سیزدهمین کنگره ملّی مهندسی عمران
۲۰ و ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۱
دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل کوپل شده اقلیمی–هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه آبریزکشف رود)

امیرحسین حسینی[۱]، علی عباسی[۲*]، آذر زرین [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران مدیریت منابع آب دانشگاه فردوسی مشهد

۲-عضو هیات علمی گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۳- عضو هیات علمی گروه جغرافیا دانشگاه فردوسی مشهد

aabbasi@um.ac.ir

خلاصه

در این پژوهش از مدل SWAT و مدل اقلیمی CCT جهت پیش بینی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب های زیرزمینی در حوضه آبریز کشف رود استفاده شد. شبیه سازی برای دوره زمانی 1989 الی ۲۰۱۸ با در نظر گرفتن ۵ سال گرم کردن مدل انجام شد. جهت ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای مدل و شناسایی پارامترهای حساس برای مؤلفه های اصلی هیدرولوژیکی، الگوریتم SUFI2 به کار گرفته شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای برآورد مناسب مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم های فوق انجام پذیرفت. کارآیی مدل در شبیه سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه توسط معیارهای ارزیابی عملکرد مدل به عنوان مثال در ایستگاه آب سنجی آق دربند در دوره ی واسنجی(مقادیر NSE و R^2 به ترتیب برابر۰/۷۷ و ۰/۷۹) و صحت سنجی(مقادیر NSE و R^2 به ترتیب برابر۰/۶۶ و ۰/۹۰) تایید می شود. همچنین به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم از مدل NorESM1-M ریزمقیاس شده توسط جعبه ابزار CCT از سری گزارشات پنجم هیأت بین الدول تغییر اقلیم تحت دوسناریو خوش بینانه و بدبینانه RCP2.6 و RCP8.5 دردوره زمانی (۲۰۱۹–۲۰۴۵) انجام پذیرفت. نتایج حاصل از ارزیابی تغییرات اقلیم در حوضه مطالعاتی این تحقیق حاکی از آن است که افزایش تبخیر در اثر افزایش دما و سهم کمتر نزولات جوی، زمینه ساز کاهش تغذیه آب زیرزمینی در سطح حوضه خواهد بود، از این رو یافته های این تحقیق می تواند برای مدیران و سیاتگذاران منابع آب جهت ارائه برنامه ها و راهکارهای مدیریتی در مواجه با تغییرات اقلیمی مفید باشد.

کلمات کلیدی: مدل اقلیمی CCT، مدل SWAT، حوضه آبریزکشف رود، تغذیه منابع آب زیرزمینی.

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل قرن حاضر، مسئله گرمایش جهانی است و انتظار می‌رود که با افزایش انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از فعالیت های انسان طی سالیان متمادی و از آنجا که بسیاری از این گازها پس از انتشار ده ها تا صدها سال در جو باقی می مانند ، اثرات گرم کننده آن ها بر روی آب و هوا برای مدت طولانی ادامه دار باشد و از این رو می تواند بر نسل های فعلی و نسل های بعدی تأثیر بگذارد. این پدیده که به تغییر اقلیم موسوم می باشد، سبب بر هم خوردن نظم طبیعی و تعادل اقلیم کره زمین گردیده است. تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژی و در مرحله بعد بر کیفیت و کمیت منابع آب در مناطق مختلف اثر می گذارد. بررسی تأثیر تغییرات آب و هوا بر آب های زیرزمینی به عنوان یک منبع پنهان به نسبت آب های سطحی پیچیده تر است، تغییر در فراوانی ، شدت و الگوها بارش و همچنین تغییر در دما به صورت غیر مستقیم بر تغذیه آب های زیرزمینی تاثیر گذار است. بنابراین تعیین آثار تغییر اقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی نه تنها نیازمند پیش بینی تغییرات متغیرهای اقلیمی اصلی دارد، بلکه نیازمند تخمین دقیق میزان تغذیه آب‌زیرزمینی است.تغییر اقلیم پدیده پیچیده در مقیاس جهانی و بلند مدت است و از طریق فعل و انفعالات خورشیدی، آتشفشان ها و میزان غلظت گازهای گلخانه در لایه فوقانی جو، سبب دگرگونی در وضع آب و هوا، تغییر پراکنش مکانی و زمانی بارش و حالت آن (جامد یا مایع)، تغییر در روند جریان های سطحی، میزان تبخیر، پایداری کیفی و کمی منابع آب های زیرزمینی شده و بطورکلی باعث بر هم خوردن تعادل دمایی کره زمین و به تبع آن تغییررفتارهای هیدرولوژیکی و اثرات قابل توجه بر منابع آب در برخی مناطق جهان گردیده است. به منظور تعیین نقشه راه جهت انطباق با این پدیده در گام اول لازم است برآورد صحیح از میزان مخاطرات این پدیده صورت گیرد. برای مشخص شدت ذات پیچیده اتمسفر و پیش بینی روند دگرگونی آن از مدل های گردش عمومی جو

استفاده می شود. همچنین، در خصوص مدیریت یکپارچه و جامع حوضه¬های آبریز از مدل سازی پدیده های هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه استفاده می شود. از این رو بررسی به هم پیوسته مدل های تغییر اقلیم و مدل¬های هیدرولوژیکی می¬تواند روشی مناسب و کاربردی برای شبیه سازی و پیش بینی روند اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و مدیریت صحیح بیلان این منابع در آینده باشد. در این تحقیق از مدل SWAT به عنوان مدل هیدرولوژیکی و مدل اقلیمی CCT به منظور بررسی اثر تغییراقلیم بر میزان تغذیه منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز کشف رود استفاده شده است[8] .

۲. مروری بر پیشینه پژوهش

با بررسی کارهای انجام شده توسط سایر محققان می توان دریافت که تاکنون مطالعات محدودی در خصوص اثرات تغییرات اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی انجام شده و بیشتر به بررسی تاثیرات تغییر اقلیم بر روی ترازهای آب زیرزمینی و یا اثرات آن بر افزایش سطح دریا و به تبع آن کاهش کیفیت و کمیت آبخوان های مناطق ساحلی، پرداخته شده است. از این رو، با توجه به اهداف ذکر شده برای انجام پژوهش به برخی از این مطالعات اشاره می شود.

