نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۲، آذر - دی ۱۳۹۷، ص. ۱۰۵۸-۱۰۴۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 12, Des.-Jan. 2018, p. 1041-1058

توسعه مدل SWAT-LU برای بررسی و شبیه‌سازی علل افت تراز دریاچه ارومیه و ارزیابی اثربخشی راه‌کارهای مطرح در احیای آن (نقش عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات هیدرولوژیکی حوضه و دریاچه)

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲۱

چکیده

شناخت دلایل خشک شدن سریع دریاچه ارومیه در دهه گذشته و اثر کمی عوامل مختلف بر این روند، اولین گام در تدوین برنامه‌های مناسب برای بهبود شرایط آن می‌باشد که کم‌تر در قالب تحلیل‌های مستدل علمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از همین رو، تحقیق حاضر ارزیابی اثر کمی عوامل موثر بر تغییر بیلان آبی دریاچه را در دو دسته کلی تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی هدف قرار داده است. بدین منظور سناریوسازی حذف منفرد و توام تغییرات مولفه‌های مذکور در دوره زمانی شبیه‌سازی مدل SWAT-LU انجام شد و از مقایسه نتایج حاصل با شرایط موجود، اثر آن‌ها تعیین گردید. بطور خلاصه نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که در دوره ۲۲ ساله منتهی به سال ۱۳۸۸، اثر تجمعی تغییرات اقلیمی و انسانی در کاهش جریان ورودی به دریاچه ارومیه تقریبا برابر بوده، اما به دلیل تشدید تغییرات اقلیمی در نیمه دوم این دوره، اثر عوامل اقلیمی بر کاهش حجم آب دریاچه بیش‌تر بوده است. هم‌چنین تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه نیز با استفاده از نتایج مدل نشان داد که کاهش نسبی جزیی در مقدار بارش بلندمدت حوضه منجر به کاهش نسبی بسیار بیش‌تری در آبدهی حوضه گردید که اثر آن به مراتب بسیار بیش‌تر از تغییرات دما خواهد بود. بروز روندهای اقلیمی ضعیف می‌تواند روندهای هیدرولوژیکی قابل توجهی را موجب گردد که همین مساله می‌تواند دلایل بروز خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی دهه اخیر در بخش‌هایی وسیعی از کشور را توضیح دهد.

واژه‌های کلیدی: حساسیت هیدرولوژیکی، دخالت انسانی، دریاچه ارومیه، روندهای اقلیمی

مقدمه

علت افت تراز دریاچه ارومیه و شدت بالای تغییرات آن از سوالاتی می‌باشد که طی سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این‌باره تاکنون نظرات مختلفی بیان گردیده است که مواردی مانند کاهش بارندگی و افزایش دما (به عنوان عوامل اقلیمی) به همراه توسعه سطح زیرکشت اراضی و سدسازی (عوامل انسانی) از آن جمله هستند (بی‌نام، ۱۳۸۹). اما بررسی‌هایی که در خصوص نحوه این ارزیابی‌ها به انجام رسید، نشان داد که این نتایج عمدتاً بر مبنای نوعی قضاوت‌های کارشناسی و استفاده از داده‌های غیرمستقیم احصا شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات لک و همکاران (۱۳۹۰)، آقاکوچک و همکاران و جلیلی و همکاران اشاره نمود (Aghalouchak et al., 2015, Jalili et al., 2016). از آن‌جا که شناخت ریشه‌های بروز مشکلات فعلی دریاچه ارومیه اولین گام در راستای تمهید برنامه‌های مناسب برای احیای آن می‌باشد، ضروری است که اثر کمی این عوامل بر بروز شرایط فعلی دریاچه ارومیه با رویکردی دقیق و مستقیم‌تر مورد ارزیابی قرار گیرند.

تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی در سطح حوضه‌های آبریز می‌توانند چرخه پیچیده آب را تحت تأثیر خود قرار دهند که به موضوع مورد توجهی در تحقیقات روز بدل شده است (Chen et al., 2013). هر دو این محرک‌ها می‌توانند بر مقدار و الگوی توزیع زمانی و مکانی منابع آب اثر بگذارند (Fan et al., 2010). بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که حساسیت منابع آب نسبت به این‌گونه تغییرات در نواحی خشک و نیمه‌خشک به مراتب بیش‌تر است (Chen

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

et al., 2013; Jiang et al., 2011). با بررسی مراجع مختلف مشخص شد که ۳ روش عمده برای تفکیک اثرات عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییرات مولفه‌های بیلان آب مورد استفاده قرار گرفته است (Wang., 2014) که عبارتند از: ۱) تحلیل حوضه‌های مشابه[1]، ۲) تحلیل الاستیسیته اقلیمی[2] و ۳) مدل‌سازی هیدرولوژیکی.

رویکرد تحلیل حوضه‌های مشابه از روش‌های سنتی است که معمولا برای بررسی اثر تغییرپذیری اقلیمی بر حوضه‌های آبریز کوچک مورد استفاده قرار گرفته است (Brown et al., 2005)، چرا که یافتن دو حوضه آبریز متوسط یا بزرگ با خصوصیات مشابه در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نمی‌باشد (Lørup et al., 1998; Zhao et al., 2010). دو روش دیگر عمدتاً در یک چارچوب تحلیلی یکسان به کار گرفته شده‌اند، بدین ترتیب که ابتدا بر اساس آنالیز اطلاعات هیدرواقلیمی و تعیین زمانی به عنوان شروع تغییرات، دوره زمانی تحلیل به دو بازه قبل و بعد از تغییر تقسیم می‌شود. سپس پارامترهای مدل بر اساس اطلاعات دوره قبل از تغییرات (دوره پایه) تعیین گردیده و شرایط هیدرولوژیکی متصور در صورت عدم وقوع تغییر در شرایط اقلیمی و یا انسانی برای دوره بعدی با استفاده از مدل واسنجی شده برآورد می‌گردد. در نهایت اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مولفه هیدرولوژیکی موردنظر در دوره بعد از تغییرات به عنوان میزان کمی اثر عامل مورد بررسی بر مولفه مذکور در نظر گرفته می‌شود (Wang., 2014).

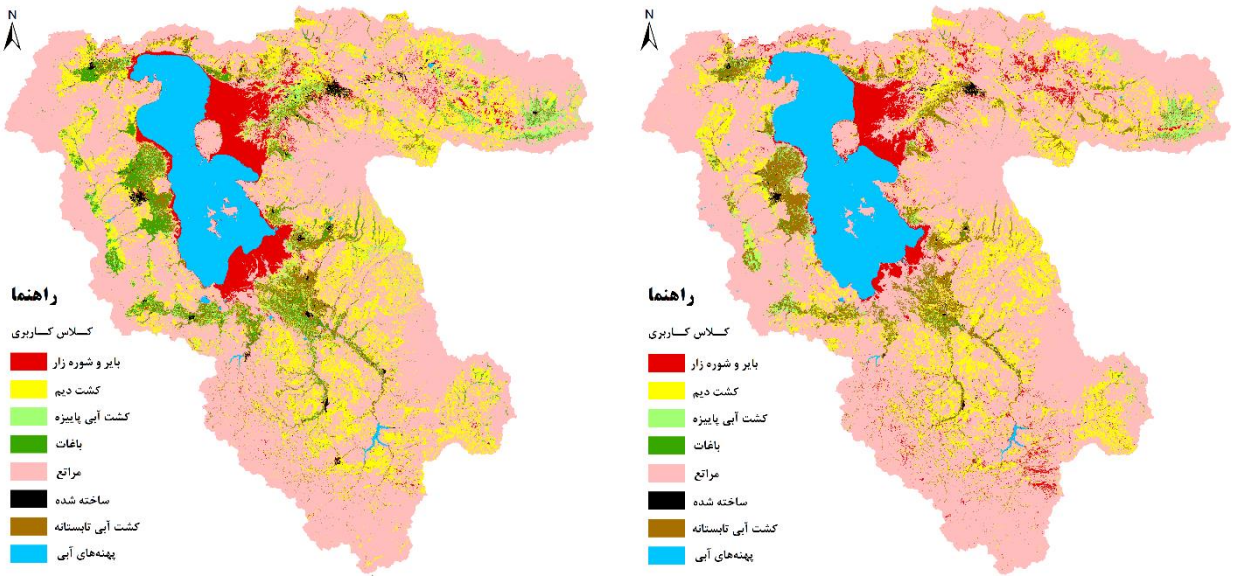
در مقایسه بین دو رویکرد مذکور برای تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییرات هیدرولوژیکی، استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی دارای مزیت‌های مهمی است که عبارتند از (Wang., 2014): الف) بکارگیری مدل‌های هیدرولوژیکی، امکان بررسی اثر تغییر شرایط اقلیمی و انسانی بر کلیه مولفه‌های بیلان حوضه آبریز را فراهم می‌سازد، ب) روابط مورد استفاده در روش تحلیل الاستیسیته اقلیمی بر اساس فرض عدم تغییر ذخیره آب موجود در حوضه (سطحی و زیرزمینی) تعریف شده‌اند که این فرض در شرایط واقعی و به خصوص برای حوضه‌های آبریز بزرگ چندان صادق نیست، ج) به‌طور کلی دخالت‌های انسانی از منظر تأثیرگذاری آن‌ها بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز می‌تواند در دو گروه اقدامات دارای واکنش سریع (نظیر احداث سدها و اجرای پروژه‌های انتقال بین حوضه‌ای) و یا تدریجی (تغییر کاربری اراضی) تقسیم گردد. زمان بروز و میزان تأثیر اقدامات دسته دوم ممکن است در دوره زمانی پایه اتفاق افتاده باشند، ولی عمده تأثیر آن‌ها در دوره زمانی پس از تغییر در جریان رودخانه دیده شود. این اثرات در کاربرد روش‌شناسی تحلیل الاستیسیته اقلیمی قابل ارزیابی نمی‌باشند و د) امکان برآورد اثر مستقل انسانی و اقلیمی هر دو محرک انسانی و اقلیمی و تعیین اندرکنش آن‌ها فراهم می‌گردد.

علی‌رغم مزایای فوق، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی با چالش‌هایی نظیر نیاز به داده‌های فراوان، زمان‌بر بودن فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی، هزینه‌های محاسباتی و هم‌چنین عدم قطعیت‌های ناشی از ساختار مدل و پارامترهای مورد استفاده همراه است (Wang et al., 2013). هم‌چنین در استفاده از این مدل‌ها برای تفکیک اثرات اقلیمی، روندزدایی از سری زمانی اطلاعات اقلیمی یکی از مراحل کار می‌باشد. به عنوان مثال، ژانگ و همکاران اثر تغییرپذیری اقلیمی را بر آبدهی حوضه‌ای در چین را با استفاده از مدل VIC مورد بررسی قرار دادند. (Zhang et al., 2012) آن‌ها پس از نشان دادن وجود روند افزایشی در سری زمانی داده‌های دما، این سری را روندزدایی و با اجرای مجدد مدل بر اساس آن، اثر کمی افزایش دما را بر آبدهی حوضه تفکیک نمودند.

بررسی سوابق تحقیق نشان داد که مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی در بررسی و تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی توسط محققین مختلف بکار گرفته شده است. در این بین، SWAT از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی بوده که در مطالعات متعددی مورد استفاده واقع شده است (Fan et al., 2010; Li et al., 2014; Li et al., 2009; Zang et al., 2013). در این تحقیق نیز از SWAT-LU استفاده شده که ویرایشی از این مدل می‌باشد. شرح کامل اصلاح، واسنجی و ارزیابی آن برای شرایط خاص حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقاله قبل ارایه گردید.

