بر اساس نقشه بسیمتری دریاچه (بی‌نام، ۱۳۹۲) تعیین و به مدل معرفی شد. بر این اساس، رابطه بین سطح و حجم دریاچه ارومیه به دو حجم بیش‌تر از ۵ میلیارد مترمکعب و کم‌تر از آن بخش تفکیک (شکل ۶) در مدل لحاظ گردید.



شکل۶- روابط مورد استفاده برای تعیین مساحت دریاچه ارومیه بر اساس مقادیر مختلف حجم آب دریاچه

به‌روزرسانی مساحت خشکی زیرحوضه دریاچه به‌صورت روزانه

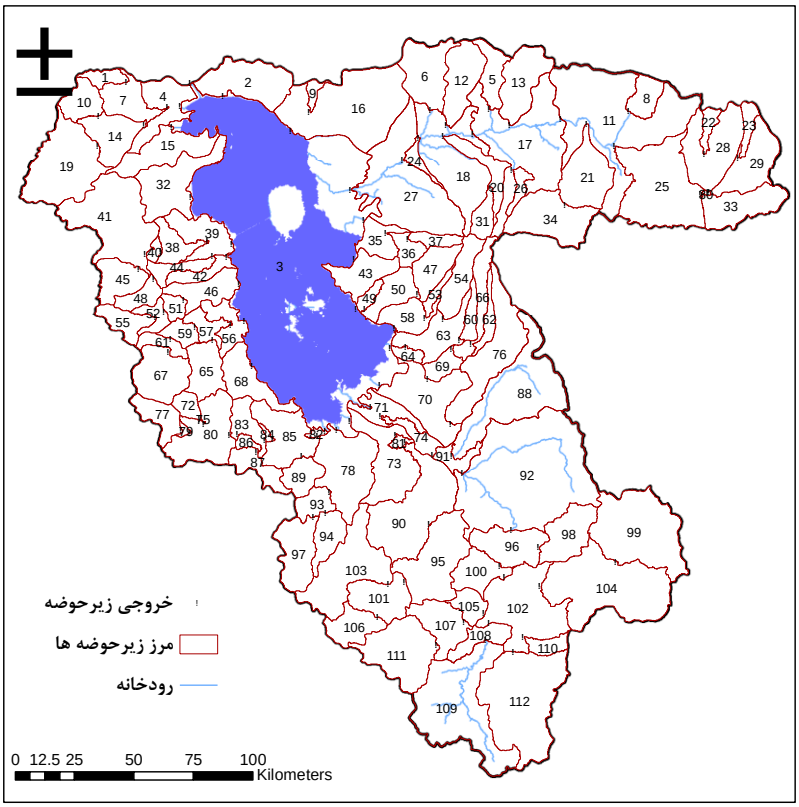
این مدل برای HRUهایی که کاربری اراضی آن‌ها آب می‌باشد، هیچ‌گونه محاسباتی را صورت نمی‌دهد. هم‌چنین تغییر مساحت پهنه‌های آبی در نظر گرفته نمی‌شود که در خصوص مخازن با سطح کوچک چندان مهم نیست. اما با توجه به تغییرات گسترده مساحت دریاچه ارومیه در سال‌های مختلف و حتی در ماه‌های مختلف یک سال، لازم بود که مساحت خشکی‌های قرار گرفته در حوضه متناسب با مساحت دریاچه اصلاح گردد. برای این قسمت نیز یک زیربرنامه جدید به مدل اضافه شد که وظیفه آن اصلاح مساحت کاربری‌های شوره‌زار متناسب با سطح دریاچه در هر روز است.

پیکربندی و آماده‌سازی مدل

اولین گام در پیکربندی حوضه‌های آبریز در مدل SWAT-LU، تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها بر اساس شرایط توپوگرافی منطقه و نقاط تمرکز مشخص شده می‌باشد. با توجه به بسته بودن حوضه آبریز دریاچه ارومیه و نیاز به جانمایی دریاچه (و زیرحوضه‌ای که در آن قرار گرفته) به عنوان مقصد نهایی کلیه جریانات سطحی حوضه، اصلاحات لازم جهت تدقیق مرزهای زیرحوضه دریاچه و ورود رودخانه‌ها در نقطه صحیح نیز در نقشه توپوگرافی مورد استفاده صورت گرفت. بدین منظور، مرز زیرحوضه قرارگیری دریاچه بر اساس محدوده مطالعاتی آن در تقسیم‌بندی شرکت مدیریت منابع آب ایران در نظر گرفته شد که در حدود ۷۳۰۰ کیلومترمربع مساحت دارد. محل ورود رودخانه‌ها

به دریاچه با توجه به مرز این محدوده در نظر گرفته شد که در واقع نقطه انتهایی زیرحوضه‌های بالادست می‌باشند. هم‌چنین نقاط خروجی سایر زیرحوضه‌ها در پیکربندی مدل نیز بر اساس موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد نظر برای واسنجی مدل، محل قرارگیری سدهای مخزنی و یا اهمیت رودخانه‌های قرار گرفته در بخش‌های مختلف حوضه در نظر گرفته شد. با این تقسیم‌بندی، در نهایت کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه به ۱۱۲ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۷). هم‌چنین، جانمایی ۶ سد مورد نظر برای تحقیق حاضر نیز در پیکربندی مدل لحاظ گردید و اطلاعات بهره‌برداری از آن‌ها بر اساس زمان ساخت هر یک در مدل قرار داده شد.

در مرحله دوم پیکربندی مدل که شامل تقسیم زیرحوضه‌ها به HRUها بود، از نقشه‌های کاربری اراضی حوضه مربوط به سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۶، به همراه نقشه خاک FAO استفاده گردید. بدین منظور ابتدا دو نسخه جداگانه از مدل بر اساس نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۶ (به‌ترتیب با ۲۸۳۲ و ۲۹۱۰ HRU) تهیه شد و سپس با استفاده از ترکیب دو پیکربندی موجود، مدل نهایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه مشتمل بر ۳۱۱۴ HRU به همراه اطلاعات مورد نیاز برای به‌روزرسانی سالانه وضعیت کاربری اراضی در فاصله زمانی سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۶ تهیه شد. لازم به ذکر می‌باشد که تغییرات کاربری اراضی در فاصله زمانی بین دو نقشه به‌صورت خطی در نظر گرفته شد که در تحقیقات مشابه نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Koch., 2011). در نهایت اطلاعات مدیریت فعالیت‌های کشاورزی برای HRUهای مربوط، بر اساس موارد ذکر شده در بخش‌های قبل به مدل معرفی شدند.



شکل۷- پیکربندی مدل SWAT برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه

الگوریتم واسنجی

از مهم‌ترین مراحل فرآیند مدل‌سازی، واسنجی مدل و اطمینان از عملکرد صحیح آن در شبیه‌سازی متغیرهای هدف می‌باشد. روش‌های گوناگونی به منظور واسنجی مدل SWAT توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. یانگ و همکاران، ۵ روش معمول در واسنجی مدل SWAT، شامل GLUE[1]، ParaSol[2]، SUFI-2[3]، MCMC[4] و BIS[5] را مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه‌گیری نمودند که روش SUFI-2 روش مناسبی می‌باشد (Yang

1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
2- Parameter Solution
3- Sequential Uncertainty Fitting
4- Markov Chain-Monte Carlo
5- Bayesian Importance Sampling

et al., 2008). بنابراین در تحقیق حاضر نیز از این روش برای واسنجی مدل SWAT-LU استفاده شد. روش مذکور در قالب نرم‌افزار SWAT-CUP گنجانده شده است (Abbaspour., 2011).