ایرترک و همکاران (۲۰۱۴) به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی با مدل SWAT در حوضه آبریز کویجی قیز-دایلان کشور ترکیه پرداختند و نتایج آن ها حاکی کاهش از کلیه مولفه های بیلان آب حوضه بود.[1] هوز و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبریز لمبورن انگلیس پرداختند و مشاهده کردند در انتهای سال ۲۰۸۰ سطح آب زیرزمینی با توجه به کاهش میزان بارش و افزایش میزان تبخیر و تعرق، به صورت محسوسی کاهش یافته است[2] .

در ایران، انصاری و همکاران (۱۳۹۵) به منظور مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی حوزه آبریز مخزن چغاخور واقع در استان چهارمحال و بختیاری با بکار گیری مدل اقلیمی LARS-WG جهت ریز مقیاس نمایی داده های مدل سه بعدی HadCM3 در دوره های آتی و همچنین مدل GMSجهت مدلسازی آبخوان با استفاده از داده های ورودی رواناب مدل IHACRES به عنوان پارامتر تغذیه که تحت سناریوهای تغییر اقلیم A2، B1 قرار گرفته اند بررسی و نتایج حاکی از افزایش بارندگی در دوره آتی تحت سناریوی های A2،B1به ترتیب حدود ۲۶ و ۳۳ درصد می باشد. همچنین در دوره آتی در انتهای دوره (سال ۲۰۳۵) میزان تجمعی تغذیه آب زیرزمینی در سناریو A2 به B1 ۱۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش داشته که حاکی از افزایش اثرات تغییراقلیم در سناریوی A2 نسبت به سناریوی B1 می باشد[3] . در پژوهشی دیگر (رضایی و همکاران۱۳۹۷) به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز تسوج، با استفاده از نتایج خروجی مدلHadCM3 پرداختند. در این تحقیق از داده های کوچک مقیاس شده سناریوی A2 استفاده و سپس توسط مدل هیدرولوژیکیHELP3،تغذیه برای دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۳ پیش بینی شد. نتایج نشان داد که میزان تغذیه آب زیرزمینی در این حوضه از ۱۲ تا ۶۷ میلی متر در سال تحت سناریوی A2 در نوسان می باشد. [4]گودرزی و همکاران(۱۳۹۴) ، در پژوهشی به منظور تحلیل اثرات پارامترهای مختلف بر تغذیه آب های زیرزمینی دشت نجف آباد گزارش کردند، با تغییر ۱۰ درصدی بارش میزان تغذیه در بازه ۱۶ تا ۷۷ درصد و با ۱ درصد تغییر دما مقدار تغذیه بین ۶ تا ۴۲ درصد تغییر خواهد کرد. همچنین بررسی های صورت گرفته حاکی از میزان وابستگی تغذیه آب زیر زمینی به پارامترهای بافت خاک، بارش، کاربری اراضی، ضخامت ناحیه غیراشباع، شیب زمین، میزان نیاز آبیاری و آبدهی ویژه می باشد که در این میان متغییرهای بارش و بافت خاک بیشترین اثر را خواهند داشت.[5] دولت آبادی و زمردیان(۱۳۹۴) در پژوهشی با بکارگیری مقادیر تغذیه استخراج شده از مدل SWAT در مدل ریاضی MODFLOW به منظور شبیه سازی جریان آب زیرزمینی دشت فیروزآبادپرداختند که پس از واسنجی و تحلیل حساسیت مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی و میزان برداشت از چاه ها و همچنین اعتبار سنجی مدل، نتایج حاکی از دقت مدل در شبیه سازی آبخوان مورد مطالعه بود[6] .

شکیبا و چشمی (۱۳۹۲) ،به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت رامهرمز با استفاده از شبکه عصبی NARX پرداختند. در این تحقیق به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، از خروجی مدل های گردش عمومی جو(GCM)استفاده شد و سپس جهت انطباق مقیاس خروجی این مدل ها با مقیاس مورد نیاز مطالعات محلی تغییر اقلیم، دادههای بارش و دما توسط مدل LARS- WG ریزمقیاس شدند. از اطلاعات ریزمقیاس شده جهت تعیین مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان در دوره های آتی استفاده گردید. برای بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در مقاطع مختلف، مدل دینامیکی شبکه عصبی در محیط نرمافزار MATLAB توسعه داده شد. نتایج مطالعه با فرض حفظ وضعیت موجود توسعه منطقه، حاکی از سیر نزولی حجم آبخوان با توجه به تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر منابع و مصارف محدوده مطالعاتی میباشد. همینطور نتایج، سناریو A2را بحرانی‌ترین سناریو مربوط به تغییرات اقلیمی معرفی کرد که بیشترین افت آبخوان را در مدلسازی شبکه عصبی هم نشان داد.[7]

۳. مواد و روش پژوهش

در این تحقیق ابتدا اطلاعات و آمار مورد نیاز مدل اقلیمی و مدل هیدرولوژیکی تهیه و بر اساس فرمت های خاص دو مدل (برای مدل اقلیمی فرمت txt و برای مدل هیدرولوژیکی فرمتdbf) تنظیم شدند. سپس مدل اقلیمی، برای اطمینان از وقوع تغییر اقلیم در حوضه مورد مطالعه اجرا گردید. در مرحله بعد پس از اطمینان از حصول تغییر اقلیم در قرن جاری در منطقه مورد مطالعه، حوضه آبخیز کشف رود در مدل هیدرولوژیکی شبیه سازی گردید و در مرحله آخر میزان تغییرات تغذیه آب زیرزمینی در اثر تغییر اقلیم برآورد شد و سپس به صورت نقشه‌های پهنه بندی ارائه گردید.