با این مقدمه و با استفاده از ابزار توسعه یافته در این تحقیق، مقاله حاضر تلاش دارد تا عواملی موثر بر کاهش تراز دریاچه ارومیه را بررسی و در حد ممکن نقش عوامل انسانی را از تغییرات اقلیمی تفکیک نماید. بدین منظور، ابتدا اصل وجود روند در سری زمانی متغیرهای اقلیمی حوضه مورد توجه قرار گرفته شد. سپس، تغییرات کاربری اراضی (به عنوان معرف نقش عامل انسانی) بررسی و نهایتا نقش آن‌ها بر تغییر در مولفه‌های اصلی بیلان آب حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نیز میزان حساسیت این مولفه‌ها نسبت به تغییر در شرایط بلندمدت مولفه‌های اقلیمی (بارش و دما) تعیین شد. از نکات مهم در این تحقیق، ارزیابی شاخصی برای مقایسه وضعیت فعلی حوضه با شرایط غیرمتاثر از اقدامات مدیریت انسانی می‌باشد که برای آن از دو رویکرد حفظ ارتباط تاریخی بین تراز آبی دریاچه‌های ارومیه و وان و تحلیل پایداری آبی دریاچه ارومیه استفاده گردید. رویکردهایی که کم‌تر در تحقیقات مشابه مورد استفاده واقع شده است.

1- Paired catchments
2- Climate elasticity



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۱۳٦٦ (راست) و ۱۳۸٦ (چپ)

جدول ۱- وسعت اراضی کاربری‌های مختلف در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقاطع زمانی مورد بررسی و میزان تغییر آن‌ها

سال / کلاس کاربری	۱۹۸۷	۲۰۰۷	درصد تغییر
کشت آبی پاییزه	۹۸۲۱۷	۱۷۹۲۴۶	۵/۸۲
باغ	۳۵۱۱۳	۱۳۱۲۰۴	۷/۲۷۳
کشت آبی تابستانه	۲۹۶۸۰۵	۲۵۶۴۳۵	۶/۱۳-
اراضی دیم	۶۹۰۰۰۶	۸۵۰۷۴۹	۳/۲۳
آب	۵۱۱۲۳۳	۴۳۳۷۹۳	۱/۱۵-
بایر و شوره‌زار	۲۱۱۶۲۳	۲۶۰۴۰۹	۱/۲۳
ساخته شده	۲۰۰۶۱	۳۳۱۶۵	۳/۶۵
مرتع	۳۳۱۵۲۷۶	۳۰۳۳۳۲۵	۵/۸-

مواد و روش‌ها

اطلاعات مورد استفاده

داده‌های اقلیمی

با توجه به اهداف تحقیق که مستلزم اجرای مدل با سری‌های زمانی روندزدایی شده اقلیمی بود؛ نیاز به تحلیل‌های روند و روندزدایی سری‌های زمانی دما و بارش ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل می‌باشد. بدین منظور، سری‌های زمانی دما و بارش به‌ترتیب در ۱۱ و ۲۵ ایستگاه (مورد استفاده در توسعه مدل SWAT-LU در مقاله قبل) مورد استفاده قرار گرفتند.

نقشه‌های کاربری اراضی

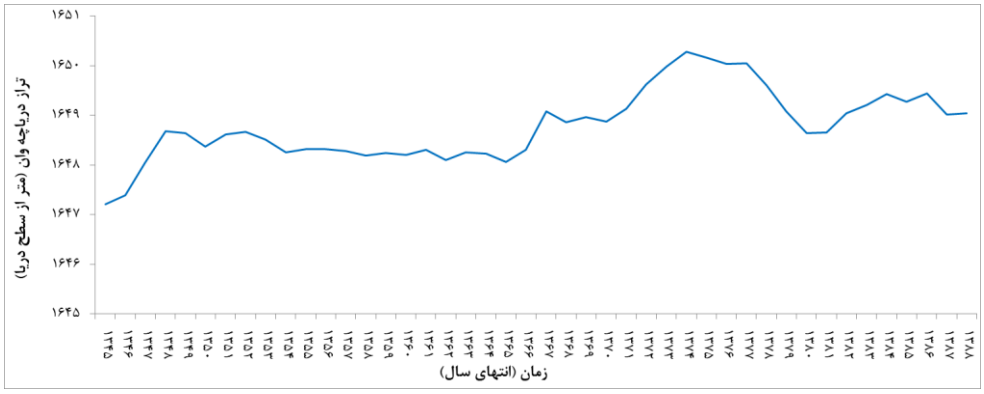
در خصوص تغییرات کاربری اراضی از دو نقشه تهیه شده از تصاویر ماهواره LANDSAT5 مربوط به سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۶ استفاده شد. نقشه‌های مذکور بر اساس تصاویر دو زمانه برای هر مقطع زمانی و با بهره‌گیری از داده‌های زمینی جمع‌آوری شده از کاربری‌های مختلف اراضی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در قالب روش طبقه‌بندی فازی نظارت شده شی‌پایه[1]، تهیه گردید (فرخ‌نیا، ۱۳۹۴). نقشه‌های حاصل در شکل ۱ آمده و در جدول ۱ نیز مساحت هر یک از کاربری‌های اراضی موردنظر در دو مقطع زمانی ارایه شده است. در خصوص تغییرات اراضی کشاورزی در سطح حوضه بطور کلی می‌توان اذعان نمود که سطح اراضی باغی و کشت آبی پاییزه حوضه به ترتیب به میزان ۹۶ و ۸۱ هزار هکتار افزایش و وسعت اراضی زیر کشت آبی تابستانه در سطح حوضه به مقدار ۴۰

1- Object-based

هزار هکتار کاهش یافته است. در مجموع سطح اراضی تحت آبیاری حوضه حدود ۱۳۷ هزار هکتار (حدود ۳۲ درصد) و سطح اراضی زیر کشت دیم حدود ۱۶۰ هزار هکتار (حدود ۲۳ درصد) افزایش یافته است. لازم به ذکر می‌باشد، این نقشه‌ها در مراحل توسعه و واسنجی مدل SWAT-LU نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

داده‌های تراز آب دریاچه وان

برای این تحقیق بازدیدی از حوضه آبریز دریاچه وان صورت گرفت و در آن وضعیت تغییرات کاربری اراضی طی دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده در خلال این بازدید، مشخص شد که توسعه زیادی در آن رخ نداده است که دلیل اصلی این امر مربوط به سیاست‌های دولت ترکیه مبنی بر کنترل رشد جمعیت و جلوگیری از ارتقای شرایط اقتصادی در این منطقه بوده است. از طرفی نیز بدلیل فرصت‌های شغلی مناسب‌تر، رغبتی زیادی برای ورود به بخش کشاورزی وجود ندارد. بدین ترتیب می‌توان پذیرفت که تغییرات تراز دریاچه وان عمدتاً متاثر از نوسانات اقلیمی باشد. بدین منظور اطلاعات مربوط به تراز آب آن از محققین دانشگاه وان اخذ گردید (شکل ۲). نحوه بکارگیری داده‌های تراز دریاچه وان در بخش نتایج مورد اشاره قرار خواهد گرفت.



شکل ۲- سری زمانی تراز آب مشاهداتی دریاچه وان در انتهای هر سال

روش‌شناسی

در این بخش به روش‌شناسی‌های مورد استفاده در تعیین سهم عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییر مولفه‌های هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT-LU، تحلیل روند متغیرهای هیدرواقلیمی، روندزدایی از آن‌ها و شیوه محاسبه میزان حساسیت مولفه‌های هیدرولوژیکی به تغییرات اقلیمی با استفاده از نتایج خروجی مدل ارایه گردید.

تفکیک سهم عوامل اقلیمی و انسانی

در اکثر تحقیقات انجام شده در خصوص تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییر مولفه‌های هیدرولوژیکی، تغییر در مقدار یک مولفه هیدرولوژیکی به صورت تابعی از عوامل انسانی و اقلیمی به شکل رابطه ۱ در نظر گرفته شد (Jiang et al., 2011; Li et al., 2007; Wang., 2014):

$$\Delta V = \Delta V_C + \Delta V_H \quad (۱)$$

که در آن ΔV کل تغییر در مقدار مولفه موردنظر بوده و ΔV_C و ΔV_H نیز به ترتیب سهم تغییر ناشی از عوامل انسانی و اقلیمی می‌باشند که به صورت رابطه ۲ تا ۴ محاسبه می‌شوند:

$$\Delta V = V_B - V_{C,H} \quad (۲)$$

$$\Delta V_C = V_B - V_C \quad (۳)$$

$$\Delta V_H = V_B - V_H \quad (۴)$$

در این روابط، V_B مقدار مولفه در شرایط بالفعل (سناریوی پایه)، $V_{C,H}$ مقدار مولفه در شرایط حذف توام اثر عوامل اقلیمی و انسانی (سناریوی مبتنی بر داده‌های اقلیمی روندزدایی و کاربری اراضی ثابت ابتدای دوره شبیه‌سازی)، V_C مقدار مولفه در شرایط حذف منفرد عامل اقلیمی (سناریوی مبتنی بر داده‌های اقلیمی روندزدایی شده) و V_H نیز مقدار مولفه در شرایط حذف منفرد عامل انسانی (سناریوی مبتنی بر کاربری اراضی ثابت ابتدای دوره شبیه‌سازی) می‌باشند.

در شرایطی که اندرکنش قابل توجهی بین تغییر در شرایط اقلیمی و انسانی بر تغییر مولفه‌های هیدرولوژیکی وجود دارد، بایستی مولفه دیگری که معرف اثرات متقابل بین این دو باشد، به رابطه فوق اضافه گردد. بنابراین رابطه ۱ به صورت رابطه ۵ قابل بازنویسی خواهد بود:

$$\Delta V = \Delta V_C + \Delta V_H + \Delta V_{(C,H)} \quad (۵)$$

که در آن $\Delta V_{(C,H)}$ معرف اثر توام عوامل انسانی و اقلیمی در تغییر مولفه هیدرولوژیکی موردنظر می‌باشد. لازم به ذکر است که این مولفه در سایر تحقیقات مشابه به طور مستقیم در روابط نیامده، اما تأثیر آن که موجب می‌گردد مجموع اثر تغییرات منفرد هر عامل با اثر تغییر توام آن‌ها برابر نباشد در برخی مراجع مورد اشاره قرار گرفته است (Li et al., 2009; Ma et al., 2010; Wang et al., 2012).

متغیر مذکور برای حوضه‌های آبریزی (نظیر حوضه دریاچه ارومیه) که برداشت آب و فعالیت‌های کشاورزی گسترده‌ای در آن‌ها صورت می‌گیرد، از اهمیت خاصی برخوردار است. به عنوان مثال چنان‌چه شرایط اقلیمی موجب افزایش آبدهی حوضه شود، بخشی از آن برای آبیاری اراضی کشاورزی برداشت خواهد شد، بنابراین تمامی اثر افزایش آبدهی حوضه به واسطه تغییر شرایط اقلیمی در جریان خروجی آن قابل مشاهده نخواهد بود. از سوی دیگر، چنان‌چه تغییر در کاربری اراضی و احداث سدهای جدید موجب افزایش تقاضای آب در سطح حوضه گردد، معمولا این تقاضا در تمامی زمان‌ها پاسخ داده نمی‌شود و میزان تامین سالانه آن، تابع شرایط اقلیمی سال مربوط نیز هست. به همین ترتیب چنان‌چه هر دو عامل هم‌زمان تغییر کنند، اثر توام آن‌ها بر مولفه‌های مختلف هیدرولوژیکی حوضه برابر با مجموع اثر تغییرات منفرد آن‌ها نخواهد بود، چرا که تغییر هر یک از آن‌ها بر میزان تأثیرگذاری دیگری نیز موثر است. برای این تحقیق، مقدار ΔV، ΔV_C و ΔV_H به صورت مستقیم بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT-LU برآورد خواهد شد و در نهایت مقدار $\Delta V_{(C,H)}$ با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد.