اساس کار الگوریتم SUFI-2، تولید تعداد زیادی مجموعه تصادفی از پارامترهای مورد نظر برای واسنجی مدل در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر، مبتنی بر روش نمونه‌گیری مکعب لاتین[1] می‌باشد. سپس این مجموعه پارامترها جداگانه در مدل قرار داده شده و مقدار تابع هدف بر اساس متغیرهای مورد نظر برای هر مجموعه پارامتر استخراج گردید. ضریب اطمینان[2] (R2) و ضریب نش – ساتکلیف[3] از متداول‌ترین توابع هدف مورد استفاده در این خصوص هستند که بر اساس روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند (Yang et al., 2008).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (V_{m,i} - \bar{V}_m)(V_{s,i} - \bar{V}_s)\right]^2}{\sum_i (V_{m,i} - \bar{V}_m)^2 \sum_i (V_{s,i} - \bar{V}_s)^2} \quad (۶)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (V_m - V_s)_i^2}{\sum_i (V_{m,i} - \bar{V}_m)^2} \quad (۷)$$

در این روابط V_m و V_s به‌ترتیب سری زمانی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی متغیر مورد نظر و $\bar{V}_m$ و $\bar{V}_s$ نیز به‌ترتیب مقادیر متوسط سری‌های زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشند.

نتایج

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

به دلیل این‌که شرایط کاربری اراضی حوضه برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۶ تعیین گردید و دوره آماری داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی نیز تا سال ۱۳۸۸ در دسترس بود، دوره شبیه‌سازی مدل بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۸ در نظر گرفته شد. از این دوره، دو سال اول به‌عنوان گرم کردن مدل[4] در نظر گرفته شد. واسنجی مدل برای دوره ۱۵ ساله اول (۱۳۶۷ الی ۱۳۸۱) صورت گرفت و ۷ سال انتهای دوره (۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸) نیز برای صحت‌سنجی عملکرد مدل استفاده شد.

در واسنجی مدل SWAT-LU علاوه بر مولفه جریان رودخانه، مدل بایستی بر اساس حجم آب دریاچه ارومیه نیز مورد واسنجی قرار گرفت. بنابراین این فرآیند در دو بخش کلی انجام شد که در ادامه تشریح می‌گردند. لازم به ذکر است، در این بخش تحلیل‌های عدم قطعیت نیز انجام شد که جزییات آن در مرجع فرخ‌نیا (۱۳۹۴) قابل دسترس می‌باشد.

واسنجی مدل برای جریان رودخانه‌های حوضه

برای این بخش، از اطلاعات مشاهداتی جریان در ۵۷ ایستگاه هیدرومتری در سطح حوضه و از الگوریتم واسنجی SUFI-2 استفاده شد. بر اساس تحلیل حساسیت پارامترها نیز توسط نرم‌افزار SWAT-CUP، پارامترهایی که بیش‌ترین نقش را بر شکل‌گیری رواناب سطحی و جریان پایه در مدل ایفا می‌نمایند برای واسنجی بکار رفتند (جدول ۱). قابل ذکر می‌باشد که هر یک از این پارامترها برای HRUهای مختلف به‌طور جداگانه واسنجی شدند. بدین منظور، ابتدا مقادیر پارامترها برای زیرحوضه‌های بالادست‌ترین ایستگاه‌های هیدرومتری در هر حوضه واسنجی گردیده و سپس واسنجی پارامترها در پایین‌دست‌تر با اعمال مقادیر بهینه پارامترهای زیرحوضه‌های بالادست انجام شد. شرح پارامترهای مذکور به همراه حساسیت متوسط (میانگین حساسیت مربوط به پارامتر برای کل ایستگاه‌های هیدرومتری) و محدوده اولیه و نهایی آن‌ها در فرآیند واسنجی در جدول ۱ قابل مشاهده است.

مقادیر شاخص‌های R2 و NS برای دوره واسنجی در ۸۱ و ۷۷ درصد از ایستگاه‌ها و برای دوره صحت‌سنجی در ۸۱ و ۷۹ درصد از ایستگاه‌ها بیش‌تر از ۰/۵ می‌باشد که با توجه به نتایج سایر تحقیقات انجام شده و هم‌چنین توصیه‌های انجام شده در خصوص معیارهای مناسب برای ارزیابی دقت واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بر اساس شاخص‌های مذکور حاکی از واسنجی مناسب مدل برای حوضه‌ای با این وسعت می‌باشد (Moriasi et al., 2007Gül et al., 2010; Jain et al., 2010) نمایش مکانی شاخص‌های مذکور برای دوره صحت‌سنجی مدل در شکل ۸ نشان داده شده است. هم‌چنین شکل ۹، سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی مدل واسنجی شده در محل ایستگاه نظام‌آباد زرینه‌رود را به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین ایستگاه‌های حوضه نشان می‌دهد که مقدار R2 آن برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۸۷ و ۰/۸۹ می‌باشد.

واسنجی مدل برای حجم دریاچه ارومیه

پس از واسنجی مدل برای جریان رودخانه‌های حوضه و اطمینان از توانایی مناسب آن در شبیه‌سازی این جریانات، پارامترهای مدل مربوط به زیرحوضه انتهایی که محل قرارگیری دریاچه ارومیه است، بر اساس حجم مشاهداتی دریاچه واسنجی شد. شرح پارامترها و مقدار اولیه و نهایی آن‌ها در زیرحوضه مربوط برای واسنجی حجم دریاچه در جدول ۲ ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود و قابل انتظار نیز بود، به دلیل این‌که عمده جریان ورودی به مخزن (به استثنای تلفات جریان) تحت تاثیر پارامترهای مورد تغییر در این بخش نمی‌باشد، مولفه‌های کنترل کننده تبخیر مخزن مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار در این بخش از واسنجی می‌باشند.

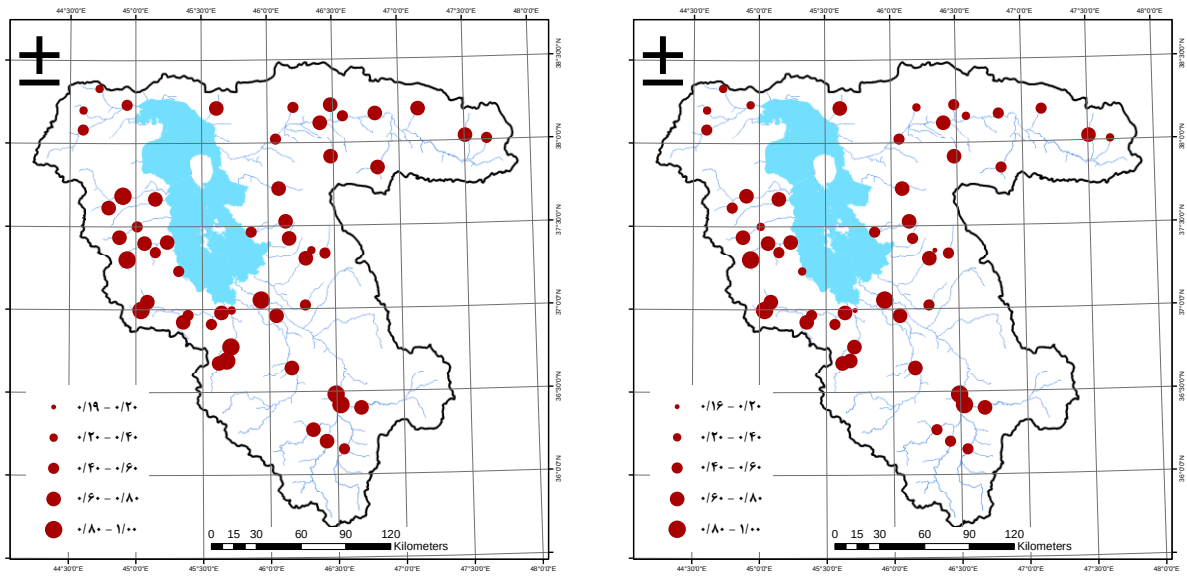
1- Latin Hypercube Sampling
2- Coefficient of determination
3- Nash-Sutcliffe
4- Warm-up period

مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی حجم آب دریاچه درشکل ۱۰ ارایه شده است. مقدار شاخص‌های R2 و NS برای واسنجی مدل بر اساس حجم دریاچه ارومیه به‌ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۸ بوده و حداکثر انحراف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی در حدود ۱۰ درصد است. در دوره صحت‌سنجی نیز مقدار هر دو شاخص برابر با ۰/۹۹ بدست آمده که بیانگر عملکرد بسیار مناسب مدل در شبیه‌سازی حجم آب دریاچه ارومیه می‌باشد.