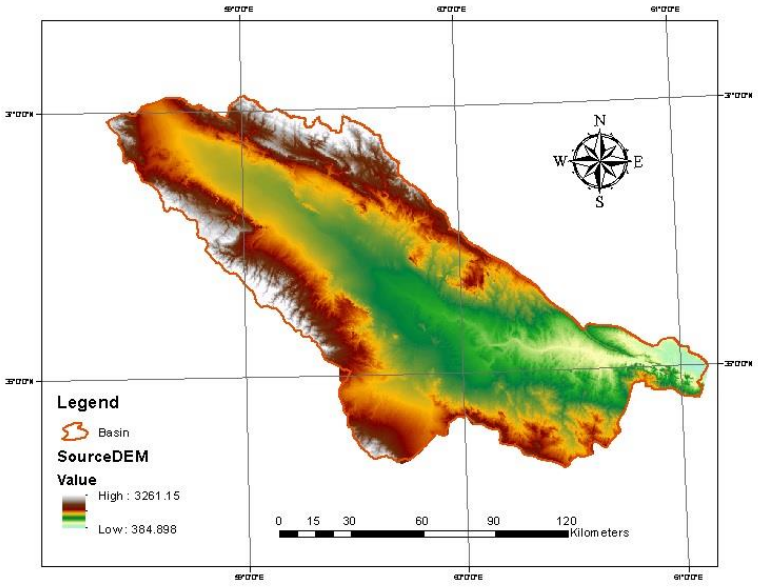
معرفی منطقه مورد مطالعه :

حوضه آبریز کشف‌رود توسط ارتفاعات شرقی قوچان از حوزه آبریز رودخانه اترک جدا شده و رودخانه‌ای طغیانی به حساب می‌آید. به علت ناچیز بودن پوشش گیاهی، جریان‌های سیلابی آن شدید بوده و هر ساله خسارات زیادی را به وجود می‌آورد. این رود در حال حاضر به دلیل خشکسالی و احداث سد بر روی سرشاخه‌های آن خشک شده و فقط در مواقع سیلاب دارای آب است و در طول سال، پساب شهری در آن جاری است. متوسط میزان آبدهی بلندمدت کشف‌رود، ۱.۸ مترمکعب در ثانیه است. برای مهار سیلاب‌های کشف‌رود، سد شوریجه با حجم مخزن ۲۰۰ میلیون‌مترمکعب در شهرستان سرخس بر روی این رودخانه با هدف تأمین آب کشاورزی درحال احداث است. سدهای طرق و کارده و ارداک، بزرگ‌ترین سدها بر روی سرشاخه‌های کشف‌رود هستند. [8]

در مراحل مختلف این تحقیق، به منظور پردازش ورودی مدل ها، اجرا، تهیه نقشه ها و خروجی مدل ها از نرم افزارهای ArcGIS ، مدل CCT برای ریزمقیاس نمایی اقلیمی ، ArcSWAT و SWAT-CUP استفاده شده است

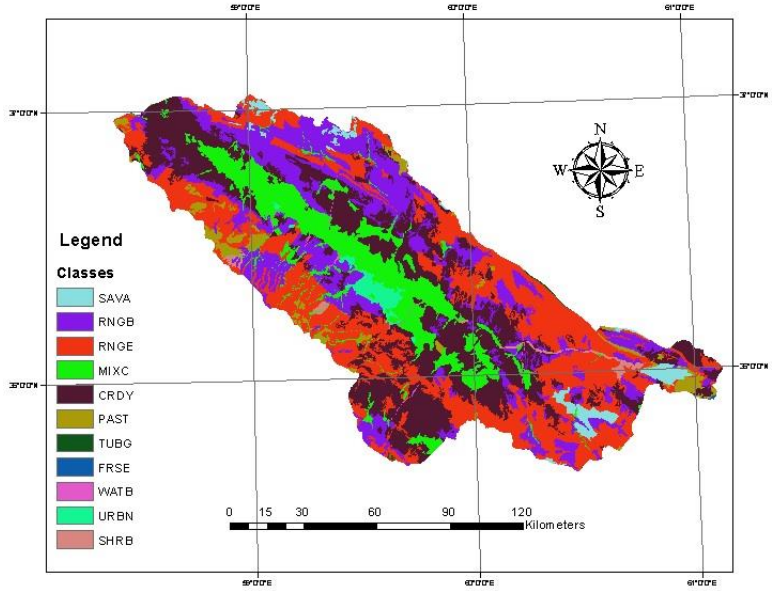
اطلاعات و داده های اساسی مورد نیاز به منظور انجام محاسبات هیدرولوژیکی در مدل SWAT گستره وسیعی از نقشه ها نظیر(مدل رقومی ارتفاعی، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک) و داده های هواشناسی در مقیاس روزانه از قبیل(بارش، دمای حداقل و حداکثر، میزان تشعشع خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی) را شامل می شود. که در گام اول می بایست تهیه و براساس قالب از پیش تعیین شده مدل تنظیم و سپس به مدل معرفی گردند، که در بخش های ذیل به طور کامل به آن ها اشاره شده است:

۱ .نقشه مدل رقومی-ارتفاعی حوضه : (DEM) اولین فایل مورد نیاز برای برای شروع مدلسازی و تعریف محدوده حوضه آبریز می باشد، این نقشه با توجه به اطلاعات توپوگرافی تهیه شده توسط سازمان نقشه برداری برای حوضه آبریز کشف رود قابل استخراج می باشد. مدل SWAT با استفاده از فایل DEM خصوصیات فیزیوگرافی، توپوگرافی و زهکشی حوضه را مینای مدلسازی هیدرولوژیکی خود قرار می دهد بنابراین این نقشه بایستی از دقت بالایی برخوردار باشد.