تحلیل روند در سری‌های زمانی

روند به معنی تغییر در مولفه بسامد کوتاه یک سری زمانی و به بیان ساده‌تر، تغییر میانگین آماری آن در طول زمان می‌باشد (Chandler and Scott., 2011). روش‌های آماری متعددی جهت تحلیل روند سری‌های زمانی ارایه گردیده است. این روش‌ها در دو دسته کلی پارامتری و غیرپارامتری قابل تقسیم‌بندی می‌باشند که دسته دوم از کاربرد وسیع‌تری برخوردار هستند (Kundzewicz and Robson., 2000). چرا که این روش‌ها علاوه بر عدم نیاز به تبعیت داده‌های مورد بررسی از توزیع آماری نرمال، ضعف کم‌تری در مواجهه با نواقص آماری و وجود داده‌های پرت دارند (Cunderlik and Burn., 2004; Xu et al., 2003). البته نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف بررسی روند همواره یکسان نیست و در بسیاری از مطالعات، ترکیبی از آزمون‌های مختلف برای تایید وجود آن در یک سری زمانی استفاده شده است. در همین رابطه توصیه گردیده که وجود روند در یک سری زمانی حداقل توسط دو روش مورد تایید قرار گیرد (Kahya and Kalaycı., 2004). از شاخص‌ترین روش‌های آماری ناپارامتری تحلیل روند می‌توان به آزمون‌های من- کندال و اسپیرمن اشاره نمود (Fathian et al., 2015). روش‌های فوق اگر چه وجود روند در سری‌های زمانی را مشخص می‌نمایند، اما قادر به کمی‌سازی مقدار آن نمی‌باشند که برای این منظور معمولا از روش پارامتری شیب رگرسیون خطی و یا روش ناپارامتری شیب سن[1] استفاده می‌شود (Kundzewicz and Robson., 2000). زمان شروع روند یکی دیگر از ویژگی‌های مهم و در عین حال مبهم بروز تغییرات در سری‌های زمانی می‌باشد (Thanasis et al., 2011). روش‌هایی برای تعیین آن پیشنهاد شده که متداول‌ترین آن‌ها عبارتند از آزمون متوالی من- کندال[2] و آزمون پتی[3] (Kundzewicz and Robson., 2000). با توجه به وجود شرح کافی روش‌های مذکور در مطالعات مشابه، جزییات و روابط مورد استفاده آن‌ها در مقاله حاضر ارایه نمی‌گردد.

روندزدایی سری‌های زمانی

روندزدایی به معنی حذف تغییرات تدریجی و یا سریع قابل مشاهده در سری‌های زمانی می‌باشد. در تحقیق حاضر دو روش برای روندزدایی از سری‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفت. متداول‌ترین روش برای روندزدایی سری زمانی، بر اساس حذف شیب تغییرات با مشخص بودن شیب و زمان شروع این تغییرات مطابق رابطه ۶ می‌باشد (Hamlet and Lettenmaier., 2007):

$$X_{adj\,(i)} = X_{org\,(i)} + S \times (P - i) \qquad (۶)$$

در این رابطه، $X_{adj(i)}$ مقدار اصلاح روندزدایی شده داده اولیه سری زمانی ($X_{org(i)}$) در سال iام پس از سال شروع روند P با مقدار شیب روند برابر با S می‌باشد. چنان‌چه تهیه سری زمانی روندزدایی شده روزانه متغیرهای اقلیمی موردنظر باشد، هملت و لتنمیر پیشنهاد دادند تا سری زمانی روندزدایی شده سالانه با در نظر گرفتن نسبت بین داده‌های روزانه مشاهده شده و داده‌های سالانه اصلی به سری زمانی روزانه تبدیل شود (Hamlet and Lettenmaier., 2007). در این‌صورت علاوه بر حذف روند، خصوصیات اولیه سری زمانی روزانه نیز حفظ می‌شود.

روش دیگری که برای حذف روند در سری‌های زمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، جبران اختلاف میانگین سری زمانی بین دوره‌های قبل و بعد از بروز تغییر می‌باشد. در این روش، مقدار سری زمانی روندزدایی شده بر اساس رابطه ۷ تعیین می‌گردد.

$$X_{adj\,(i)} = X_{org\,(i)} + (\bar{X}_{org\,(1:P)} - \bar{X}_{org\,(P+1:n)}) \qquad (۷)$$

که در آن $X_{adj(i)}$ مقدار اصلاح روندزدایی شده داده اولیه سری زمانی ($X_{org(i)}$) در سال iام پس از سال شروع روند P، $\bar{X}_{org\,(1:P)}$ مقدار متوسط سری زمانی تا سال بروز تغییر، $\bar{X}_{org\,(P+1:n)}$ مقدار متوسط سری زمانی در دوره پس از بروز تغییر و n تعداد کل سال‌های اطلاعاتی موجود برای سری زمانی می‌باشد.

1- Sen's slope

2- Sequential Mann-Kendall

3- Pettitt test

تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی

برآورد ضریب حساسیت مولفه‌های مختلف هیدرولوژیکی نسبت به تغییر در مولفه‌های اقلیمی با استفاده از نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی قابل انجام بوده و در تحقیقات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Jones et al., 2006; Sankarasubramanian et al., 2001; Vano and Lettenmaier., 2014). در این رویکرد، مقدار تغییر در آبدهی (و سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی موردنظر) بر اساس اجرای سناریوهایی از مدل با اعمال درصدهای مشخص تغییر در متغیرهای اقلیمی برآورد شده و ضرایب مذکور تعیین می‌گردد (Vano et al., 2012). چارچوب بررسی تغییرات آبدهی در اثر تغییرات بارش و دما در این روش بصورت رابطه ۸ و ۹تعریف می‌شود (Vano and Lettenmaier., 2014).

$$\varepsilon_V = \frac{\frac{V_{Hist+\Delta P} - V_{Hist}}{V_{Hist}}}{\Delta P} \quad (۸)$$

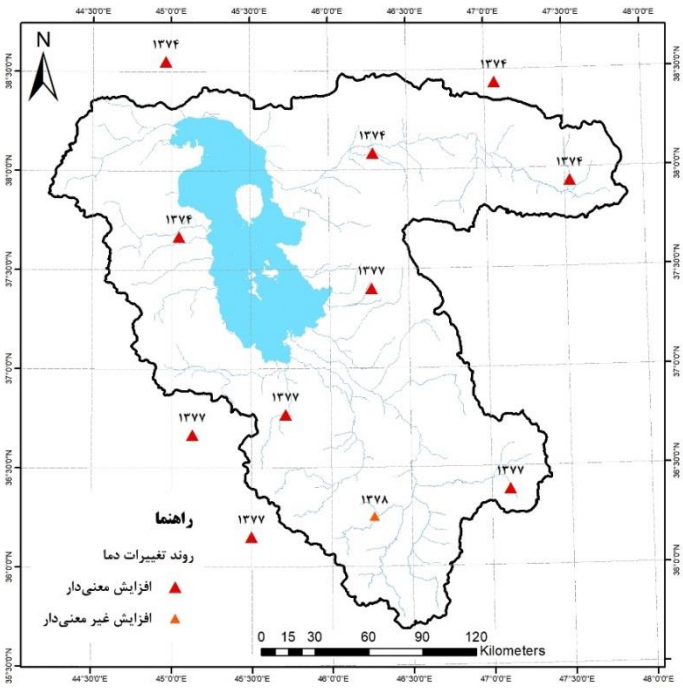
$$S_V = \frac{\frac{V_{Hist+\Delta T} - V_{Hist}}{V_{Hist}}}{\Delta T} \quad (۹)$$

که در این روابط ε_V و S_V حساسیت مولفه موردنظر به ترتیب نسبت به تغییرات بارش و دما، ΔP درصد تغییرات بارش نسبت به شرایط تاریخی، ΔT تغییر دما نسبت به شرایط تاریخی، V_{Hist} مقدار متوسط سالانه بلندمدت مولفه موردنظر در شرایط تاریخی، $V_{Hist+\Delta P}$ مقدار متوسط سالانه بلندمدت مولفه موردنظر در شرایط تغییر ΔP درصدی بارش نسبت به شرایط تاریخی و $V_{Hist+\Delta T}$ مقدار متوسط سالانه بلندمدت مولفه موردنظر در شرایط تغییر ΔT درجه‌ای دما نسبت به شرایط تاریخی می‌باشند. ε نشان دهنده درصد تغییر در متوسط سالانه بلندمدت مولفه موردنظر به ازای یک درصد تغییر در بارش متوسط سالانه بلندمدت حوضه می‌باشد، در حالی‌که S بیانگر درصد تغییر در متوسط بلندمدت سالانه مولفه مورد نظر به ازای یک درجه تغییر در متوسط بلندمدت دمای سالانه حوضه است.

نتایج و بحث

بررسی روند تغییرات اقلیمی

برای بررسی معنی‌دار بودن روند در سری‌های زمانی دما و بارش از دو آزمون من- کندال و اسپیرمن استفاده شد و آزمون پتی نیز برای تعیین زمان بروز تغییر در سری زمانی متغیرهای مذکور استفاده گردید. برای تعیین نرخ تغییرات در این مولفه‌ها نیز از روش شیب سن استفاده شد. تحلیل‌های مذکور در دوره زمانی یکسان سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۸ برای کلیه مولفه‌های مذکور انجام گردید که در ادامه نتایج آن به تفکیک ارایه می‌گردد.



شکل ۳- روند تغییرات مقدار دما در ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه (سال تغییر در بالای هر ایستگاه ذکر شده است)

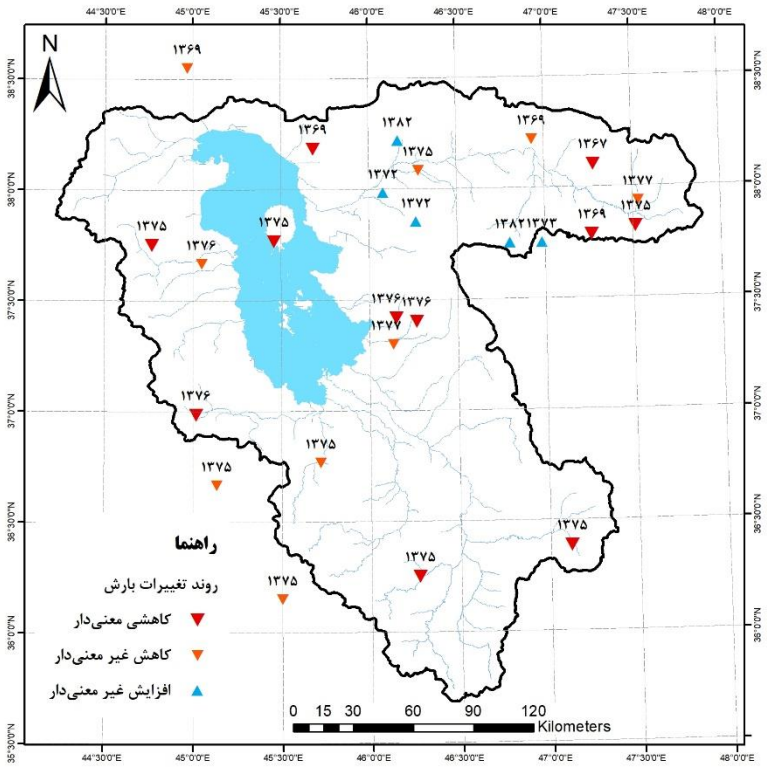
دما

نتیجه تحلیل سری زمانی دمای متوسط سالانه در ایستگاه‌های مختلف سطح حوضه نشان دهنده وجود یک روند افزایشی غالب می‌باشد. آزمون‌های من- کندال و اسپیرمن در تمامی ایستگاه‌ها به

استثنای ایستگاه سقز، موید افزایش معنی‌دار دما در سطح اطمینان ۹۰ درصد می‌باشند (شکل ۳) که با نتایج تحقیق فتحیان و همکاران تطابق دارد (Fathian et al,. 2015). مطابق نتایج آزمون پتی، وقوع معنی‌دار این تغییرات در محدوده سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۷ است. در اکثر ایستگاه‌ها نرخ افزایش دما طی دوره مورد بررسی بین ۰/۴ تا ۰/۷ درجه سلسیوس در هر دهه است.