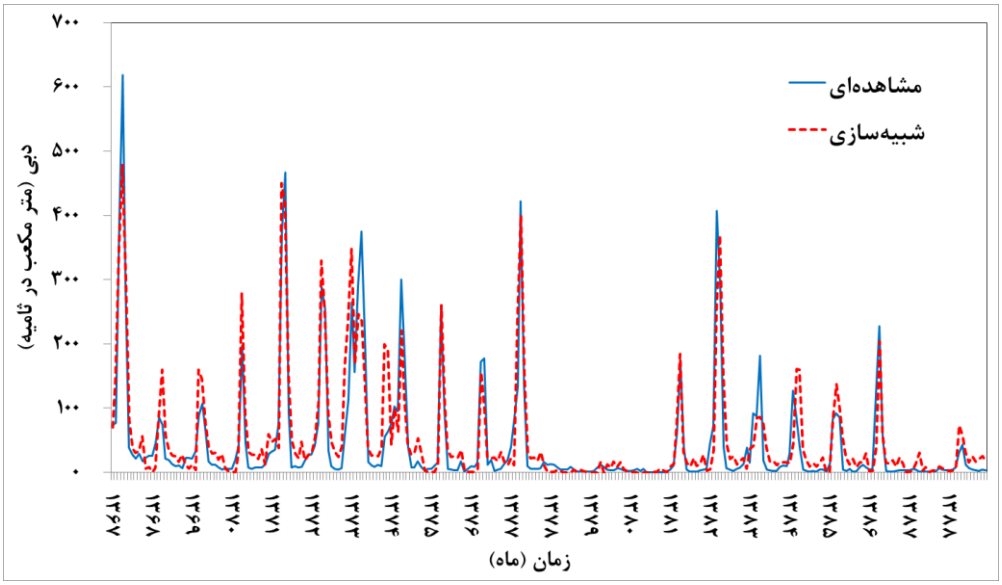
جدول ۱- شرح پارامترهای مورد استفاده در واسنجی جریان رودخانه‌های حوضه در مدل SWAT-LU به همراه حساسیت و مقادیر اولیه و نهایی آن‌ها

رتبه	پارامتر	واحد	شرح پارامتر	محدوده عمل	متوسط P-Value	محدوده اولیه	محدوده نهایی
۱	CN2	-	شماره منحنی	HRU	۰/۰۰۷	۴۰-۹۰	۵۳-۷۹
۲	PLAPS	*mm/Km/yr*	گرادیان سالانه بارش	زیرحوضه	۰/۰۰۸	-۰/۲ (-۰/۲) *	-۰/۱۸ (-۰/۳) *
۳	GW_DELAY	*day*	زمان تاخیر آب زیرزمینی	HRU	۰/۰۱۵	۱-۶۰	۱۲-۴۷
۴	GWQMN	*mm*	حداقل موجودی آبخوان کم‌عمق برای شکل‌گیری جریان پایه	HRU	۰/۰۴۸	۱۰۰-۲۰۰۰	۶۵۰-۱۲۵۰
۵	RCHRG_DP	-	ضریب نفوذ آب به آبخوان عمیق	HRU	۰/۰۵۸	۰-۰/۹	۰/۰۳-۰/۸۲
۶	SOL_AWC	$\frac{mm\ H_2O}{mm\ Soil}$	ظرفیت نگهداری رطوبت خاک	HRU	۰/۰۵۹	-۰/۵ (-۰/۵) *	-۰/۳۷ (-۰/۲۲) *
۷	SOL_K	*mm/h*	ضریب هدایت هیدرولیکی خاک	HRU	۰/۱۰۸	-۰/۵ (-۰/۵) *	-۰/۲۴ (-۰/۱۱) *
۸	ALPHA_BF	*1/day*	ثابت فروکش جریان پایه	HRU	۰/۱۴۸	۰/۰۱-۱	۰/۰۴-۰/۴۲
۹	SOL_Z	*mm*	ضخامت لایه‌های خاک	HRU	۰/۱۹۲	-۰/۵ (-۰/۵) *	-۰/۰۵ (-۰/۳۲) *
۱۰	TLAPS	*°C/Km*	گرادیان دما	زیرحوضه	۰/۲۵۷	(-۸) - (-۵)	(-۵/۸) - (-۷/۵)
۱۱	REVAPMN	*mm*	حداقل موجودی آبخوان کم‌عمق برای شکل‌گیری تبخیر از آن	HRU	۰/۳۹۸	۱۰۰-۲۰۰۰	۱۳۰۰-۷۰۰
۱۲	GW_REVAP	-	ضریب تبخیر از آب زیرزمینی	HRU	۰/۴۸۹	۰-۰/۲	۰/۰۷-۰/۰۱
۱۳	SMTMP	*°C*	دمای آستانه ذوب برف	حوضه	۰/۷۴۶	-۳ (-۰/۵)	۰/۵
۱۴	SFTMP	*°C*	دمای آستانه بارش برف	حوضه	۰/۸۱۴	-۳ (-۰/۵)	۰/۲

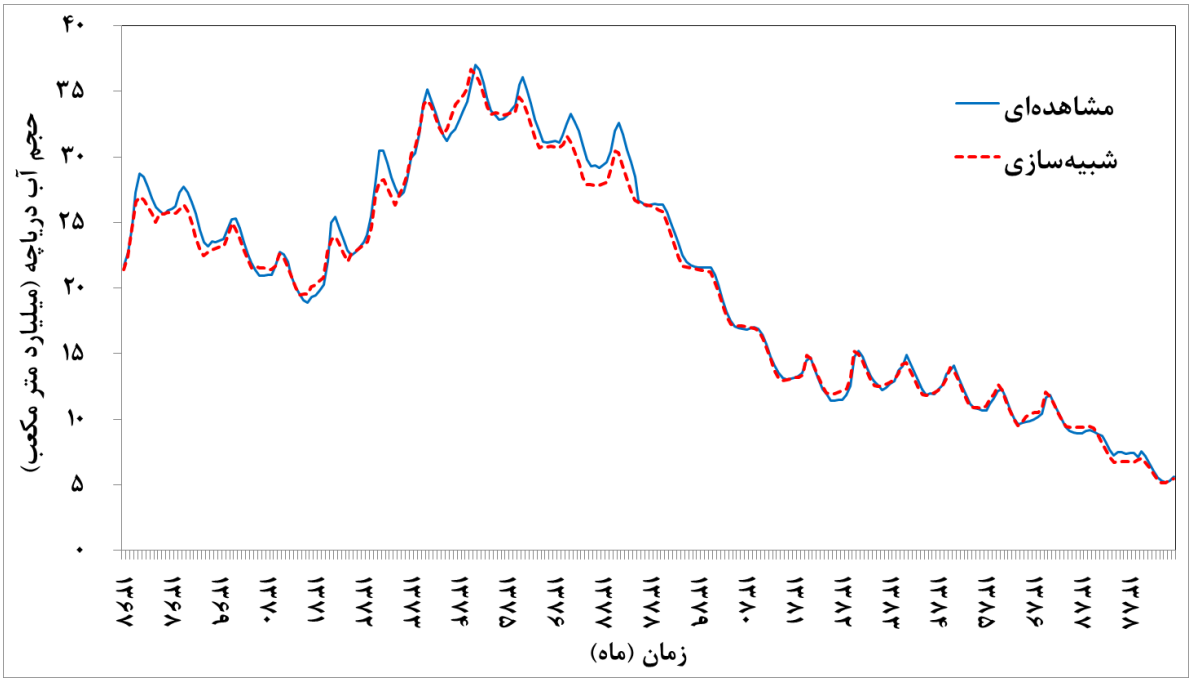
* محدوده تغییر این پارامترها نسبت به مقدار اولیه آن‌ها در نظر گرفته شده است (X±αX).