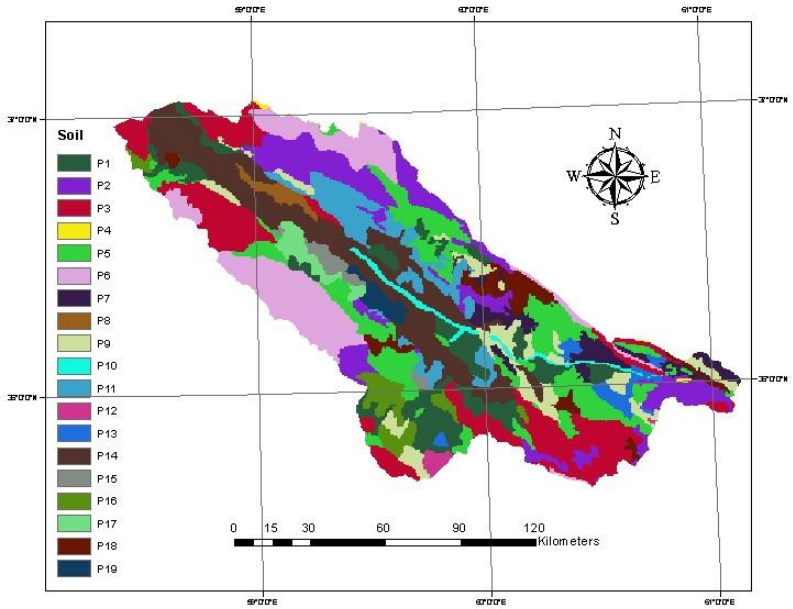
شکل۳- ۱- نقشه رقومی ارتفاعی حوضه آبریز کشف رود

۲ .نقشه کاربری اراضی از اهمیت بالایی در زمینه فرسایش و تبخیر- تعرق و رواناب در یک حوضه آبریز برخوردار می باشد و غالباً به صورت رستری به مدل معرفی می گردد. این نقشه را می توان از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری و یا جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی اخذ کرد همچنین از طریق تصاویر ماهواره ای نیز قابل تهیه و تولید می باشد.



شکل۳- ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز کشف رود

۳ .نقشه ی خاک جز فاکتورهای مهم برای مدل در زمینه شبیه سازی رسوب و فرسایش می باشد، این نقشه قابل تهیه از سازمان های جهاد کشاورزی و یا اداره منابع طبیعی و آبخیز داری می باشد، مدل SWAT به اطلاعات زیادی از خاک مانند تعداد لایه های خاک، هدایت هیدرولیکی و خواص فیزیکی و شیمیایی و ... آن نیاز دارد. البته در بسیاری از مناطق این اطلاعات مورد ثبت و برداشت قرار نمی گیرد و می توان از نقشه های سازمان خواربار و کشاورزی (FAO) استفاده کرد .

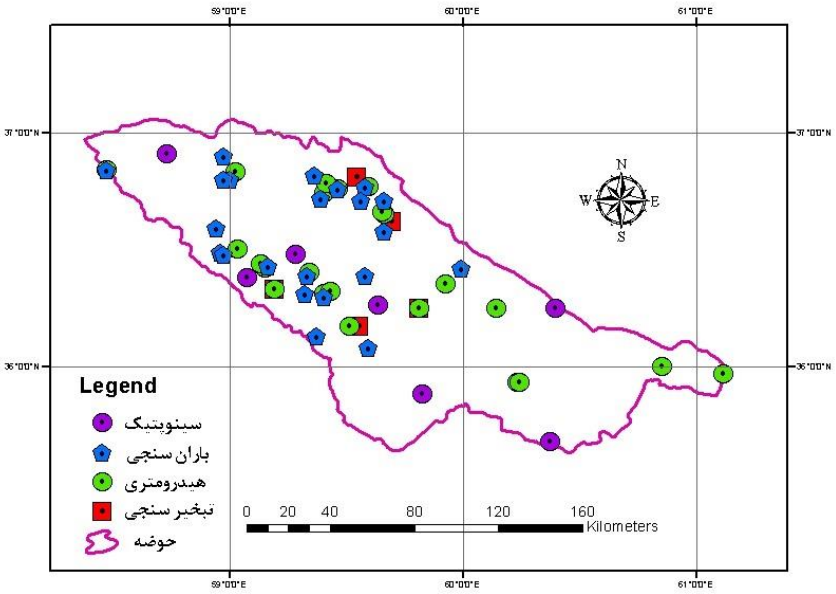


شکل۳- ۳- نقشه خاک حوضه آبریز کشف رود[8]

۴ .داده های هواشناسی: اطلاعات اقلیمی مورد نیاز مدل SWAT نظیر بارش، دمای حداقل و حداکثر در مقیاس روزانه ایستگاه های باران سنجی و تبخیر سنجی مربوط به حوضه آبریز کشف رود از وزارت نیرو اخذ گردید، همچنین سایر پارامترهای اقلیمی مدل نظیر تشعشع خورشیدی و سرعت باد و میزان رطوبت نسبی از ایستگاه های سینوپتیک موجود در حوضه از سازمان هواشناسی اخذ گردید .

جهت انجام واسنجی و تحلیل متغییرهای هیدرولوژیکی حوضه لازم است آمار بلند مدت رواناب (روزانه) ایستگاه های حوضه از شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی تهیه و آماده سازی گردند.

با توجه به اینکه در مطالعات تغییر اقلیم حداقل باید یک دوره ۳۰ ساله به عنوان دوره پایه یا شرایط اقلیمی حال حاضر استفاده شود از این رو از داده های هواشناسی مابین سال های ۱۳۶۷-۱۳۹۷ در مقیاس روزانه به عنوان داده های مشاهداتی استفاده می گردد.در این پژوهش به منظور پیش بینی بارش و دمای حداکثر و حداقل در سال های آتی از مدل اقلیمی CCT استفاده می گردد. کلیه داده های هواشناسی حوضه آبریز کشف رود، از ایستگاه های باران سنجی و تبخیر سنجی وزارت نیرو و ایستگاه های سینوپتیک سازمان هواشناسی اخذ و بر اساس قالب مدل تنظیم و به عنوان ورودی به مدل وارد می شوند. در مجموع ۳۴ ایستگاه باران سنجی، ۱۲ ایستگاه دماسنجی، ۷ ایستگاه اندازه گیری رطوبت‌نسبی، سرعت‌باد و تابش خورشیدی برای حوضه آبخیز کشف رود انتخاب و بر اساس فرمت مدل آماده سازی گردیدند. همچنین، در حوضه آبخیز کشف رود۲۵ ایستگاه هیدرومتری واقع شده است که ۴ ایستگاه به علت کمبود آمار بلند مدت از آمارهای نهایی حذف و همچنین از بین ۲۱ ایستگاه باقیمانده و با توجه به پراکندگی و ناقص بودن داده های تعداد زیادی از این ایستگاه ها در نهایت۴ ایستگاه سرآسیاب شاندیز، کرتیان، آق دربند و گلستان جاغرق جهت بررسی عدم قطعیت الگوریتم SUFI2 انتخاب گردید.