بارش

بررسی روند تغییرات بارش در ۲۵ ایستگاه در سطح حوضه نشان دهنده (شکل ۴) وجود روند کاهشی معنی‌دار در ۱۱ ایستگاه، کاهش بدون معنی در ۹ ایستگاه و افزایش بدون معنی در ۵ ایستگاه دیگر است. آزمون پتی نیز تغییر معنی‌دار بارش را در تعداد بیش‌تری از ایستگاه‌ها (۱۴ ایستگاه کاهشی و یک ایستگاه افزایشی) نشان می‌دهد و مانند قبل، زمان وقوع این تغییرات را عمدتاً در اواسط و اواخر دهه ۱۳۷۰ گزارش می‌نماید. لازم به ذکر است که علی‌رغم کاهش قابل‌توجه مقدار بارش در برخی از ایستگاه‌ها (نظیر ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و خوی به ترتیب با ۲۴، ۱۸ و ۲۴ درصد کاهش)، روند تغییرات آن‌ها توسط آزمون‌های من- کندال و اسپیرمن در سطح اطمینان ۹۰ درصد، معنی‌دار تشخیص داده نشد، در حالی‌که روند کاهش بارش در همین ایستگاه‌ها در برخی از مطالعات مشابه توسط آزمون‌های مذکور معنی‌دار گزارش شده است (Shifte-Some'e et al., 2012; Soltani et al., 2012) که دلیل این امر را می‌توان به تفاوت دوره آماری مورد استفاده در تحلیل‌ها مرتبط دانست.



شکل ٤- روند تغییرات و سال وقوع تغییر در مقدار بارش در سطح حوضه دریاچه ارومیه

روندزدایی سری‌های زمانی دما و بارش

روندزدایی داده‌های اقلیمی به دو روش حذف شیب روند و یا اضافه و کم نمودن مقدار مشخصی به سری زمانی، نیازمند آگاهی از زمان وقوع تغییرات در سری می‌باشد. بدیهی است که در روش‌های آماری، ناهنجاری‌های طبیعی اقلیمی نظیر ترسالی‌ها و خشک-سالی‌های شدید می‌توانند در جابجا نمودن زمان برآورد شده برای بروز تغییرات، اثرگذار باشند که خود بخشی از محدودیت آن‌ها است. با توجه به بروز خشک‌سالی بلندمدت و کم‌نظیر بین سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۰ در کل کشور و حتی منطقه (مرید و عرب، ۱۳۸۵)، پیش‌بینی می‌شد زمان تغییر به دست آمده در تحلیل‌های آماری به شدت تحت تأثیر این پدیده مقطعی قرار گرفته باشد.بنابراین در این تحقیق تلاش شد با توجه به تحلیل‌های قبلی (نتایج آزمون پتی)، سه مقطع زمانی ۱۳۷۴، ۱۳۷۷ و ۱۳۸۰ به عنوان زمان وقوع تغییرات در شرایط هیدرواقلیمی حوضه در نظر گرفته شد و سری‌های زمانی روندزدایی شده با فرض این سه زمان برای وقوع تغییرات بازسازی گردید. در نهایت انتخاب سری‌های زمانی اقلیمی معرف شرایط عدم وقوع

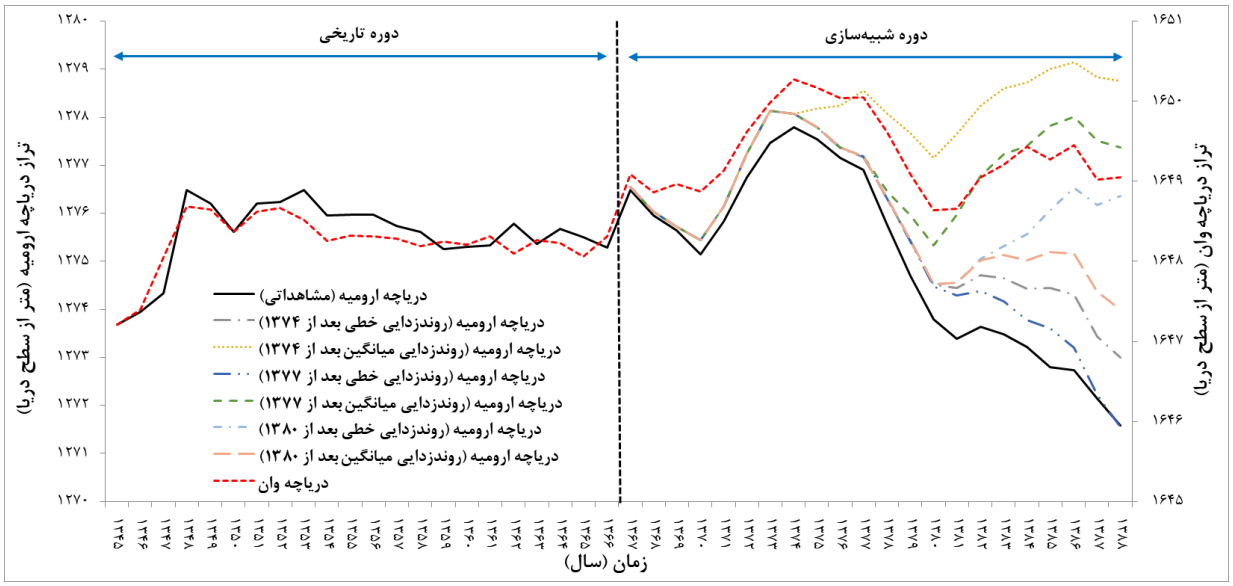
تغییرات اقلیمی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر مبنای دو روش، شامل حفظ مناسب همبستگی تاریخی بین تراز آب دریاچه‌های وان و ارومیه و هم‌چنین تحلیل پایداری دریاچه در شرایط وقوع تصادفی الگوهای اقلیمی بر اساس تحلیل مونت کارلو انجام شد که در ادامه تشریح می‌گردد.

مقایسه با دریاچه وان

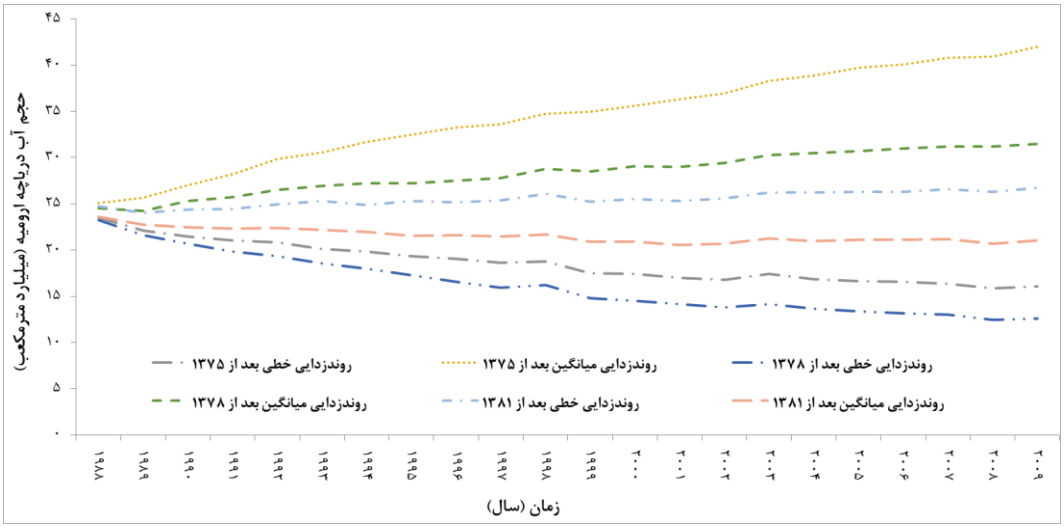
دریاچه وان در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری دریاچه ارومیه قرار گرفته و بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد تغییر خاصی در بیلان آبی آن طی سال‌های اخیر اتفاق نیفتاده است. جلیلی و همکاران (۱۳۹۱) در مقایسه سری زمانی تراز آب دریاچه‌های وان و ارومیه بر اساس تحلیل‌های طیفی نشان دادند که تغییرات تراز آب این دریاچه‌ها تا پیش از سال ۱۳۷۹ در مقیاس‌های زمانی درون‌سالی و بین سالی با یکدیگر ارتباط قوی دارند، در حالی‌که پس از آن ارتباطی بین تغییرات آن‌ها مشاهده نمی‌شود. از این رو، این تحقیق با چنین فرضی از سری زمانی تراز دریاچه وان استفاده می‌کند. چنان‌چه شرایط اقلیمی و مدیریتی حوضه دریاچه ارومیه تغییر نمی‌کرد، می‌بایست نوسانات تراز آب دو دریاچه مانند قبل در هماهنگی می‌بود. بنابراین مبدا زمانی (تغییر معنی‌دار در سری زمانی‌های دما و بارش) و روش روندزدایی از سری‌های دما و بارش معرف حذف تغییرات اقلیمی خواهد بود که کاربرد آن در اجرای مدل SWAT-LU با ثابت نگه‌داشتن کاربری اراضی حوضه مطابق آن‌چه تا سال ۱۳۶۶ وجود داشت، بیش‌ترین همبستگی بین تراز آب شبیه‌سازی شده دریاچه ارومیه (توسط مدل) و تراز آب مشاهداتی دریاچه وان را موجب گردد. بر این اساس، مدل SWAT-LU در شرایط کاربری اراضی سال ۱۳۶۶ (بدون تغییرات انسانی اخیر) و استفاده از ۶ سری زمانی روندزدایی شده (شامل دو روش روندزدایی و سه زمان شروع روند) اجرا شد.

جدول ۲- همبستگی تراز سالانه دریاچه‌های ارومیه و وان در شرایط مشاهداتی تاریخی و شبیه‌سازی‌های انجام شده مدل SWAT-LU

دوره زمانی	نوع داده	روش روندزدایی	زمان تغییر	R^2
۱۳۴۵-۱۳۶۶	مشاهداتی	--------	--------	۰/۸۱
۱۳۶۷-۱۳۸۸	مشاهداتی	--------	--------	۰/۴۱
۱۳۶۷-۱۳۸۸	شبیه‌سازی	خطی	۱۳۷۴	۰/۵۴
۱۳۶۷-۱۳۸۸	شبیه‌سازی	میانگین	۱۳۷۴	۰/۱۷
۱۳۶۷-۱۳۸۸	شبیه‌سازی	خطی	۱۳۷۷	۰/۴۱
۱۳۶۷-۱۳۸۸	شبیه‌سازی	میانگین	۱۳۷۷	۰/۵۲
۱۳۶۷-۱۳۸۸	شبیه‌سازی	خطی	۱۳۸۰	۰/۸۲
۱۳۶۷-۱۳۸۸	شبیه‌سازی	میانگین	۱۳۸۰	۰/۷۶



شکل ۵- سری زمانی شبیه‌سازی تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل SWAT-LU و داده‌های اقلیمی روندزدایی شده به روش‌های مختلف و مقایسه آن با تراز آب مشاهداتی دریاچه وان



شکل ٦- سری زمانی متوسط حجم آب دریاچه ارومیه در ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مدل SWAT-LU بر اساس توالی تصادفی سالانه داده‌های اقلیمی روندزدایی شده طبق روش‌های مختلف

سپس سری زمانی تراز آب دریاچه ارومیه در هر یک از سناریوها استخراج و با سری زمانی تراز آب دریاچه وان مقایسه شد که نتایج در جدول ۲ و شکل ۵ قابل مشاهده هستند. این بررسی نشان می‌دهد، روندزدایی داده‌های اقلیمی با استفاده از روش حذف شیب با شروع تغییر پس از سال ۱۳۸۰ نزدیک‌ترین مقدار ضریب همبستگی را بین تراز آب دو دریاچه در دوره شبیه‌سازی نسبت به دوره تاریخی به بدست می‌دهد.