شکل۸- نمایش مکانی مقادیر شاخص NS (راست) و R2 (چپ) در ایستگاه‌های مورد بررسی برای دوره صحت‌سنجی مدل SWAT-LU



شکل ۹- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی جریان رودخانه ایستگاه نظام‌آباد زرینه‌رود حاصل از اجرای مدل SWAT-LU



شکل ۱۰- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی حجم دریاچه ارومیه در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل

کنترل عملکرد مدل برای سایر مولفه‌های بیلان آب حوضه

پس از اطمینان از عملکرد مدل در زمینه شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها و حجم آب دریاچه ارومیه، با توجه به موارد مورد نظر برای تحلیل در بخش‌های بعدی، لازم بود تا سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی که توسط مدل شبیه‌سازی می‌گردند نیز کنترل شوند. از این رو، در ادامه مقادیر تغییرات ذخیره آب حوضه، تبخیر و تعرق اراضی کشاورزی و هم‌چنین برداشت آب کشاورزی از منابع سطحی و زیرزمینی در سطح حوضه با حداکثر ممکن از داده‌های مطابقت داده شد.

تغییرات ذخیره آب در حوضه

برای بررسی عملکرد مدل در خصوص کل آب ذخیره شده در حوضه، از داده‌های ماهواره GRACE استفاده شد که کل تغییرات موجودی آب زمینی را نشان می‌دهد (Wahr et al., 2004). بدین

منظور سری زمانی ماهانه مولفه‌های ذخیره آب حوضه، شامل برف، رطوبت خاک، آب زیرزمینی، ذخیره سدها و حجم دریاچه ارومیه از مدل استخراج شد و مقدار مجموع آن‌ها به صورت تجمعی نسبت به انتهای سال ۱۳۸۱ به صورت یک سری زمانی تولید گردید.

جدول ۲- شرح پارامترهای مورد استفاده در واسنجی حجم دریاچه ارومیه حوضه به همراه حساسیت و مقادیر اولیه و نهایی آن‌ها

رتبه	پارامتر	واحد	شرح پارامتر	محدوده عمل	متوسط P-Value	محدوده اولیه	محدوده نهایی
۱	β_1	-	پارامتر رابطه ۵	دریاچه ارومیه	۰/۰۰۸	۰/۹–۱/۳	۱/۰۳
۲	β_3	-	پارامتر رابطه ۵	دریاچه ارومیه	۰/۰۲۱	۰/۱–۰/۵	۰/۲۱
۳	β_2	-	پارامتر رابطه ۵	دریاچه ارومیه	۰/۰۳۷	۰/۵–۱	۰/۷۸
۴	α_1	-	پارامتر رابطه ۲	رودخانه	۰/۱۰۵	۰/۵–۱/۵	۱/۱۴
۵	α_2	-	پارامتر رابطه ۲	رودخانه	۰/۱۱۲	۰/۲۵–۰/۷۵	۰/۶۱
۶	TLAPS	$^oC/Km$	گرادیان دما	زیرحوضه	۰/۱۴۷	(–۵) – (–۸)	–۶/۷
۷	SOL_AWC	$\frac{mm\ H_2O}{mm\ Soil}$	ظرفیت نگهداری رطوبت خاک	HRU	۰/۲۸۷	(–۰/۵) –۰/۵ *	۰/۱۵ –۰/۳۷ *
۸	PLAPS	$mm/Km/yr$	گرادیان سالانه بارش	زیرحوضه	۰/۳۴۲	(–۰/۲) –۰/۲ *	۰/۱۵ *
۹	CN2	-	شماره منحنی	HRU	۰/۳۸۷	۴۰–۹۰	۴۴–۶۸
۱۰	SOL_K	mm/h	ضریب هدایت هیدرولیکی خاک	HRU	۰/۴۳۶	(–۰/۵) –۰/۵ *	(–۰/۰۵) –۰/۳۷ *
۱۱	SOL_Z	mm	ضخامت لایه‌های خاک	HRU	۰/۵۱۲	(–۰/۵) –۰/۵ *	(–۰/۰۵) –۰/۲۴ *
۱۲	GWQMN	mm	حداقل موجودی آبخوان کم‌عمق برای شکل‌گیری جریان پایه	HRU	۰/۴۷۹	۱۰۰–۲۰۰۰	۱۰۰۰–۱۴۰۰
۱۳	GW_DELAY	day	زمان تاخیر آب زیرزمینی	HRU	۰/۶۴۸	۱–۶۰	۲۴–۴۵
۱۴	RCHRG_DP	-	ضریب نفوذ آب به آبخوان عمیق	HRU	۰/۷۲۱	۰–۰/۹	۰/۰۵–۰/۹۱
۱۵	REVAPMN	mm	حداقل موجودی آبخوان کم‌عمق برای شکل‌گیری تبخیر از آن	HRU	۰/۷۹۴	۱۰۰–۲۰۰۰	۱۱۰۰–۱۵۰۰
۱۶	GW_REVAP	-	ضریب تبخیر از آب زیرزمینی	HRU	۰/۸۱۲	۰–۰/۲	۰/۰۱–۰/۰۵
۱۷	ALPHA_BF	$1/day$	ثابت فروکش جریان پایه	HRU	۰/۹۴۵	۰/۰۱–۱	۰/۰۱–۰/۲۴

* محدوده تغییر این پارامترها نسبت به مقدار اولیه آن‌ها در نظر گرفته شده است ($X \pm \alpha X$).