شکل۳- ۴- موقعیت قرارگیری ایستگاه های اقلیمی حوضه آبریز کشف رود

یکی از اصلی‌ترین منابع عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژی، عدم قطعیت ناشی از پارامترهای ورودی مدل می‌باشد. از این رو جهت بهبود نتایج شبیه‌سازی و کاهش عدم قطعیت در نتایج، اکثر این مدل‌ها نیاز به تطبیق و تعدیل در پارامترهای ورودی و کنترل کننده فرآیندها در مدل دارند. همچنین پس از واسنجی، به منظور ارزیابی توانایی مدل برای پیش‌بینی رخدادهای آینده، لازم است که اعتبارسنجی صورت پذیرد. مدل SWAT نیز به دلیل بزرگ مقیاس بودن و داده‌های ورودی زیادی که نیاز دارد و نیز مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از این پارامترها در مقیاس حوضه‌ای، لازم است که این مدل برای حوضه آبخیز مورد نظر واسنجی و سپس اعتبارسنجی گردد.[8] در این پژوهش پس از تعیین پارامترهای حساس از طریق انجام آنالیز حساسیت مطلق، از الگوریتم SUFI2 موجود در بسته نرم افزاری SWAT-CUP برای واسنجی مدل استفاده گردید. برای انجام واسنجی، لازم است که نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای که در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه اندازه‌گیری شده است، سنجیده شود. بنابراین از حدود ۸۰ درصد داده‌های دبی ماهانه اندازه‌گیری شده(از ابتدای سال ۱۹۹۵ تا انتهای سال2013) در چهار ایستگاه هیدرومتری به نام‌های سرآسیاب شاندیز(زیرحوضه شماره۱۶)، گلستان جاغرق(زیرحوضه شماره۱۸)، کرتیان(زیرحوضه شماره۲۶) و آق دربند(زیرحوضه شماره ۳۴) برای واسنجی و از ۲۰ درصد آن ها (از ابتدای سال ۲۰۱۴ تا انتهای سال ۲۰۱۸) نیز برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. (علت انتخاب چهار ایستگاه هیدرومتری ذکر شده را می‌توان به ناقص و

یا پراکنده بودن بسیار زیاد داده‌های مشاهداتی رواناب در اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوضه آبخیز کشف رود و نتایج ضعیف شبیه‌سازی آن‌ها در مرحله واسنجی اشاره نمود و تنها چهار ایستگاه فوق دارای داده‌های دقیق و نزدیک به داده‌های شبیه‌سازی توسط مدل می‌باشند). همچنین از ضریب ناش-ساتکلیف به عنوان تابع هدف برای بهینه‌سازی استفاده شد و عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی مدل نیز توسط عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد (۹۵ppu) محاسبه گردید. از شاخص‌های ضریب تبیین (R2)، ضریب ناش-ساتکلیف (NS)، r-factor و p-factor نیز جهت ارزیابی کارایی مدل در مرحله‌های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده گردید. لازم به ذکر است که جهت واسنجی و اعتبارسنجی، از مدل اجراء شده با استفاده از داده‌ها و اطلاعات مشاهداتی موجود در منطقه در دوره پایه صورت پذیرفت و سپس برای ارزیابی تغییرات اقلیم آتی حوضه در بازه‌های زمانی مختلف، از مقادیر بهینه شده پارامترها استفاده گردید.مقادیر بدست آمده شاخصه‌ای ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نیز، در جداول ۳-۱ و ۳-۲ نشان داده شده است.

جدول۳- ۱- مقادیر شاخص های ارزیابی کارایی مدل در شبیه سازی رواناب در مرحله واسنجی

ایستگاه هیدرومتری	شاخص ارزیابی			
	ضریب ناش-ساتکلیف(NS)	ضریب تبیین(R^2)	r-factor	p-factor
سرآسیاب شاندیز	0/71	0/74	0/02	0/24
گلستان جاغرق	0/79	0/80	0/01	0/09
کرتیان	0/60	0/60	0/01	0/09
آق دربند	0/77	0/79	0/24	0/26

جدول۳- ۲- مقادیر شاخص های ارزیابی کارایی مدل در شبیه سازی رواناب در مرحله صحت سنجی

ایستگاه هیدرومتری	شاخص ارزیابی			
	ضریب ناش-ساتکلیف(NS)	ضریب تبیین(R^2)	r-factor	p-factor
سرآسیاب شاندیز	0/61	0/69	0/00	0/23
گلستان جاغرق	0/68	0/84	0/00	0/10
کرتیان	0/52	0/63	0/00	0/02
آق دربند	0/66	0/90	0/00	0/33

پس از اجراء مدل SWAT برای حوضه آبریز کشف رود و واسنجی و اعتبارسنجی آن با استفاده از الگوریتم SUFI2 در نرم افزار SWAT-CUP میزان تغییرات رواناب در خروجی حوضه در دوره بلند مدت گذشته تعیین گردید. در این مرحله با استفاده از جعبه ابزار CCT و با بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر دمای بیشینه و کمینه و نیز بارش، مدل SWAT برای دوره‌های آینده اجراء و در نهایت تغییرات میزان تغذیه آب زیرزمینی حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی مشخص گردید.

برای بررسی اثرات تغییر اقلیم باید متغییرهای اقلیمی تحت تاثیر تغییرات گازهای گلخانه ای و با توجه به سناریوهای متفاوت شبیه سازی شوند، زیرا هریک از این سناریوها دربرگیرنده طیف وسیعی از تغییرات رشد جمعیت در آینده، عوامل اقتصادی و تکنولوژیکی موثر بر انتشار گازهای گلخانه ای و ذرات معلق می باشد.