تحلیل پایداری دریاچه

بررسی دیگری که برای ارزیابی روش و مبدا زمانی روندزدایی سری‌های زمانی اقلیمی حوضه به کار گرفته شد، بر این مبنا بود، چنان‌چه شرایط اقلیمی و انسانی تغییر عمده‌ای نداشته باشد، انتظار می‌رود جابجایی تصادفی سالانه داده‌های اقلیمی در قالب تحلیل مونت کارلو به تثبیت شرایط دریاچه در وضعیت نزدیک به متوسط تاریخی آن منجر گردد. رویکرد مشابهی در تحقیقات دلاور و همکاران (۱۳۸۷) و کبده برای تعیین حق‌آبه مورد نیاز برای پایدارسازی دریاچه‌های ارومیه و تانا[1] مورد استفاده قرار گرفت (Kebede., 2006).

در استفاده از این رویکرد، برای هر یک از سری‌های زمانی روندزدایی شده بر اساس روش‌ها و زمان‌های مختلف شروع تغییر، تعداد ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مدل SWAT-LU بر اساس قرارگیری تصادفی اطلاعات اقلیمی سال‌های مختلف دوره مورد بررسی (۱۳۸۸-۱۳۶۷) و در شرایط کاربری اراضی ثابت سال ۱۳۶۶ انجام شد. شکل ۶ مقایسه متوسط ۱۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شده از حجم آب دریاچه ارومیه را برای سری‌های زمانی تولید شده بر اساس بکارگیری مبدا و روش‌های مختلف روندزدایی نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل نیز نشان داد، روندزدایی داده‌های اقلیمی بر اساس روش حذف شیب خطی و شروع آن پس از سال ۱۳۸۰ موجب تعادل نسبی در شرایط دریاچه ارومیه شد (شروع و پایان سری زمانی متوسط شبیه‌سازی شده حجم آب دریاچه ارومیه در این سناریو تقریبا تغییری نداشته است). با توجه به تایید نتیجه رویکرد قبلی توسط این روش، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده از روش حذف شیب خطی با شروع تغییر پس از سال ۱۳۸۰ بهترین شیوه روندزدایی اطلاعات اقلیمی می‌باشد. بنابراین در ادامه این تحقیق، بررسی اثر روندهای اقلیمی بر تغییر شرایط دریاچه ارومیه بر مبنای سری‌های زمانی مذکور انجام خواهد شد.

تفکیک اثر عوامل

نقطه قوت روش‌شناسی مورد استفاده تحقیق حاضر در این بخش نسبت به سایر تحقیقات مشابه، عدم نیاز به تقسیم نمودن دوره تحلیل به دو دوره قبل و بعد از تغییرات می‌باشد. چرا که در توسعه مدل SWAT-LU برای شبیه‌سازی شرایط حوضه آبریز دریاچه ارومیه، تغییرات انسانی به وقوع پیوسته در طول زمان لحاظ گردیده و واسنجی مدل نیز با اعمال آن انجام شده است. بنابراین برای برآورد V_H تنها لازم است تا به‌هنگام‌سازی شرایط کاربری اراضی از مدل حذف و وضعیت آن در شبیه‌سازی مدل در شرایط اولیه ثابت باشد. اما برای برآورد V_C لازم است تا از سری‌های زمانی اقلیمی روندزدایی شده به جای مقادیر مشاهداتی آن‌ها در شبیه‌سازی استفاده گردد که در بخش قبل سری‌های مذکور شناسایی گردید. برای تعیین $V_{C,H}$ نیز

1- Lake Tana

ترکیب موارد فوق در اجرای مدل به کار گرفته شد. لازم به ذکر است V_B نیز همان خروجی‌های مدل در شرایط پایه (مدل واسنجی شده اولیه) می‌باشد. بنابراین برای تفکیک اثر عوامل اقلیمی بر تغییر یک مولفه هیدرولوژیکی تنها لازم است مقدار مولفه مربوط از نتایج ۴ سناریوی فوق استخراج و مورد ارزیابی قرار گیرند. بر این اساس، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و دریاچه به تغییرات شرایط اقلیمی و انسانی با استفاده از مدل SWAT-LU، به صورت زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

سناریوی ۱) اجرای مدل در شرایط تغییرات کاربری اراضی و اقلیمی (اجرای پایه مدل)؛

سناریوی ۲) برآورد اثر منفرد عامل اقلیمی بر مبنای اجرای مدل با سری‌های زمانی روندزدایی شده دما و بارش و کاربری اراضی متغیر (شرایط پایه کاربری اراضی)؛

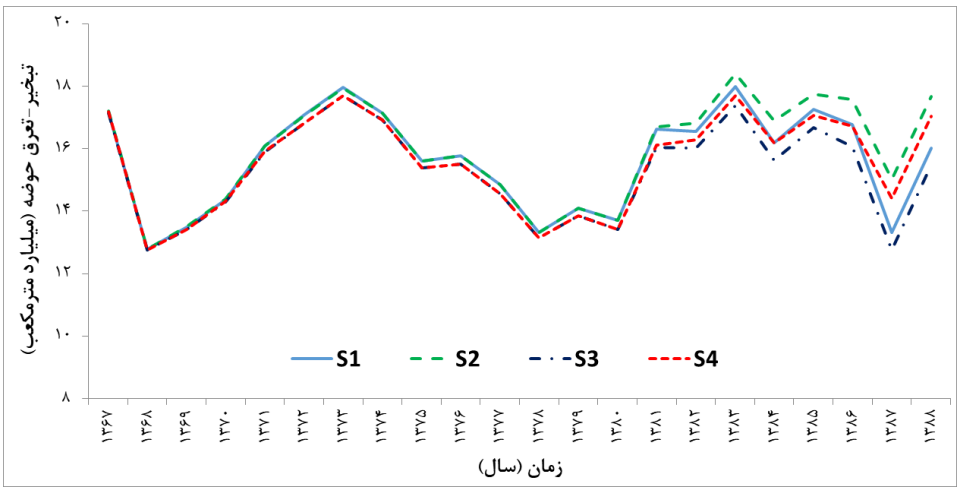
سناریوی ۳) برآورد نقش منفرد عامل انسانی بر مبنای اجرای مدل در شرایط ثابت بودن کاربری اراضی در وضعیت سال ۱۳۶۶ (از ابتدای اجرای مدل) و استفاده از سری‌های زمانی مشاهداتی بارش و دما (شرایط پایه اقلیمی؛ توضیح این‌که، سناریو شامل برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی بوده برای مصارف آبیاری متناسب با وسعت اراضی فاریاب می‌باشد، اثر تغییر کاربری اراضی در آن‌ها به صورت مستقیم (تغییر حجم برداشت آب به منظور آبیاری اراضی به دلیل تغییر سطح آن‌ها) و غیرمستقیم (شامل تغییر شرایط آبدهی و تبخیر و تعرق اراضی به دلیل تغییر وضعیت کاربری آن‌ها) بر تغییر مولفه‌های هیدرولوژیکی حوضه و دریاچه در آن قابل مشاهده است. هم‌چنین در این سناریو، سدهایی که در خلال دوره شبیه‌سازی به بهره‌برداری رسیده‌اند نیز در نظر گرفته نشده‌اند)؛

سناریوی ٤) برآورد نقش توام عوامل انسانی و اقلیمی بر مبنای اجرای مدل در شرایط ثابت بودن کاربری اراضی در وضعیت سال ۱۳۶۶ (از ابتدای اجرای مدل) و استفاده از سری‌های زمانی روندزدایی شده بارش و دما.

با شرحی که در بالا ذکر گردید، اثر تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییر طیف متنوعی از مولفه‌های هیدرولوژیکی حوضه و دریاچه انجام شد که برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله، در ادامه نتایج مربوط به مهم‌ترین مولفه‌ها، شامل تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوضه، جریان ورودی به دریاچه و حجم آب آن ارایه گردید.

تبخیر و تعرق حوضه

حجم تبخیر و تعرق سالانه حوضه دریاچه ارومیه برای سناریوهای مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است. متوسط سالانه تبخیر و تعرق حوضه در کل دوره زمانی بررسی (۱۳۸۸-۱۳۶۷) برابر با ۱۵/۱۷ میلیارد مترمکعب بوده (سناریوی ۱) که در صورت حذف تغییرات کاربری اراضی و استفاده از داده‌های اقلیمی روندزدایی شده (سناریوی ۴) به ۱۵/۰۲ میلیارد مترمکعب کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که تغییر شرایط اقلیمی و انسانی در مجموع موجب افزایش متوسط سالانه تبخیر و تعرق حوضه طی این دوره به میزان ۰/۱۵ میلیارد مترمکعب شده است. از سوی دیگر، متوسط سالانه تبخیر و تعرق حوضه در شرایط حذف تغییرات اقلیمی و انسانی (سناریوهای ۲ و ۳) به ترتیب برابر با ۱۵/۴۵ و ۱۴/۷۸ میلیارد مترمکعب می‌باشد. بدین ترتیب عوامل اقلیمی طی دوره زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۸ به طور متوسط منجر به کاهش ۰/۲۸ میلیارد مترمکعبی تبخیر و تعرق و تغییرات انسانی در همین دوره منجر به افزایش ۰/۳۹ میلیارد مترمکعب آن گردیده است.



شکل ۷- حجم سالانه کل تبخیر و تعرق حوضه دریاچه ارومیه در سناریوهای مختلف مدل SWAT-LU

جدول ۳- نتایج تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی در تغییر تبخیر و تعرق در سطح حوضه دریاچه ارومیه در کل دوره زمانی مورد بررسی (۱۳۸۸-۱۳۶۷) و نیمه دوم این دوره (۱۳۸۸-۱۳۷۸)

شماره سناریو	شرح سناریو	شرایط شبیه‌سازی		۱۳۸۸-۱۳۶۷		۱۳۸۸-۱۳۷۸	
		کاربری اراضی	داده‌های اقلیمی	تبخیر و تعرق حوضه (Bcm)	تغییر (Δ) نسبت به شرایط پایه (Bcm)	تبخیر و تعرق حوضه (Bcm)	تغییر (Δ) نسبت به شرایط پایه (Bcm)
۱	پایه (ET_B)	متغیر	مشاهداتی	۱۵/۱۷	---	۱۵/۰۵	---
۲	حذف عامل اقلیمی (ET_C)	متغیر	روندزدایی	۱۵/۴۵	-۰/۲۸	۱۵/۶۲	-۰/۵۷
۳	حذف عامل انسانی (ET_H)	ثابت ۱۳۶۶	مشاهداتی	۱۴/۷۸	۰/۳۹	۱۴/۴۶	۰/۵۹
۴	حذف هر دو (ET)	ثابت ۱۳۶۶	روندزدایی	۱۵/۰۲	۰/۱۵	۱۴/۹۴	۰/۱۱
-	اثر اندرکنش عوامل اقلیمی و انسانی ($ET_{C,H}$)			---	۰/۰۴	---	۰/۰۹