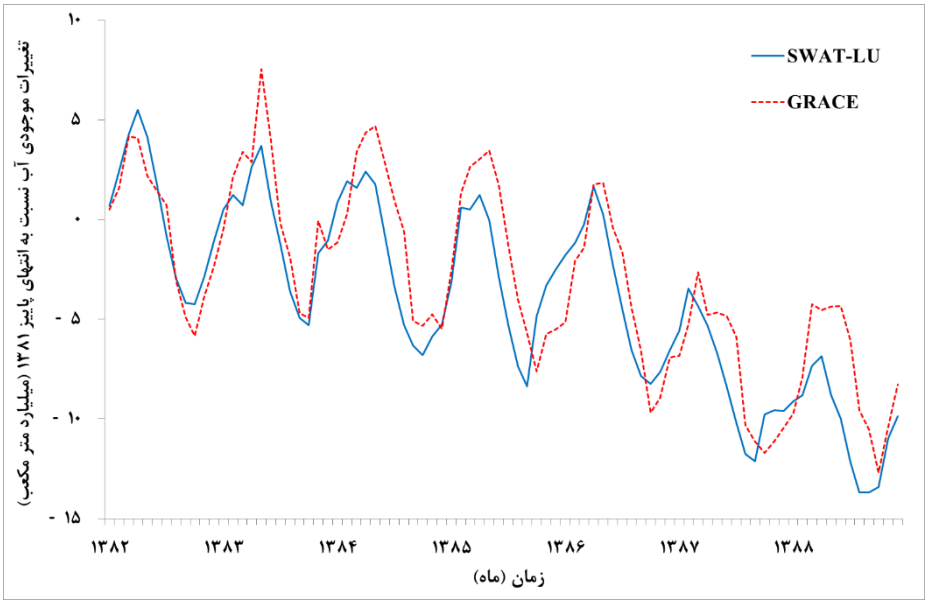
سری زمانی مذکور با داده‌های ماهواره GRACE مقایسه شد که نتیجه آن در شکل ۱۱ آمده است. وجود ضریب R2 برابر با ۰/۸۱ بین دو سری زمانی نشان می‌دهد که مدل عملکرد مناسبی را در شبیه‌سازی مولفه‌های مرتبط با ذخیره آب حوضه دارا می‌باشد. تغییرات موجودی آب حوضه در انتهای سال ۱۳۸۸ نسبت به انتهای سال ۱۳۸۱ توسط مدل SWAT-LU و داده‌های GRACE به‌ترتیب برابر با ۹/۱– و ۸/۳– میلیارد مترمکعب برآورد شده است. از این مقدار در حدود ۶ میلیارد مترمکعب مربوط به کاهش حجم آب دریاچه ارومیه بوده و مابقی به تغییرات سایر مولفه‌های ذخیره آب حوضه مرتبط می‌باشد. تفاوت مشاهده شده بین نتایج مدل و داده‌های GRACE می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند تحلیل اطلاعات این ماهواره و اثرات فیلترهای مکانی اعمال شده در پردازش نهایی آن‌ها باشد (Rodell et al., 2009).

تبخیر – تعرق اراضی کشاورزی

با توجه به بسته بودن حوضه آبریز دریاچه ارومیه، تبخیر – تعرق تنها مولفه هیدرولوژیکی خروجی از حوضه می‌باشد. از این رو، شبیه‌سازی و واسنجی مناسب آن حایز اهمیت زیادی می‌باشد.

برآورد مستقیم و گسترده از تبخیر – تعرق در کلیه پوشش‌های حوضه در دسترس نیست، اما برای اراضی کشاورزی آبی زیر کشت هر محصول، مقدار تقاضای آبی (تبخیر – تعرق متوسط دوره رشد گیاه برای اراضی هر دشت در سند ملی آب کشور ارایه شده است. این مقادیر با تبخیر – تعرق واقعی محصولات شبیه‌سازی شده برای سال‌های پرباران در مدل حوضه مقایسه گردید. بدین معنا که فرض شد در این سال‌ها، میزان تبخیر و تعرق واقعی با نیاز آبی کامل گیاه (تبخیر و تعرق اعلام شده در سند) برابر هستند. رویکردی که در تحقیق احمدزاده و همکاران نیز مورد استفاده قرار گرفته شده است (Ahmadzadeh et al., 2016). نتایج این بررسی نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل در سال‌های مرطوب و ارقام گزارش شده در سند ملی آب وجود دارد. به‌عنوان مثال، مقدار تبخیر – تعرق واقعی ۴ گیاه استفاده شده در مدل برای دشت‌های میاندوآب، ارومیه و تبریز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تبخیر

- تعرق واقعی، علاوه بر نوع گیاه و شرایط خاص کشاورزی، به شرایط اقلیمی سالانه نیز وابستگی زیادی دارد. از طرف دیگر میزان تامین آب مورد نیاز گیاه نیز به شدت بر مقدار تبخیر - تعرق واقعی آن اثرگذار است. به همین دلیل برای این مقایسه، مقادیر متوسط تبخیر - تعرق واقعی گیاهان برای اراضی در شرایط آبیاری کامل از مدل استخراج گردید.



شکل ۱۱- مقایسه تغییر کل موجودی آب حوضه بر اساس داده‌های GRACE و خروجی مدل SWAT

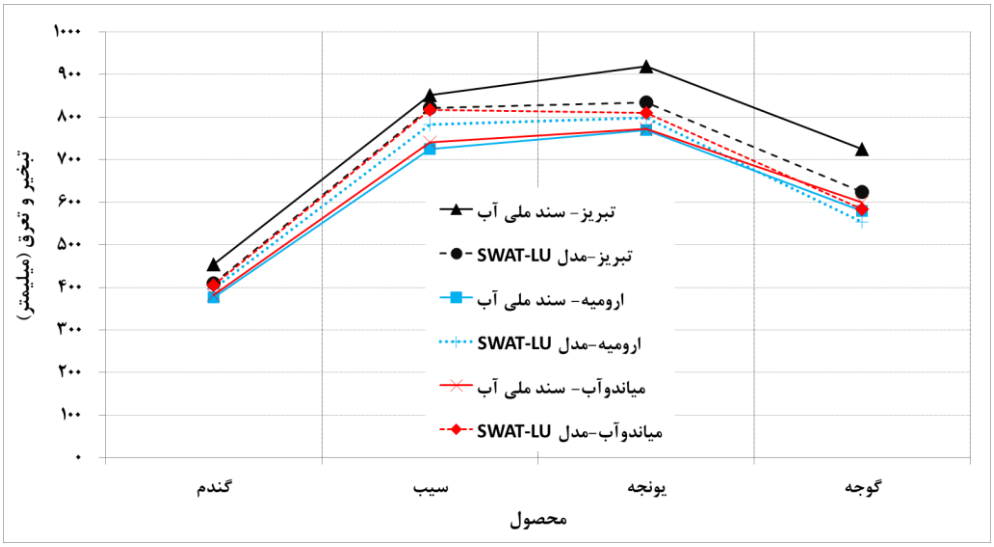
برداشت آب کشاورزی

با توجه به افزایش سطح اراضی کشاورزی حوضه طی مدل‌سازی و مقادیر تعریف شده برای آبیاری و راندمان، برداشت آب آبیاری شبیه‌سازی گردید. لازم به ذکر است که آب برداشت شده برای آبیاری از منابع آب سطحی، به جز پارامترهای تعیین شده، تابع شرایط هیدرولوژیکی حوضه در هر سال و مقادیر آب در دسترس می‌باشد. اما برای برداشت از آبخوان‌های حوضه به دلیل فرض عدم محدودیت موجودی آب در آن‌ها، ثابت و مطابق مقدار اولیه تعریف شده آن انجام گرفت. لازم به ذکر است که این فرض با توجه به گزارش مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور مبنی بر عدم مشاهده افت شدید در اکثر آبخوان‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه، دور از واقعیت نیست (بی‌نام، ۱۳۹۱).