معتبر ترین ابزار جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم، استفادهاز متغییرهای اقلیمی شبیه سازی شده توسط مدل های جفت شده اتمسفر- اقیانوس گردش عمومی جو است. یکی از ضعف های مدل گردش عمومی جو بزرگ بودن مقیاس مکانی و زمانی متغییرهای اقلیمی شبیه سازی شده است. ریز مقیاس نمایی آماری داده های مختلف GCM با استفاده از مدل ها و نرم افزار های مختلف از جمله SDSM ، LARSو CCT صورت می گیرد که CCT یکی از جدیدترین این نرم افزارها است. بسته نرم افزاری تغییر اقلیم CCT توسط واقفی و همکاران (۲۰۱۷) در موسسه eawag سوئیس توسعه داده شد.

بسته نرم افزاری تغییراقلیم CCT ابزاری است که می توان برای استخراج، درون یابی و تصحیح انحرافات داده های به دست آمده از مدل های اقلیمی جهانی استفاده کرد. همچنین از این بسته نرم افزاری برای تحلیل وقایع حدی مانند خشکسالی و سیل هم استفاده می شود. این بسته نرم افزاری به ۵ پایگاه داده جهانی از ISI-MIP متصل است. همچنین از چهار سناریو RCP نیز استفاده می شود.

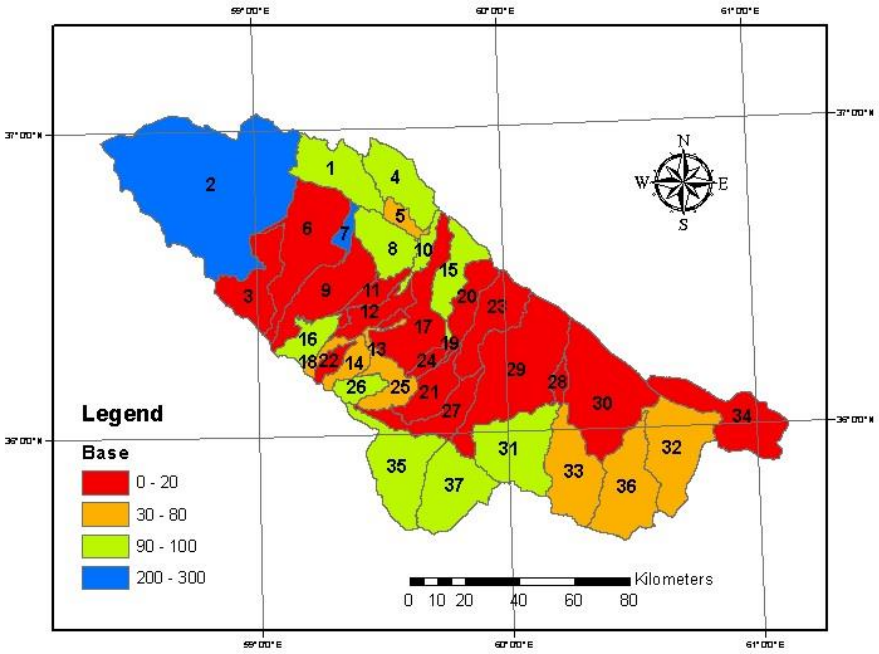
در تحقیق حاضر انتخاب مدل های اقلیمی براساس مطالعات گذشته که در حوضه کشف رود صورت گرفته بود، انجام شد. لازم به ذکر است، از بین پنج مدل اقلیمی موجود در جعبه ابزار CCT، مدل NorESM1-M انتخاب و بررسی تغییر اقلیم در حوضه تحت دوسناریو خوش بینانهRCP2.6 و بدبینانه RCP8.5 و دردوره زمانی (۲۰۱۹-۲۰۴۵) انجام گرفت.

۴. تجزیه و تحلیل یافته ها

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در کشور ما از اهمیت زیادی برخوردار است، از آنجا که اصلی‌ترین منبع تأمین آب شرب و کشاورزی در ایران، آب‌های زیرزمینی است. در سالیان اخیر، خشکسالی‌های پی در پی و برداشت بی‌رویه منجر به کاهش محسوس این منابع شده است. استمرار یا توسعه بهره‌برداری از این آب‌ها مستلزم شناخت ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان و مدیریت یکپارچه آن است.

امروزه مدل‌های هیدرولوژیکی همچون مدل SWAT این امکان را به پژوهشگران و مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب داده است که تغییرات مکانی مؤلفه‌های منابع آب را در حوضه‌های آبخیز بررسی کنند و برای مدیریت این منابع آب، برنامه ریزی بلند مدت و پایدار طراحی کنند. در این راستا با استفاده از یک رویکرد گام‌به‌گام مدل‌سازی و شبیه‌سازی، تأثیر تغییر اقلیم بر روی تغذیه منطقه مورد مطالعه در دوره آتی بررسی شد.

به منظور تهیه نقشه های پهنه بندی و مشخص نمودن مناطق بحرانی منطقه مورد مطالعه پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل و وارد کردن مقادیر پارامترهای بهینه شده در مدل SWAT و همچنین آماده سازی مؤلفه‌های بارش و درجه حرارت حداقل و حداکثر در دوره‌های زمانی آینده توسط جعبه ابزار CCT و وارد کردن آن ها در مدل بهینه شده SWAT ، مقادیر تغذیه آب زیرزمینی در هر زیرحوضه تخمین زده شد.



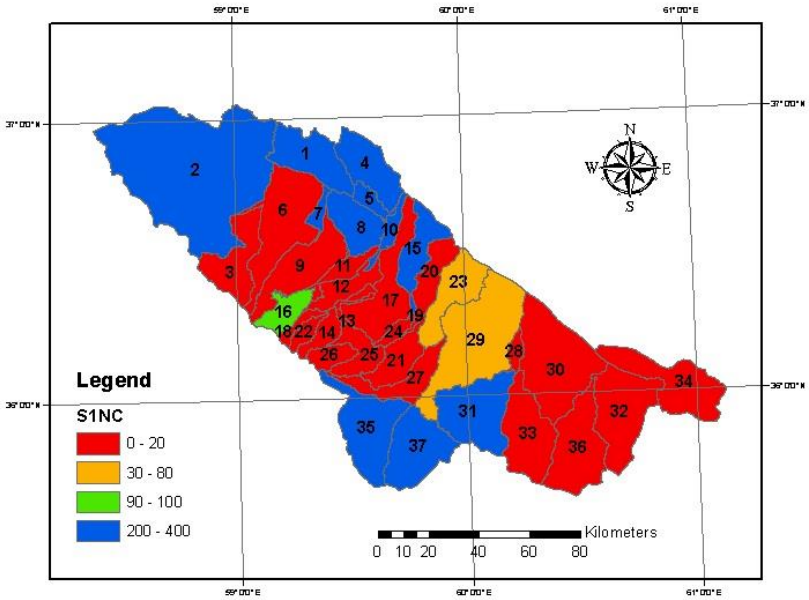
شکل۳- ۵- پهنه بندی میزان تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز کشف‌رود در دوره پایه