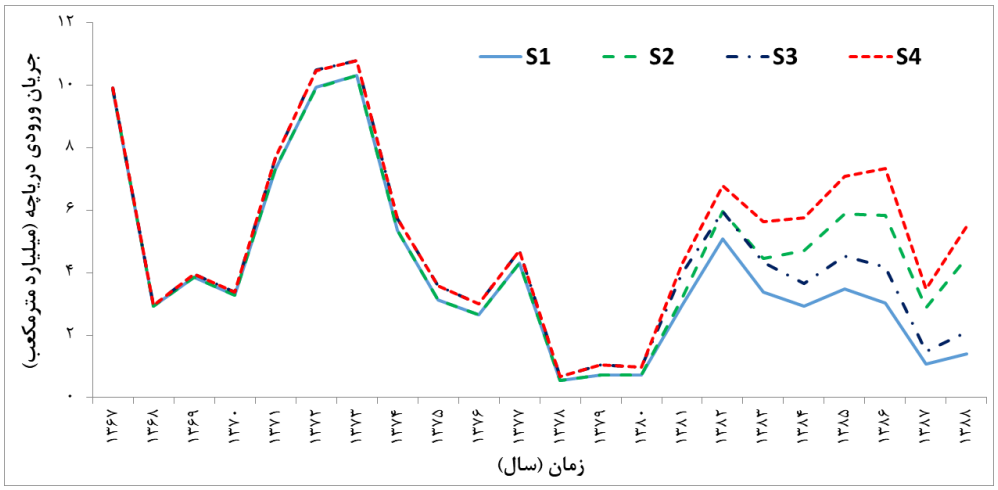
بنابراین علی‌رغم کاهش متوسط تبخیر و تعرق تحت تأثیر عوامل اقلیمی (برآیند کاهش بارش و افزایش دما)، فعالیت‌های انسانی و توسعه اراضی زیر کشت موجب گردیده تا نه تنها کاهش مذکور جبران گردد، بلکه مقداری افزایش نیز در تبخیر و تعرق حوضه به وجود آید. اثر متقابل تغییر شرایط اقلیمی و انسانی بر تغییرات تبخیر و تعرق حوضه نیز موجب افزایش ۰/۰۴ میلیارد مترمکعبی آن بوده است. برای دوره زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۸ نیز تغییرات اقلیمی و انسانی مجموعا منجر به افزایش تبخیر و تعرق حوضه به میزان ۰/۰۹ میلیارد مترمکعب شده‌اند. در این بین، تغییرات اقلیمی موجب کاهش ۰/۵۷ میلیارد مترمکعب تبخیر و تعرق و عوامل انسانی موجب افزایش ۰/۵۹ میلیارد مترمکعبی آن بوده‌اند.

جریان‌های ورودی به دریاچه

شکل شماره ۸ میزان کل جریان سالانه ورودی به دریاچه ارومیه در سناریوهای موردنظر را نشان می‌دهد. بر این اساس، متوسط سالانه حجم جریان ورودی به دریاچه در اجرای پایه مدل (سناریوی شماره ۱) برای کل دوره زمانی بررسی (۱۳۸۸-۱۳۶۷) برابر با ۴/۰۱ میلیارد مترمکعب بوده که نتیجه شبیه‌سازی مدل در حالت عدم بروز تغییرات در شرایط اقلیمی و کاربری اراضی (سناریوس شماره ۴) مقدار ۵/۳۷ میلیارد مترمکعب را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که متوسط اثر تغییر شرایط محیطی بر جریان ورودی به دریاچه طی این دوره در حدود ۱/۳۶- میلیارد مترمکعب بوده است. از سوی دیگر، متوسط حجم سالانه جریان ورودی به دریاچه در شرایط حذف منفرد تغییرات عوامل اقلیمی و انسانی (سناریوهای ۲ و ۳) به ترتیب برابر با ۴/۶۰ و ۴/۶۸ میلیارد مترمکعب می‌باشد. بدین ترتیب اثر منفرد عوامل اقلیمی و انسانی بر کاهش جریان ورودی به دریاچه در این دوره زمانی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۹- (۴۳/۴ درصد) و ۰/۶۷- (۴۹/۳ درصد) میلیارد مترمکعب بود و ۰/۱ میلیارد مترمکعب (۷/۳ درصد) از این کاهش نیز به اثر ترکیبی دو عامل مربوط می‌باشد. چنان‌چه این تحلیل برای نیمه دوم دوره مورد بررسی صورت گیرد، سهم عوامل اقلیمی و انسانی و ترکیب آن‌ها در کاهش جریان‌های وردی دریاچه به‌ترتیب برابر با ۱/۱۹، ۰/۹۹ و ۰/۱۹ میلیارد مترمکعب (به ترتیب ۵۰/۲، ۴۱/۸ و ۸ درصد تغییرات) به دست می‌آید که نشان دهنده افزایش اثر نقش عامل اقلیمی در این دوره می‌باشد. خلاصه نتایج تحلیل‌های این بخش در جدول ۴ آمده است.

حجم آب دریاچه

این قسمت بطور مستقیم‌تری به پاسخ‌گویی در خصوص سوال اصلی تحقیق حاضر می‌پردازد که همان تعیین سهم عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییر سیمای دریاچه ارومیه بود. حجم آب دریاچه ارومیه برای سناریوهای مورد نظر در شکل ۹ آمده و خلاصه محاسبات مربوط به این بخش در جدول ۵ ارایه شده است. با توجه به این‌که حجم آب دریاچه در شروع سال ۱۳۶۷ حدود ۱۹/۲ میلیارد مترمکعب بوده است، نتایج نشان می‌دهد در صورت حذف روندهای اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی و حذف هر دو در شبیه‌سازی مدل، تغییر حجم آب دریاچه در پایان دوره بررسی (انتهای ۱۳۸۸) نسبت به شروع آن به ترتیب برابر با ۴/۷۳-، ۸/۰۵- و ۵/۱۷ میلیارد مترمکعب خواهد بود. از مقایسه این مقادیر با تغییر حجم آب دریاچه در انتهای دوره شبیه‌سازی نسبت به شروع دوره در شرایط پایه (۱۴/۱۲- میلیارد مترمکعب) نتیجه‌گیری می‌شود که اثر روندهای اقلیمی و تغییر کاربری اراضی بر کاهش حجم آب دریاچه به ترتیب برابر با ۹/۳۹ (۴۸/۷ درصد) و ۶/۰۷ (۳۱/۵ درصد) میلیارد مترمکعب بوده است. برای نیمه دوم دوره زمانی مورد بررسی (۱۳۸۸-۱۳۷۸) نیز بر اساس تحلیل مشابه، اثر تغییرات اقلیمی و انسانی بر کاهش حجم آب دریاچه به‌ترتیب برابر با ۹/۳۸ (۵۷/۸ درصد) و ۳/۰۲ (۱۸/۶ درصد) میلیارد مترمکعب می‌باشد.



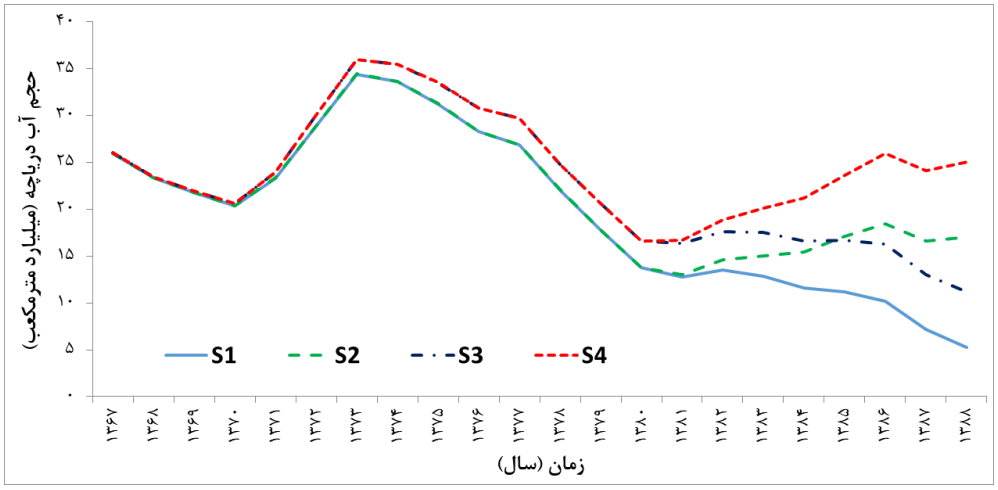
شکل ۸- حجم سالانه جریان ورودی به دریاچه ارومیه در سناریوهای مختلف مدل SWAT-LU

جدول ٤- نتایج تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی در تغییر جریان ورودی دریاچه ارومیه در کل دوره زمانی مورد بررسی (۱۳۸۸-۱۳٦۷) و نیمه دوم این دوره (۱۳۸۸-۱۳۷۸)

شماره سناریو	شرح سناریو	شرایط شبیه‌سازی		۱۳۸۸-۱۳٦۷		۱۳۸۸-۱۳۷۸	
		کاربری اراضی	داده‌های اقلیمی	حجم جریان ورودی دریاچه (Bcm)	تغییر (Δ) نسبت به شرایط پایه (Bcm)	حجم جریان ورودی دریاچه (Bcm)	تغییر (Δ) نسبت به شرایط پایه (Bcm)
۱	پایه (Q_B)	متغیر	مشاهداتی	۴/۰۱	---	۲/۱۱	---
۲	حذف عامل اقلیمی (Q_C)	متغیر	روندزدایی	۴/۶۰	-۰/۵۹	۳/۳۰	-۱/۱۹
۳	حذف عامل انسانی (Q_H)	ثابت ۱۹۸۷	مشاهداتی	۴/۶۸	-۰/۶۷	۳/۱۰	-۰/۹۹
۴	حذف هر دو (Q)	ثابت ۱۹۸۷	روندزدایی	۵/۳۷	-۱/۳۶	۴/۴۸	-۲/۳۷
-	اثر اندرکنش عوامل اقلیمی و انسانی ($Q_{C,H}$)			---	-۰/۱۰	---	-۰/۱۹

نتایج فوق نشان می‌دهد، اثر ترکیبی عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات حجم آب دریاچه ارومیه به مراتب نقش بزرگ‌تری از مولفه‌های جزیی بیلان آب دریاچه (جریان ورودی، تبخیر و بارش) ایفا می‌نماید. به نحوی که موجب کاهش ۳/۸۳ و ۳/۸۲ میلیارد مترمکعب (معادل ۱۹/۸ و ۲۳/۶ درصد تغییرات) این مولفه به ترتیب در کل دوره مورد بررسی و نیمه دوم آن گردیده است. دلیل این امر، ماهیت تجمعی مولفه حجم آب دریاچه و وجود حافظه زمانی بلندمدت در آن می‌باشد. به عنوان مثال، چنان‌چه اثر ترکیبی حجم جریان ورودی به دریاچه موجب کاهش جزیی آن گردد، اثر این کاهش جزیی به دلیل تجمیع در مولفه حجم آب مخزن در طول زمان، منجر به تشدید اثر آن می‌گردد. با توجه به اثر ترکیبی عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییرات اجزا بیلان آبی دریاچه (شامل تبخیر، بارش و جریان ورودی آن)، به دلیل منفی بودن مجموع این مولفه‌ها و ظهور تلفیقی اثر آن‌ها در حجم دریاچه، اثر ترکیبی عوامل انسانی و اقلیمی بر تغییر حجم آب دریاچه زیاد بوده و موجب کاهش قابل توجه حجم آب دریاچه گردیده است.

نکته قابل توجه که از مقایسه جدول ۶ و ۷ بدست می‌آید، تفاوت نقش عوامل اقلیمی و انسانی در کاهش ورودی‌ها و حجم موجود در دریاچه است. به عنوان مثال برای دوره اول این دو عامل به ترتیب ۴۳/۴ و ۴۹/۳ درصد برای تغییرات در ورودی‌ها هستند (نقش موثرتر عامل انسانی). ولی برای حجم دریاچه، عامل اقلیمی و انسانی به ترتیب ۴۸/۷ و ۳۱/۵ درصد می‌گردند. همین روند برای دوره دوم نیز با شدت بیش‌تری قابل ملاحظه است. دلیل این امر، وابستگی بیش‌تر تغییرات حجم آب دریاچه به شرایط هیدرولوژیکی در زمان‌های نزدیک‌تر به پایان دوره تحلیل می‌باشد. به همین دلیل، اثر تغییرات اقلیمی که در نیمه دوم دوره تحلیل نمود پیدا کرده با شدت بیش‌تری بر حجم نهایی آب دریاچه و تغییرات آن نسبت به زمان شروع بررسی اثرگذار بوده است.