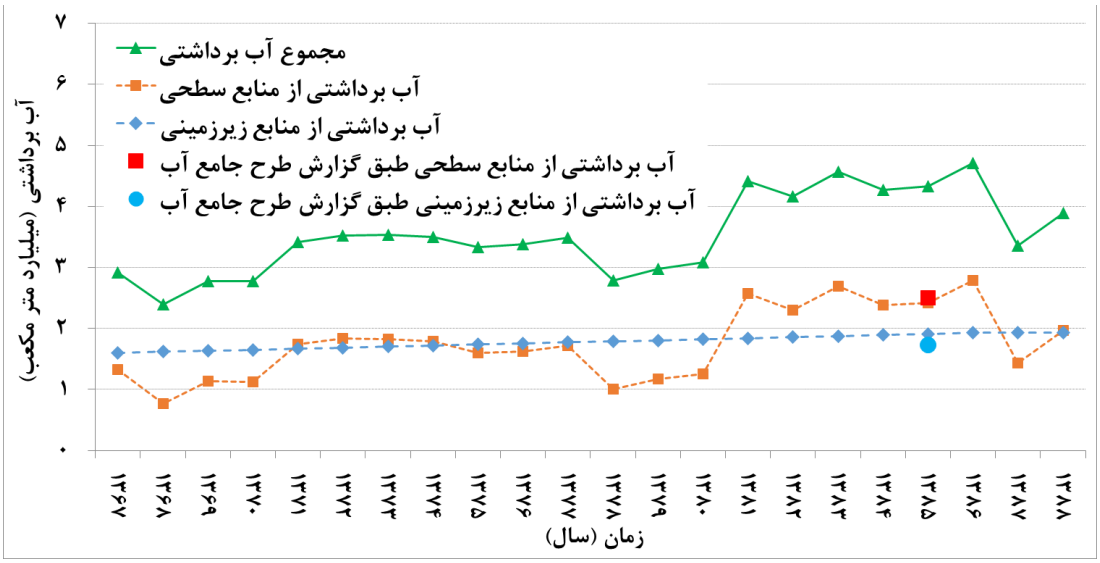
مقدار سالانه برداشت آب به منظور آبیاری اراضی کشاورزی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر برداشت از منابع آب زیرزمینی، به دلیل افزایش سطح زیر کشت، بطور مداوم در حال افزایش می‌باشد و از ۱/۶ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۷ به ۱/۹۵ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۶ رسیده و به دلیل ثابت در نظر گرفتن سطح اراضی کشاورزی بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸، در این بازه زمانی تغییری نداشته است. در همین دوره زمانی برداشت از منابع آب سطحی حوضه نوسانات زیادی را تجربه نموده، به نحوی که بازه تغییرات آن از ۰/۸ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۶۸ تا حدود ۲/۸ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۶ بوده است. لازم به ذکر است، بر اساس الگوی کشت و برنامه آبیاری در نظر گرفته شده، مقدار کل نیاز ناخالص آبیاری حوضه از منابع آب سطحی در شرایط کاربری اراضی سال ۱۳۸۶ بیش از ۳/۵ میلیارد مترمکعب می‌باشد که به دلیل عدم تامین کامل آن از سوی این منابع، در عمل حجم آب برداشتی کم‌تر می‌باشد. این موضوع در نتایج طرح جامع آب کشور (۱۳۹۱) نیز مورد تاکید قرار گرفته است. در مطالعات مذکور، مقدار برداشت آب کشاورزی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در سال ۱۳۸۵ (۲۰۰۶) به‌ترتیب ۲/۵ و ۱/۷ میلیارد مترمکعب برآورد شده که از تطابق مناسبی با مقادیر شبیه‌سازی شده در مدل SWAT-LU برخوردار است.

بررسی بیلان آب با استفاده از نتایج مدل

بررسی شرایط بیلان آب بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۸ بر مبنای اطلاعات خروجی مدل SWAT-LU موضوع این بخش می‌باشد. هدف این است که بخشی از قابلیت‌های مدل و امکان گزارش‌گیری‌های مختلف آن نشان داده شود. این تحلیل‌ها در دو قسمت برای مولفه‌های بیلان آب در سطح حوضه و دریاچه ارومیه انجام شده است که در ادامه تشریح می‌شوند.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر تبخیر - تعرق واقعی دوره رشد گیاهان بر اساس سند ملی آب و خروجی مدل SWAT برای دشت‌های میاندوآب، ارومیه و تبریز



شکل۱۳- مقادیر برداشت آب سالانه از منابع مختلف برای آبیاری اراضی کشاورزی در مدلSWAT-LU

بیلان آب حوضه

در این قسمت، تحلیل مولفه‌های بیلان آب حوضه به تفکیک برای کل دوره (۱۳۸۸-۱۳۶۷)، دوره ۱۱ ساله اول (۱۳۷۷-۱۳۶۷) و دوم (۱۳۸۸-۱۳۷۸)، سال خشک (۱۳۷۸) و سال تر (۱۳۷۳) به تفکیک صورت گرفته است. مولفه‌های اصلی بیلان آب حوضه شامل: بارش، تبخیر، مجموع آبدهی رودخانه‌ها (ورودی دریاچه) به همراه تغییر در ذخایر آب حوضه (شامل آب زیرزمینی، برف، رطوبت خاک و مخازن سطحی) می‌باشد که برای دوره‌های زمانی مورد نظر در جدول ۳ ارایه شده‌اند.

ملاحظه می‌گردد که بزرگ‌ترین مولفه خروجی آب از حوضه، تبخیر - تعرق با حجم متوسط ۱۴/۹ میلیارد مترمکعب در سال می‌باشد که حدود ۷۸ درصد بارش را شامل می‌گردد. خروجی متوسط سالانه از رودخانه‌های حوضه به دریاچه نیز در حدود ۴/۳ میلیارد مترمکعب می‌باشد که برای دوره ۱۱ ساله اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۶/۲ و ۲/۳ میلیارد مترمکعب است. طی این دوره، متوسط میزان کاهش ذخایر آب زیرزمینی ۱۱۰ میلیون مترمکعب در سال است. این منابع در دوره ۱۱ ساله اول، افت متوسط ۳/۵ میلیون مترمکعبی را تجربه نموده، اما در دوره ۱۱ ساله دوم و به دلیل افزایش برداشت و کاهش بارش، بطور متوسط به ۲۱۵ میلیون مترمکعب در سال افزایش یافته است.

جدول ۳- مولفه‌های بیلان آب حوضه در دوره‌های زمانی مختلف (میلیون مترمکعب)

مولفه	دوره تحلیل ۱۳۶۷-۱۳۸۸ (کل دوره)	۱۳۶۷-۱۳۷۷ (نیمه اول)	۱۳۷۸-۱۳۸۸ (نیمه دوم)	۱۳۷۳ (سال تر)	۱۳۷۸ (سال خشک)
بارش	۱۹۰۹۸	۲۱۲۰۱	۱۶۹۹۶	۲۷۶۶۶	۱۱۴۲۹
تبخیر - تعرق	۱۴۹۰۶	۱۴۹۹۳	۱۴۸۲۰	۱۶۱۴۹	۱۱۸۳۰
جریان خروجی	۴۲۷۳	۶۲۰۱	۲۳۴۵	۱۰۸۹۴	۷۵۳
تغییر ذخیره سدها	-۱۱/۲	۰/۳	-۲۲/۷	-۲۱۰/۱	-۳۱۶/۱
تغییر آب زیرزمینی	-۱۰۹/۳	-۳/۵	-۲۱۵/۰	۵۰۹/۹	-۷۸۷/۲
تغییر رطوبت خاک	۳۹/۵	۱۰/۳	۶۸/۷	۳۲۲/۴	-۵۲/۲
تغییر بودجه برفی	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۰/۵	۱/۱

بیلان آب دریاچه ارومیه

مولفه‌های بیلان آب دریاچه ارومیه شامل جریان‌های سطحی ورودی و بارش مستقیم می‌باشد. مولفه خروجی نیز شامل تبخیر از پیکره آبی و تلفات حرکت آب در پهنه‌های مسطح منتهی به دریاچه است. مقدار این مولفه‌ها نیز برای دوره‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه آن در جدول۴ ارایه شده است.