شکل ۳-۵ میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی در حوضه آبخیز کشف رود در دوره تاریخی (۱۳۶۷-۱۳۹۷) نشان می دهد. با توجه به شکل۳-۵ مشاهده می شود که میزان تغذیه در بخش های شمال غربی حوضه (سرشاخه کشف رود) حداکثر بوده و به سمت مرکز و پایین دست حوضه (جنوب شرقی) از مقدار آن کاسته شده است و از حدود ۲۹۴ میلی‌متر در سال در بالادست(زیرحوضه‌های شماره ۲و۷) به کمتر از ۲۰ میلی متر در سال در پایین دست می‌رسد. بنابراین در بالادست منطقه بالابودن تغذیه آب زیرزمینی نتیجه میزان کشت آبی که با توجه به نقشه کاربری اراضی، در این مناطق اراضی کشاورزی و باغی بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. همچنین، با توجه به میزان بارندگی و برف گیری در طول سال نیز در این مناطق سهم بیشتر از بارش‌های آسمانی دریافت می کنند. لازم به ذکر است بالاترین بخش حوضه و در شمال غربی آن (زیرحوضه های شماره ۱ و ۲) از سرشاخه های رودخانه کشف‌رود می‌باشد و این خصوصیات می‌تواند از دلایل افزایش میزان تغذیه در هریک از نواحی حوضه آبریز کشف‌رود نسبت به مناطق جنوب شرقی باشد. به طور کلی وجود کاربری های کشاورزی آبی و مراتع متراکم سبب بهبود شرایط تغذیه حوضه در این نواحی نسبت به کاربری اراضی دیم و آیش شده است. با

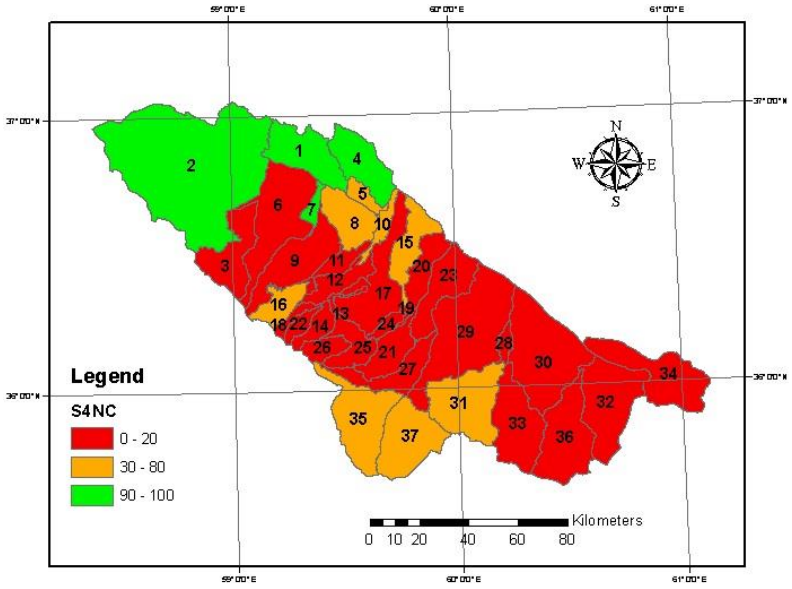
توجه به عدم وجود منابع آب کافی در پایین دست حوضه (بخش مرکزی و به خصوص بخش جنوبی) که سهم بارش کمتری نیز به نسبت مناطق دیگر حوضه دارا می‌باشند، همچنین با توجه به کاربری اراضی دیم در مقایسه با نواحی شمالی حوضه می توان گفت که بدلیل کمبود عملیات آبیاری (بخصوص در فصل های خشک سال) وضعیت تغذیه منابع آب زیرزمینی در این مناطق مناسب نمی‌باشد. لازم به ذکر است که نیمه شمالی و همچنین مناطقی از جنوب غربی حوضه با توجه به کاربری اراضی مخلوط کشاورزی آبی، جنگل و مراتع متراکم بهتر از سایر کاربری های اراضی، توانسته اند مقادیر بیشتری آب را در خاک ذخیره و سبب افزایش میزان تغذیه این مناطق گردند. همچنین خاک مناطق نیمه شمالی و قسمتی از شمال غربی و مرکز عمدتاً از خاک های آبرفتی با دانه بندی درشت بوده و اراضی پست و مسطح قابلیت ذخیره رطوبت بهتری به نسبت اراضی جنوب شرقی که عمدتاً با خاک های کم عمق و رخنمون های سنگی تا ۸۰ درصد، داشته اند.

در اشکال۳-۶ و ۳- ۷ نتایج شبیه‌سازی تغذیه آب‌زیرزمینی به صورت نقشه های پهنه بندی در سطح حوضه در یک دوره ۲۷ ساله(۲۰۱۹-۲۰۴۵) ارائه شده است. با توجه به شکل۳- 6 میزان تغذیه در سناریو RCP2.6 در زیرحوضه های (۱،۴،۸،۱۰،۱۵،۳۱،۳۷،۳۵) به نسبت دوره پایه افزایش یافته است به عنوان مثال در زیرحوضه شماره ۴ مقدار تغذیه از ۱۳۲ میلی‌متر به حدود ۲۱۷ میلی‌متر افزایش یافته است. همچنین در این سناریو زیرحوضه‌های (۱۴،۲۳،۲۵،۲۶،۲۹،۳۲،۳۳،۳۶) وضعیت بدتری به نسبت دوره پایه در تغذیه آب زیرزمینی داشته اند بطوریکه در زیر حوضه ۳۳ از حدود ۳۴ میلی متر به کمتر از ۷ میلی‌متر تغذیه آب زیرزمینی کاهش یافته است. علت این امر را می توان ناشی از وجود مراتع متراکم مخلوط با اراضی کشت آبی در بخش شمالی نسبت به بخش های جنوبی حوضه که دارای اراضی دیم و آیش می باشد دانست که عملکرد بهتری در جذب رطوبت ناشی از افزایش میزان نزولات جوی داشته اند.