شکل ۹- حجم سالانه حجم آب دریاچه ارومیه در پایان هر سال در شبیه‌سازی‌های مدل SWAT-LU بر اساس شرایط مختلف کاربری اراضی و داده‌های اقلیمی مشاهداتی و روندزدایی شده

جدول ۵- نتایج تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی در تغییر حجم آب دریاچه ارومیه در کل دوره زمانی مورد بررسی (۱۳۸۸-۱۳۶۷) و نیمه دوم این دوره (۱۳۸۸-۱۳۷۸)

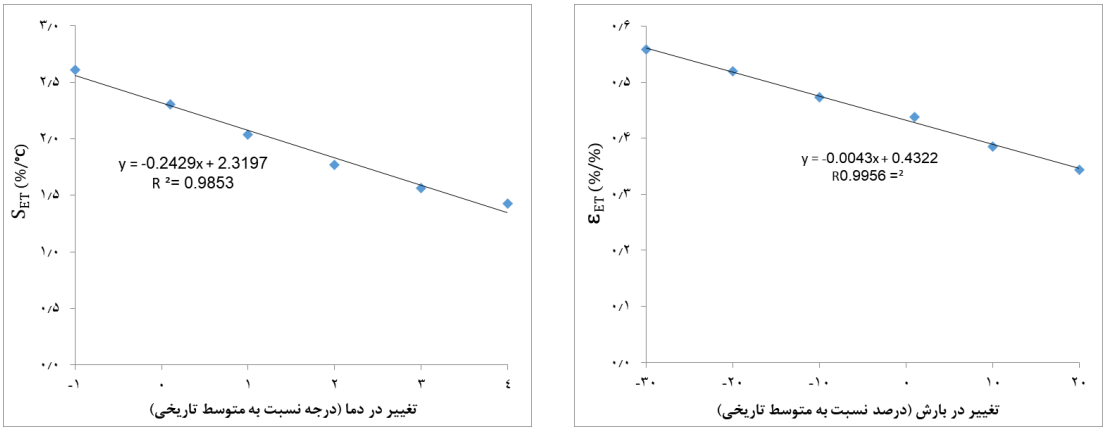
شماره سناریو	شرح سناریو	شرایط شبیه‌سازی		۱۳۸۸-۱۳۶۷		۱۳۸۸-۱۳۷۸	
		کاربری اراضی	داده‌های اقلیمی	تغییر حجم دریاچه نسبت به شروع (Bcm)	تغییر (Δ) نسبت به شرایط پایه (Bcm)	تغییر حجم دریاچه نسبت به شروع (Bcm)	تغییر (Δ) نسبت به شرایط پایه (Bcm)
۱	پایه (V_B)	متغیر	مشاهداتی	-۱۴/۱۲	---	-۲۱/۷۹	---
۲	حذف عامل اقلیمی (V_C)	متغیر	روندزدایی	-۴/۷۳	-۹/۳۹	-۱۲/۴۱	-۹/۳۹
۳	حذف عامل انسانی (V_H)	ثابت ۱۹۸۷	مشاهداتی	-۸/۰۵	-۶/۰۷	-۱۸/۷۷	-۳/۰۲
۴	حذف هر دو (V)	ثابت ۱۹۸۷	روندزدایی	۵/۱۷	-۱۹/۲۹	-۵/۵۶	-۱۶/۲۳
-	اثر اندرکنش عوامل اقلیمی و انسانی ($V_{C,H}$)			---	-۳/۸۳	---	-۳/۸۲

تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی

در این بخش، حساسیت مولفه‌های هیدرولوژیکی مختلف حوضه نسبت به تغییرات دما و بارش بر مبنای مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه گردید. این رویکرد در تحقیق وانو و لتنمیر نیز مورد توجه است (Vano and Lettenmaier., 2014). حساسیت یک مولفه هیدرولوژیکی نسبت به تغییرات بارش (ε_V) نشان دهنده درصد تغییر به ازای یک درصد تغییر در بارش متوسط سالانه بلندمدت حوضه می‌باشد به همین ترتیب، حساسیت مولفه هیدرولوژیکی موردنظر به تغییرات دما (S_V) مبین درصد تغییر در متوسط سالانه بلندمدت مولفه موردنظر به ازای یک درجه تغییر در متوسط بلندمدت دمای سالانه حوضه است. به منظور محاسبه ε، ۶ اجرای مختلف مدل SWAT-LU با تغییر ۲۰، ۱۰، ۱، ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- درصد در سری زمانی بارش مشاهداتی انجام شد و مقدار متغیرهای هیدرولوژیکی خروجی آن‌ها استخراج گردید. در نهایت بر اساس این مقادیر، ε محاسبه گردید. به همین ترتیب ۶ اجرای مدل برای ۱-، ۰/۱-، ۱، ۲، ۳ و ۴ درجه تغییر در سری زمانی دمای مشاهداتی حوضه صورت گرفت و بر اساس خروجی‌های بدست آمده، مقدار S برای مولفه‌های موردنظر تعیین شد. مجددا مانند بخش قبل، این مقادیر برای مولفه‌های مختلف هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه استخراج گردید که در ادامه مهم‌ترین آن‌ها ارایه می‌گردد.

تبخیر و تعرق حوضه

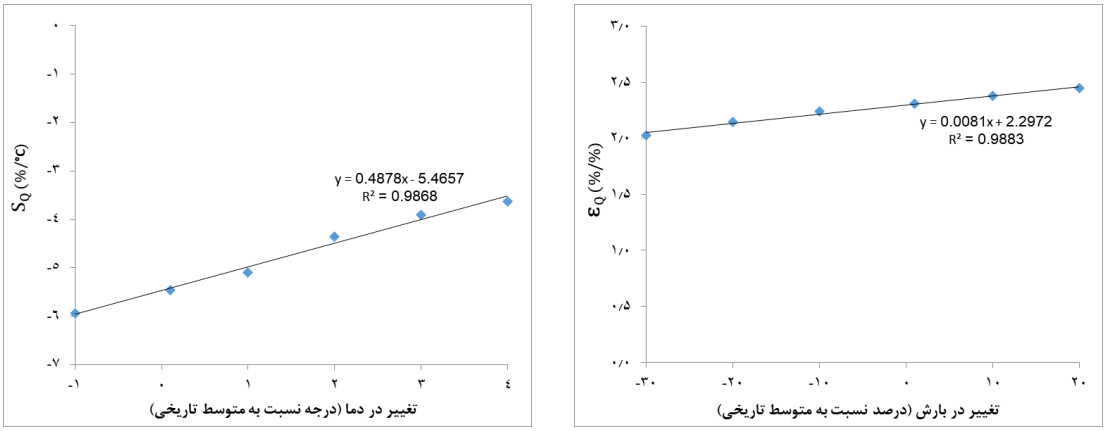
تبخیر – تعرق واقعی در سطح حوضه برای شرایط تغییرات دما و بارش از سناریوهای اجرا شده در بخش قبلی استخراج و تابع تغییرات S و ε در برابر تغییرات دما و بارش برای آن تهیه گردید (شکل ۱۰). این نتایج نشان می‌دهد به ازای ۱۰ درصد کاهش متوسط بلندمدت بارش در سطح حوضه، مقدار تبخیر – تعرق حوضه حدود ۴/۸ درصد کاهش می‌یابد. به ازای یک درجه افزایش دمای متوسط حوضه نیز مقدار تبخیر – تعرق واقعی آن در حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در این خصوص، کاهش حساسیت مولفه تبخیر – تعرق حوضه نسبت به افزایش در مقدار متوسط بلندمدت دما و بارش می‌باشد. به عبارت دیگر، با کاهش بیش‌تر بارش در سطح حوضه، نرخ تغییرات تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد، حال آن‌که در وضعیت افزایش دمای حوضه، نرخ تغییرات تبخیر و تعرق کاهش نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت مولفه تبخیر و تعرق حوضه آبریز دریاچه ارومیه، حساسیت بیش‌تری نسبت به کاهش بارش نشان می‌دهد و مقدار کاهش آن در این شرایط تصاعدی می‌باشد.



شکل ۱۰- حساسیت تبخیر - تعرق حوضه آبریز دریاچه ارومیه نسبت به تغییرات بارش (راست) و تغییرات دما (چپ)

آبدهی حوضه

مقادیر ε_Q و S_Q برای مولفه آبدهی خالص حوضه به ازای تغییرات بارش و دما در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت چنان‌چه به عنوان مثال، مقدار بارش متوسط سالانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۲۰ درصد کاهش یابد، مقدار رواناب تولیدی در سطح حوضه در حدود ۴۲/۹ درصد کاهش می‌یابد. به همین ترتیب چنان‌چه دمای متوسط سالانه یک درجه افزایش یابد، کاهش تولید رواناب حوضه در اثر آن در حدود ۵/۱ درصد خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهد یک کاهش نه چندان قابل‌توجه در شرایط بارش حوضه می‌تواند اثرات بسیار قابل ملاحظه‌ای بر آبدهی حوضه و در نتیجه میزان جریان ورودی به دریاچه ارومیه داشته باشد.



شکل ۱۱- حساسیت آبدهی حوضه آبریز دریاچه ارومیه نسبت به تغییرات بارش (راست) و تغییرات دما (چپ)

از طرف دیگر، مقدار حساسیت آبدهی نسبت به تغییرات دما و بارش ثابت نیست. با کاهش بیش‌تر بارش نسبت به شرایط بلندمدت، نرخ تغییرات آبدهی نسبت به آن اندکی کاهش می‌یابد که همین شرایط برای نرخ افزایش دمای متوسط سالانه نیز مشاهده می‌شود. نتیجه مشابهی در بررسی انجام شده توسط وانو و لتنمیر برای حوضه رودخانه کلرادو، گزارش شده است (Vano and Lettenmaier., 2014).

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف تفکیک سهم عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییرات مولفه‌های اصلی بیلان آب دریاچه ارومیه و حوضه آبریز آن انجام شد. بدین منظور از نتایج سناریوسازی حذف تغییرات هر یک از این عوامل در ورودی‌های مدل SWAT-LU استفاده گردید که در مقایسه با شرایط پایه مدل‌سازی، سهم هر یک را تبیین می‌نماید. برای شناسایی تغییرات اقلیمی از آزمون‌های آماری مختلف با هدف تعیین وجود روند (آزمون‌های من- کندال و اسپیرمن)، شناسایی زمان تغییر (آزمون پتی) و کمی‌سازی مقدار روند (روش شیب سن) استفاده شد و مقادیر بارش و دما در سطح ایستگاه‌های حوضه ارزیابی گردید. هر چند به دلیل اثرگذاری وقایع حدی (خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های شدید) بر قضاوت آزمون‌ها تعیین زمان تغییر، در نهایت ارزیابی زمان بروز تغییرات اقلیمی در حوضه بر اساس دو روش مختلف، شامل حفظ ارتباط تاریخی تراز آب دریاچه‌های ارومیه - وان و تحلیل پایداری دریاچه ارومیه استفاده شد. در نهایت سال ۱۳۸۰ به عنوان زمان شروع تغییرات اقلیمی در حوضه آب‌ریز دریاچه ارومیه تعیین گردید و سری‌های زمانی مولفه‌های اقلیمی بر اساس این زمان روندزدایی و در مدل بکار گرفته شد. در خصوص دخالت‌های انسانی نیز حذف تغییرات از طریق شرایط پیش‌فرض توسعه مدل SWAT-LU که در آن روند تغییرات کاربری اراضی و شروع بهره‌برداری از برخی سدهای حوضه در طول دوره شبیه‌سازی از ابتدا در نظر گرفته شده بود، انجام شد. در نهایت نیز تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مولفه‌های هیدرولوژیکی اصلی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، شامل بارش، تبخیر و تعرق با هدف ارزیابی اثر روندهای اقلیمی بر این مولفه‌ها انجام شد. بطور خلاصه نتایج زیر از تحقیق حاضر قابل ارایه می‌باشد.