براساس این نتایج، متوسط سالانه جریان ورودی سطحی به محدوده دریاچه در کل دوره مورد بررسی در حدود ۴/۳ میلیارد مترمکعب بوده که برای دوره‌های زمانی ۱۱ ساله اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۶/۲ و ۲/۳ میلیارد مترمکعب بوده است. بدیهی است که این مقادیر با ارقام ثبت شده ایستگاه‌ها تفاوت دارد. از طرفی ایستگاه‌ها عمدتا بالاتر از مرز دریاچه قرار دارند و از طرفی نیز بعد از ایستگاه‌ها برداشت‌هایی صورت می‌گیرد که ثبت نمی‌شوند. به همین ترتیب، مقدار متوسط تلفات جریان پیش از رسیدن به پیکره آبی دریاچه نیز ۲۶۴ میلیون مترمکعب و برای دوره ۱۱ ساله اول و دوم نیز به‌ترتیب معادل ۲۹۵ و ۲۳۳ میلیون مترمکعب بوده است. در ادامه نیز متوسط سالانه تبخیر از سطح دریاچه برای کل دوره و دوره‌های ۱۱ ساله اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۵۷۱۵، ۶۴۵۳ و ۴۹۷۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. بررسی شرایط آبی دریاچه در سال‌های نمونه تر (۱۹۹۴) وخشک (۱۹۹۹) نشان می‌دهد، جریان ورودی به دریاچه در سال تر حدودا ۱۵ برابر سال خشک می‌باشد که حاکی از نوسانات شدید جریان‌های سالانه است.

جدول ٤- مولفه‌های سالانه بیلان آب دریاچه ارومیه در دوره‌های زمانی مختلف (میلیون مترمکعب)

مولفه	دوره تحلیل ۱۳۶۷-۱۳۸۸	۱۳۶۷-۱۳۷۷	۱۳۷۸-۱۳۸۸	۱۳۷۳	۱۳۷۸
جریان ورودی به محدوده دریاچه	۴۲۷۳	۶۲۰۱	۲۳۴۵	۱۰۸۹۴	۷۵۳
تلفات محدوده دریاچه	۲۶۴	۲۹۵	۲۳۳	۴۳۱	۴۰
بارش	۱۰۶۴	۱۲۴۴	۸۸۳	۱۶۸۷	۸۰۹
تبخیر	۵۷۱۵	۶۴۵۳	۴۹۷۶	۶۸۰۱	۶۵۷۹
بیلان دریاچه (متوسط)	-۶۴۲	۶۹۷	-۱۹۸۱	۵۳۴۹	-۵۰۵۷
حجم در ابتدا	۱۹۲۳۴	۱۹۲۳۴	۲۶۹۰۱	۲۶۴۶۰	۲۶۹۰۱
حجم در انتها	۵۱۱۱	۲۶۹۰۱	۵۱۱۱	۳۱۸۰۹	۲۱۸۴۴

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر بخش اول تلاشی بود برای توسعه مدلی جامع به منظور پاسخ‌گویی به برخی سوالات اساسی درجهت احیای دریاچه ارومیه از منظرمدیریت منابع آب. نتایج زیر از این بخش قابل ارایه هستند.

در ارزیابی مدل‌های موجود ملاحظه شد که SWAT به دلایل مختلف و به‌خصوص متن‌باز بودن آن، توانایی لازم برای تحقق اهداف مورد نظر تحقیق را دارا می‌باشد، هر چند سابقه‌ای از کاربرد آن در حوضه‌های بسته وجود نداشت. از طرفی نیز برای موارد مهمی، نظیر شبیه‌سازی پسروی و پیشروی خط ساحلی دریاچه، اعمال پویای تغییرات کاربری اراضی در سطح حوضه و همچنین امکان شبیه‌سازی برخی اقدامات مدیریتی مورد نظر، نیاز به اعمالی تغییراتی در کد مدل

ضرورت پیدا کرد که این ویرایش SWAT-LU اطلاق شد. نتایج نشان داد که مدل اصلاح شده به خوبی شبیه‌سازی‌های لازم را انجام داده است. به‌طوری‌که مقادیر شاخص‌های R^2 و NS برای جریان رودخانه‌ها در محل ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه در دوره واسنجی در ۸۱ و ۷۷ درصد از ایستگاه‌ها و برای دوره صحت‌سنجی در ۸۱ و ۷۹ درصد از ایستگاه‌ها بیش‌تر از ۰/۵ بود. لازم به ذکر است دقت شبیه‌سازی‌های جریانات سطحی رودخانه‌های مهم حوضه توسط مدل عمدتا بسیار مناسب می‌باشد که نتیجه آن در واسنجی مدل برای حجم آب دریاچه قابل مشاهده بود.

بررسی عملکرد مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی که اندازه‌گیری‌های مستقیم در خصوص آن‌ها موجود نیست نیز بر اساس آمار و اطلاعات قابل دسترسی انجام شد. این بررسی‌ها شامل تغییرات کل بیلان آب حوضه، مقدار تبخیر – تعرق محصولات زراعی و میزان برداشت آب کشاورزی بود که نتایج مدل رضایت‌بخش ارزیابی گردید.

ارزیابی بیلان منابع آب حوضه با استفاده از نتایج مدل برای دوره زمانی ۱۱ ساله ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۸ انجام شد. نتایج نشان داد، طی این دوره بارش، تبخیر و تعرق و جریان ورودی به دریاچه به‌ترتیب ۱۹/۸، ۱/۱ و ۶۲/۲ درصد کاهش داشته‌اند. هم‌چنین در همین دوره‌ها مقدار بیلان نیز در این دوره نشان داد بارش وتبخیر از پیکره آبی دریاچه به‌ترتیب ۲۹ و ۲۲/۹ درصدکاهش یافته‌اند.

نتایج مدل نشان دهنده تغییرات قابل ملاحظه بارش سالانه در شرایط خشک‌سالی و ترسالی حوضه است که اثر آن بر میزان آبدهی رودخانه‌ها به صورت تصاعدی می‌باشد. بدین معنی که ضریب رواناب سالانه در ترسالی‌های شاخص به بیش از ۴۵ درصد می‌رسد، در حالی‌که برای خشک‌سالی‌های شدید در حدود ۱۵ درصد بوده است. این شرایط موجب می‌گردد تا اختلاف حجم آب ورودی سالانه به دریاچه ارومیه در یک سال ترتا ۱۵ برابر سال خشک و ۲/۵ برابر متوسط بلندمدت باشد.

در خاتمه قابل ذکر است که رویکرد این تحقیق در توسعه مدلی جامع از ضرورت‌هایی است که برای سایر حوضه‌های آبریز کشور نیز کاملا قابل توصیه است. ابزاری که می‌تواند شیوه برآورد منابع و مصارف را ارتقا بخشد و هم می‌تواند سوالاتی که هم‌اکنون در حوزه مدیریت منابع آب کشور وجود دارد، مانند تفکیک اثرات اقلیمی و انسانی برآورد رودخانه‌ها و یا نقش مدیریت آب کشاورزی بر تغییرات منابع و مصارف را پاسخ‌گو و به‌عنوان سیستم پشتیبانی از تصمیم (DSS) عمل کند.

منابع

احمدزاده،ح. ۱۳۹۱. ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز زرینه‌رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

بی‌نام. ۱۳۹۱. مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور. وزارت نیرو.

بی‌نام.۱۳۹۲. مطالعه بررسی روند تغییرات محیطی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. گزارش فنی. موسسه تحقیقات آب.

بی‌نام. ۱۳۹۳. برآورد میزان واقعی آب ورودی به پیکره اصلی (آبی) دریاچه ارومیه از رودخانه‌های منتهی به دریاچه. گزارش فنی. ستاد احیای دریاچه ارومیه.