با توجه به شکل۳- ۷سناریو RCP8.5 روند متفاوتی نسبت به سناریوهای قبلی برای حوضه پیش بینی کرده است، با مقایسه این سناریو با دوره پایه مشخص می گردد، با توجه به افزایش نسبی دما و کاهش بارش کلیه زیرحوضه ها به خصوص زیر حوضه های واقع در محدوده مطالعاتی آق دربند و نریمانی زیرحوضه های (۳۶،۳۷،۳۵،۳۱،۳۲،۳۳،۲۸،۳۰،۲۹،۳۶) وضعیت بحرانی به لحاظ تغذیه آب زیرزمینی تجربه خواهند کرد. همچنین در محدوده مطالعاتی مشهد (زیرحوضه های ۱ الی ۲۷) به نسبت دوره پایه تغذیه آب زیرزمینی از ۱۶۶۰ میلی متر به حدود ۶۹۵ میلی‌متر کاهش خواهد یافت که نشان دهنده افزایش تبخیر و تعرق رواناب سطحی در اثر افزایش دما و سهم کمتر نزولات جوی در تغذیه آب زیرزمینی حوضه خواهد بود.



شکل۳- ۶- پهنه بندی میزان تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز کشف‌رود در آینده و سناریوRCP2.6



شکل۳- ۷- پهنه بندی میزان تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز کشف‌رود در آینده و سناریوRCP8.5

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نقشه های پهنه بندی جهت ارزیابی توزیع مکانی تغذیه آب زیرزمینی در اثر تغییرات اقلیم و مشخص نمودن مناطق بحرانی، جهت مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب هر منطقه ضروری است. جهت مدیریت صحیح حوضه‌های آبخیز، نیاز به اطلاعات جامع و کاملی از روش‌های مدیریتی و اجرایی متفاوت می‌باشد که به خصوص در حوضه‌های کوهستانی کشور که فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی می‌باشد، هرگونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل و یا حتی شکست مواجه می‌سازد. از این رو برآورد پدیده‌های هیدرولوژی در حوضه‌های آبخیز می‌تواند راه حل بهینه‌ای برای آن باشد. با بررسی و مقایسه نقشه های پهنه بندی و پراکنش مکانی تغذیه آب زیرزمینی در تمامی سناریوها، حاکی از توزیع تقریباً یکسانی از این مولفه بیلان حوضه می باشد که یکی از دلایل کم شدن میزان ذخیره رطوبتی خاک و به تبع آن کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی حوضه، را می‌توان به اجزاء واحد اراضی در نقشه خاک و همچنین کاربری اراضی حوضه در این بخش ها نسبت داد. این واحدهای اراضی شامل کوه ها و تپه های با عمق خاک کم و گاهاً تا ۸۰درصد رخنمون سنگی و در برخی اراضی نیز به صورت کشت دیم و آیش می باشند و لذا توان خاک در ذخیره رطوبت کم بوده و به نسبت به تغییرات اقلیم آسیب پذیر تر می باشند. همچنین در برخی زیرحوضه ها به علت داشتن شیب های بیش از ۴۰ درصد فرصت نفوذ آب به خاک کمتر بوده و در نتیجه میزان تغذیه آبخوان و ذخیره رطوبتی خاک کمتر می باشد در حالیکه در برخی دیگر از حوضه ها دارای اراضی پست و مسطح با خاک های عمیق و سنگین و نیز نوع کاربری اراضی(کشاورزی آبی یا فاریاب)، فرصت کافی برای نفوذ آب به خاک وجود دارد که سبب بهبود میزان تغذیه در این نواحی شده است.

مراجع

1.Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., Gönenç, E. 2014 Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed, Sci Total Environ 499: 437-47; doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.001.

2.House, A., Acreman, M., Sorensen, J., Thompson, J. 2015. Hydroecological impacts of climate change modelled for a lowland UK wetland. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015- 4671.

۳. انصاری، ثمین و مساح بوانی، علیرضا و روزبهانی، عباس،۱۳۹۵، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی(مطالعه موردی: دشت سفیددشت)، فصلنامه آب و خاک، دوره: ۳۰، شماره: ۲.ص ۴۳۱ -۴۱۶.

۴. رضایی بنفشه، م.، و جلالی عنصرودی، ط.، و حسن پوراقدم بگلو، م. (۱۳۹۷). بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات زمانی تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز تسوج. فضای جغرافیایی, ۱۸(۶۱), ۲۵۵-۲۶۹.

۵. گودرزی، م.، صلاحی، ب.، حسینی، س.، ۱۳۹۴. ارزیابی عملکرد مدل های ریزمقیاس گردانی LARS-WG و SDSM در شبیه سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱-۲۲

۶. دولت آبادی، س.، زمردیان، س.، ۱۳۹۴. بکارگیری مقادیر تغذیه استخراج شده از مدل SWAT در مدل ریاضی MODFLOW جهت شبیه سازی جریان آب زیرزمینی دشت فیروزآباد. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۳۴۷-۳۳۷.

۷. شکیبا، ع.، چشمی، آ.، ۱۳۹۰. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت رامهرمز با استفاده از شبکه عصبی .NARXپژوهش های دانش زمین, ۴۶-۵۷

۸. آقاخانی افشار، ا. (۱۳۹۵)، "مدلسازی تأثیر تغییر اقلیم بر مولفه‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز کشف‌رود با لحاظ سازه‌های هیدرولیکی،" پایان نامه دکتری، دانشگاه تبریز، تبریز.