- روند افزایشی دما در کلیه ایستگاه‌های مورد بررسی دیده شد که قریب به اتفاق آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود. در خصوص بارش تقریبا نیمی از ایستگاه‌های حوضه روند کاهشی معنی‌دار نشان می‌دهد، هر چند در سایر ایستگاه‌ها نیز عمدتاً روند کاهشی دیده می‌شود. تحلیل آماری زمان بروز تغییر در دمای حوضه آبریز نشان داد که تغییرات تمام ایستگاه‌ها در نیمه دوم دهه ۱۳۷۰ اتفاق افتاده است. در حالی‌که در خصوص بارش طیف زمانی شناسایی شده تغییرات کمی وسیع‌تر بود، اما عمدتاً در همین دوره بوده است.

- تحلیل زمان مناسب برای در نظر گرفتن شروع تغییرات اقلیمی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه به دو روش انجام شد و نتایج حاصل نشان داد که روند واقعی تغییرات اقلیمی این حوضه در حوالی سال ۱۳۸۰ اتفاق افتاده است. این نتیجه نشان داد که روش‌های آماری که تنها بصورت ریاضی به تحلیل روند تغییرات می‌پردازند، می‌توانند بطور جدی تحت تأثیر عوامل اقلیمی حدی قرار گیرند که در این مطالعه شامل خشک‌سالی شدید منطقه بین سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ بود. بنابراین بهتر است چنین روش‌هایی به تنهایی برای چنین تحلیل‌هایی مورد استفاده قرار نگرفته و تحلیل‌های تکمیلی در هنگام کاربرد آن‌ها لحاظ گردد.

- نتایج نشان داد که در کاهش جریان ورودی به دریاچه، هر دو عامل اقلیمی و انسانی نقش قابل توجهی داشته‌اند. چنان‌چه کل دوره ۲۲ ساله این تحقیق (۱۳۸۸-۱۳۶۷) شبیه‌سازی مدنظر قرار گیرد، اثر عامل انسانی کمی بیش‌تر است، و نسبت ۴۳ به ۴۹ درصد را دارد. البته در سال‌های اخیر و به‌خصوص بعد از سال ۱۳۷۹، نقش عوامل اقلیمی موثرتر بوده، به نحوی‌که نتایج نشان داد سهم عوامل اقلیمی و انسانی در کاهش ورودی‌های دریاچه طی دوره ۱۳۷۸ الی ۱۳۸۸ به ترتیب در حدود ۵۰ و ۴۲ درصد بوده است. دلیل این‌که جمع اثر منفرد عوامل برابر با ۱۰۰ درصد نیست، به نحوه اندرکنش بین عوامل مذکور مرتبط می‌باشد.

- تحلیل حساسیت حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که کاهش نسبی جزیی در مقدار بارش بلندمدت حوضه منجر به کاهش نسبی بسیار بیش‌تری در آبدهی حوضه می‌گردد که اثر آن به مراتب بسیار بیش‌تر از تغییرات دما خواهد بود. به عنوان مثال، کاهش ۱۰ درصدی بارش منجر به حدود ۲۳ درصد کاهش آبدهی حوضه گردید، در حالی‌که تبخیر و تعرق حوضه در این شرایط تنها ۴/۸ درصد کاهش می‌یابد.

- آن‌چه در این نتایج اهمیت دارد، ارقام مطلق حاصله نیست. زیرا که در هر صورت عدم قطعیت‌هایی بر شبیه‌سازی چنین سیستم پیچیده‌ای حاکم می‌باشد. بلکه نتیجه اصلی، نشان دادن نقش موثر و نزدیک هر دو عامل اقلیمی و انسانی در بروز شرایط فعلی است که باید در برنامه‌های احیای دریاچه مدنظر باشند. به عبارتی با این شرایط اقلیمی، نباید انتظار تکرار شرایط آبدهی قبلی حوضه و ورود آب به دریاچه هم‌چون سال‌های گذشته را داشت و در چنین شرایطی، بایستی نگرش جدید در خصوص دریاچه ارومیه و خدمات اکولوژیکی آن در آینده حاکم گردد.

منابع

بی‌نام. ۱۳۸۹. بررسی وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

جلیلی،ش.، مرید،س.، لوینگستون،د و نامدار قنبری،ر. ۱۳۹۱. مقایسه و تحلیل سری زمانی تراز آب دریاچه‌های ارومیه و وان. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۳. ۱ : ۹۵-۱۰۱.

دلاور،م.، مرید،س و شفیعی‌فر،م. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه نسبت به مولفه بیلان آبی آن. مجله هیدرولیک. ۳. ۱: ۴۵- ۵۶.

فرخ‌نیا،ا. 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.

لک،ر.، درویشی‌خاتونی،ج و محمدی،ع. ۱۳۹۰. مطالعات پالئولیمنولوژی و علل کاهش ناگهانی تراز آب دریاچه ارومیه. زمین‌شناسی کاربردی.

۷. ۴ : ۳۴۳-۳۵۸.

مرید،س. و عرب،د. ۱۳۸۵. طرح مستندسازی اقدامات سازمان‌های آب‌های منطقه‌ای در مقابله با خشک‌سالی، دفتر پشتیبانی از طرح‌های کاربردی و پژوهشی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو

AghaKouchak,A., Norouzi,H., Madani,K., Mirchi,A., Azarderakhsh,M., Nazemi,A., Nasrollahi,N., Farahmand,A., Mehran,A and Hasanzadeh,E. 2015. Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. Journal of Great Lakes Research, 41.1:307-311.

Brown,A.E., Zhang,L., McMahon,T.A., Western,A.W and Vertessy,R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of hydrology. 310.1:28-61.

Chandler,R and Scott,M. 2011. Statistical methods for trend detection and analysis in the environmental sciences. John Wiley & Sons.

Chen,Z., Chen,Y and Li,B. 2013. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China. Theoretical and applied climatology. 111.3:537-545.

Cunderlik,J.M and Burn,D.H. 2004. Linkages between regional trends in monthly maximum flows and selected climatic variables. Journal of Hydrologic Engineering. 9.4:246-256.

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. 62.4:783-791.

Fathian,F., Morid,S and Kahya,E. 2015. Identification of trends in hydrological and climatic variables in Urmia Lake basin,Iran. Theoretical and Applied Climatology. 119.3:443-464.

Hamlet,A.F and Lettenmaier,D.P. 2007. Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western US. Water Resources Research. 43.6.

Jalili,S., Hamidi,S.A and Namdar Ghanbari,R. 2016. Climate variability and anthropogenic effects on Lake Urmia water level fluctuations,northwestern Iran. Hydrological Sciences Journal. 61.10:1759-1769.

Jiang,S., Ren,L., Yong,B., Singh,V., Yang,X and Yuan,F. 2011. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods. Hydrological Processes. 25.16:2492-2505.

Jones,R.N., Chiew,F.H., Boughton,W.C and Zhang,L. 2006. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. Advances in Water Resources. 29.10:1419-1429.

Kahya,E and Kalaycı,S. 2004. Trend analysis of stream flow in Turkey. Journal of Hydrology. 289.1:128-144.

Kebede,S., Travi,Y., Alemayehu,T and Marc,V. 2006. Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall,Blue Nile basin,Ethiopia. Journal of hydrology. 316.1:233-247.

Kundzewicz,Z and Robson,A. 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. World Meteorological Organization.

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. 118.1:271-283.

Li,L.J., Zhang,L., Wang,H., Wang,J., Yang,J.W., Jiang,D.J., Li,J.Y and Qin,D.Y. 2007.Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China. Hydrological processes. 21.25:3485-3491.

Li,Z., Liu,W., Zhang,X and Zheng,F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. Journal of hydrology. 377.1:35-42.

Wang,J., Ishidaira,H and Xu,Z. 2012. Effects of climate change and human activities on inflow into the Hoabinh Reservoir in the Red River basin. Procedia Environmental Sciences. 13:1688-1698.

Wang,W., Shao,Q., Yang,T., Peng,S., Xing,W., Sun,F and Luo,Y. 2013.Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activityes on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin,China. Hydrological Processes. 27.8:1158-1174.

Wang,X. 2014. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview. Advances in Water Resources. 71:209-218.

Xu,Z., Takeuchi,K and Ishidaira,H. 2003. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation: Journal of hydrology. 279.1:144-150.

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. 10.7:9477-9504.

Zhang,X., Liu,Y., Fang,Y., Liu,B and Xia,D. 2012. Modeling and assessing hydrologic processes for historical and potential land-cover change in the Duoyingping watershed, southwest China. Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C. 53:19-29.

Zhao,F., Zhang,L., Xu,Z and Scott,D.F. 2010. Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow. Water Resources Research. 46.3:358-343.

Lørup,J.K., Refsgaard,J.C and Mazvimavi,D. 1998. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe. Journal of Hydrology. 205.3:147-163.

Ma,H., Yang,D., Tan,S.K., Gao,B and Hu,Q. 2010. Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment. Journal of Hydrology. 389.3:317-324.

Sankarasubramanian,A., Vogel,R.M and Limbrunner,J.F. 2001. Climate elasticity of streamflow in the United States. Water Resources Research. 37.6:1771-1781.

Shifte-Some'e,B., Ezani,A and Tabari,H. 2012. Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. Atmospheric research. 113:1-12.

Soltani,S., Saboohi,R and Yaghmaei,L. 2012. Rainfall and rainy days trend in Iran. Climatic change. 110.1:187-213.

Thanasis,V., Efthimia,B.S and Dimitris,K. 2011. Estimation of linear trend onset in time series. Simulation Modelling Practice and Theory. 19.5:1384-1398.

Vano,J.A., Das,T and Lettenmaier,D.P. 2012. Hydrologic sensitivities of Colorado River runoff to changes in precipitation and temperature. Journal of hydrometeorology. 13.3:932-949.

Vano,J.A and Lettenmaier,D.P. 2014. A sensitivity-based approach to evaluating future changes in Colorado River discharge. Climatic change. 122.4:621-634.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 12, Des.-Jan. 2018, p. 1041-1058

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۲، آذر - دی ۱۳۹۷، ص. ۱۰۵۸-۱۰۴۱

Development of SWAT-LU Model for Simulation of Urmia Lake Water Level Decrease and Assessment of the Proposed Actions for its Restoration; (Role of Anthropogenic and Climatic Factors on Hydrological Change of the Basin and Lake)

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

Recived: Feb.06, 2018 Accepted: May.11, 2018

Abstract:

Recognition of the reasons for the rapid drying of Urmia Lake in the last decade and the quantitative effect of various factors on this process are the first steps in developing appropriate measures to improve its conditions, which have been less well-documented. Therefore, the present study aimed to evaluate the quantitative effect of factors affecting the change of the lake water balance in two broad categories, including climate variability and human interference. For this purpose, the single and simultaneous elimination of changes in these components was analyzed using SWAT-LU model and the effect of every factor was determined by comparing the results with the actual condition. In summary, the results of these analyzes showed that during the 22-year period ending in 2009, the cumulative effect of climatic and human-induced changes in reducing the inflow into Urmia Lake was almost equal, but due to the intensification of climate variability in the second half of this period, the effect of climatic factors was dominant in the rapid negative trend of lake water level. Also, hydrologic sensitivity analysis of Urmia Lake watershed showed that a partial reduction in the amount of long-term rainfall would lead to a much higher decline in basin drainage, which would be far more effective than temperature changes. Therefore, the occurrence of weak climatic trends can lead to significant hydrological trends, which can explain the reasons for the hydrological droughts of recent decades in large parts of the country.

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

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