رضایی،ح. ۱۳۹۳. نقش بافرزون و هیدروگرافی در تعیین عوامل بیلان آب دریاچه ارومیه. گزارش فنی. دانشگاه ارومیه.

شکری،ا و مرید،س. ۱۳۹۳. بررسی پارامترهای بیلان آب در محدوده ایستگاه‌های آب‌سنجی انتهایی حوضه دریاچه ارومیه تا پیکره آبی آن. گزارش فنی. دانشگاه تربیت مدرس.

فرخ‌نیا،الف. ۱۳۹۴. نقش تغییرات کاربری اراضی و روند در متغیرهای اقلیمی بر هیدرولوژی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. رساله دکتری مهندسی سازه‌های آبی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

Abbaspour,K. 2011. User Manual for SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Duebendorf, Switzerland, 103 pp.

Abbaspour,M and Nazaridoust,A. 2007. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. International Journal of Environmental Studies. 64:161-169.

Ahmadzadeh,H., Morid,S., Delavar,M and Srinivasan,R. 2016. Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. Agricultural Water Management. 175:15-28.

Ahmadzadeh Kokya,B and Ahmadzadeh Kokya,T. 2008. Proposing a formula for evaporation measurement from salt water resources. Hydrological processes. 22:2005-2012.

Arnold,J.G., Moriasi,D.N., Gassman,P.W., Abbaspour,K.C., White,M.J., Srinivasan,R., Santhi,C., Harmel,R., Van Griensven,A and Van Liew,M.W. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE. 55:1491-1508.

Beven,K.J. 2011. Rainfall-runoff modelling: the primer. John Wiley and Sons.

CIWP,2008. Integrated Management Plan for Lake Uromiyeh. Department of Environment, Islamic Republic of Iran and

Leaney,F and Christen,E.W. 2000. Evaluating basin leakage rate, disposal capacity and plume development. CRC for catchment hydrology.

Li,B., Su,H., Chen,F., Li,H., Zhang,R., Tian,J., Chen,S., Yang,Y and Rong,Y. 2014. Separation of the impact of climate change and human activity on streamflow in the upper and middle reaches of the Taoer River, northeastern China. Theoretical and applied climatology. 118:271-283.

Moriasi,D.N., Arnold,J.G., Van Liew,M.W., Bingner,R.L., Harmel,R.D and Veith,T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 50:885-900.

Neitsch,S.L., Arnold,J.G., Kiniry,J.R and Williams,J.R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.

Rodell,M., Velicogna,I. and Famiglietti,J.S. 2009.Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Nature. 460:999-1002.

Scott,C., Vicuña,S., Blanco-Gutiérrez,I., Meza,F and Varela-Ortega,C. 2014. Irrigation efficiency and water-policy implications for river basin resilience. Hydrology and Earth System Sciences. 18:1339-1348.

Snyder,R.L. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 118:977-980.

Van Griensven,A and Bauwens,W. 2005. Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin. Hydrological processes. 19:827-838.

Wahr,J., Swenson,S., Zlotnicki,V andVelicogna,I. 2004. Timevariable gravity from GRACE: First results. Geophysical Research Letters. 31:L11501.

Yang,J., Reichert,P., Abbaspour,K., Xia,J and Yang,H. 2008.Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. Journal of Hydrology. 358:1-23.

Zang,C., Liu,J., Jiang,L and Gerten,D. 2013. Impacts of human activities and climate variability on green and blue water flows in the Heihe River Basin in Northwest China.Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 10:9477-95048

UNDP/GEF.

Dhami,B.S and Pandey,A. 2013.Comparative review of recently developed hydrologic models. Journal of Indian Water Resources Society. 33.3:34-42.

Eckhardt,K., Haverkamp,S., Fohrer,N., Frede,H.-G. 2002. SWAT-G, a version of SWAT99. 2 modified for application to low mountain range catchments. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 27: 641-644.

Fan,J., Tian,F., Yang,Y., Han,S and Qiu,G. 2010. Quantifying the magnitude of the impact of climate change and human activity on runoff decline in Mian River Basin, China.Water Science and Technology. 62:783-791.

FAO,2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). Rome, Italy.

Galván,L., Olías,M., Izquierdo,T., Cerón,J and De Villarán,R.F. 2014. Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation. Journal of hydrology. 509:257-265.

Gassman,P.W., Reyes,M.R., Green,C.H and Arnold,J.G. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50:1211-1250.

Gül,G.O., Rosbjerg,D.,Gül,A., Ondracek,M and Dikgola,K. 2010.Assessing climate change impacts on river flows and environmental flow requirements at catchment scale. Ecohydrology. 3:28-40.

Jain,S.K., Tyagi,J and Singh,V. 2010. Simulation of runoff and sediment yield for a Himalayan watershed using SWAT model. Journal of Water Resource and Protection. 2:267-281.

Kim,N.W., Lee,J.E., Chung,I.M and Kim,D.P. 2008. Hydrologic component analysis of the Seolma-Cheon watershed by using SWAT-K model. Journal of Environmental Science International. 17:1363-1372.

Koch,F.J. 2011. SWAT Optimization for Land Use Dynamics. Technical University of Cottbus.

Krysanova,V and Arnold,J.G. 2008. Advances in ecohydrological modelling with SWAT - a review.Hydrological Sciences Journal. 53:939-947.

Lankford,B. 2012. Fictions, fractions, factorials and fractures; on the framing of irrigation efficiency. Agricultural Water Management. 108:27-38.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 12, Agu.-Sep. 2018, p. 647-665

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۲، مرداد - شهریور ۱۳۹۷، ص. ۶۶۵-۶۴۷

Development of SWAT-LU Model for Simulation of Lake Urmia Water Level Decreaseand Assessment of the Proposed Actions for its Restoration; Part 1: Development, Calibration and Validation of SWAT-LU Model

A. Farokhnia[1], S. Morid[2*], K. Abbaspour[3], M. Delavar [4]

Recived: Feb.06, 2017 Accepted: Mar.15, 2018

Abstract

The rapid drop of Urmia Lake water level in the past two decades has led to serious concerns about the future of this lake and the environmental, economic and social negative effects of its elimination. Mitigation of the current problem and restoration of the lake requires a comprehensive approach, which cannot be achieved without detail understanding about the causes of the current situation and the proper assessment of the effectiveness of the proposed measures. In the present study, a custom edition of the SWAT hydrological model, modified according to the conditions and processes of the Urmia Lake watershed (SWAT-LU version), has been developed to evaluate the above-mentioned issues. This paper (as the first of three papers to provide the results of the research), the approaches used in the development, calibration and validation of the model are presented. The results showed that the SWAT-LU model has appropriate capabilities to simulate the hydrological cycle in Urmia Lake watershed and the modifications that have been carried out can well explain the nature of these processes. The calibration indices of the model for about 80% of the hydrometric stations was within acceptable limits and the results of the simulation of Lake Urmia water volume was also very satisfactory. Furthermore, controlling the model outputs for other hydrological components showed the model's accuracy in their simulation. In summary, the results of these analyzes showed that the developed model simulates the components of the hydrological cycle of the Lake Urmia Lake with acceptable accuracy and is a suitable tool for analyzing and evaluating the effect of different measures on the amount of various hydrological components and their interaction.

Keywords: Hydrologic simulation, SWAT model, Urmia Lake, Water balance

1- Assistant Professor, Department of Water Resources Research, Water Research Institute
2- Professor, Department of Water Resources Engineering, Agriculture Faculty, Tarbiat Modares University
3- Associate Professor, Department Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology
4- Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Agriculture Faculty, Tarbiat Modares University
(*-Corresponding Author: Email: morid_sa@modares.ac.ir)