

بررسی نوسانات آب زیرزمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم و بهبود روش آبیاری (مطالعه موردی: دشت اهر)

مریم محمدپور^{۱*}، کامران زینالزاده^۲، وحید رضاوردی نژاد^۳، بهزاد حصاری^۴

۱- استادیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

* نویسنده مسئول: m.mohammadpour@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۷

چکیده

مدیریت منابع آب زیرزمینی از اساسی‌ترین بحث‌های مدیریت آب در سطح حوضه‌هاست. در دهه‌های اخیر عوامل طبیعی و انسانی سبب ایجاد شرایط بحرانی در آبخوان‌های کشور شده است. در تحقیق حاضر، اثرات توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی دشت اهر در یک دوره ۱۶ ساله با نرم‌افزار WEAP مورد بررسی قرار گرفت. پس از واسنجی و صحت‌سنجی، وضعیت موجود منطقه شبیه‌سازی شد، نتایج نشان داد توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار تغییرات معنی‌داری در ذخیره آب دارد و سبب افت سطح آب زیرزمینی شده است. به‌منظور تحلیل شرایط و نشان دادن تأثیر تغییرات در شرایط مختلف و پیش‌بینی برای آینده با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو CGCM3 و HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 مدل توسعه داده شد. نتایج نشان داد؛ حجم آبخوان در شرایط عدم توسعه آبیاری تحت فشار در منطقه، بطور متوسط سالانه به‌میزان ۲۵٪ افزایش می‌یابد. در صورتی که در منطقه آبیاری تحت فشار توسعه پیدا نمی‌کرد، رواناب سطحی و جریان بازگشتی کشاورزی در حوضه بیشتر از مقدار معادل آن در شرایط آبیاری تحت فشار می‌شد. همچنین اعمال سناریوهای اقلیمی برای آینده نشان داد با ادامه شرایط کنونی در آینده، متوسط سالانه بلند حجم آبخوان به‌میزان ۳۳٪ کاهش خواهد یافت؛ با توجه به کم‌آبی بودن منطقه، منابع آبی آن شرایط خوبی را در آینده تجربه نخواهد کرد. بنابراین سامانه‌های آبیاری تحت فشار نه تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف آب نشده، بلکه منجر به تخریب آبخوان زیرزمینی نیز می‌شود. نتایج این مطالعه بر لزوم مطالعات مدیریت حوضه‌های آبریز جهت اتخاذ استراتژی‌های صحیح مدیریتی، بخصوص در مناطق بحران‌زده تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری تحت فشار، تراز آب زیرزمینی، دشت اهر، مدل‌های گردش عمومی جو، مدل WEAP.

مقدمه

آبیاری با توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار می‌باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند: سامانه‌های آبیاری نوین علاوه بر مزایای بسیار زیاد برای کشاورزان، سبب ایجاد تأثیرات بزرگی بر منابع آب حوضه‌های آبریز و آبخوان‌های دشت‌های کشور در مقیاس حوضه‌های آبریز می‌شود. در این زمینه تحقیقات زیادی در کشور انجام نشده است. زارع و همکاران (۱۳۹۶) با شبیه‌سازی

توزیع غیریکنواخت آب، افزایش تقاضای آب، محدودیت منابع آب و تنزل کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، بازده پایین بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، مدیریت منابع آب را پیچیده کرده است. با وجود چنین مشکلاتی، یکی از راهکارهای مدیریت تقاضا در بخش کشاورزی، بالا بردن بهره‌وری آب و افزایش بازده

توصیف کرده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق با ادامه روند کنونی، افت شدید آبخوان دشت بهار و کسری حجم مخزن آبخوان بدیهی خواهد بود و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب منطقه مستلزم آگاهی از تغییرات تراز و حجم آب‌های زیرزمینی در منطقه می‌باشد. امروزه به دلیل پیچیدگی و تعدد مصرف‌کنندگان، انجام ارزیابی منابع آب در مورد این طرح‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی منابع آب مقدور است. لذا در این مطالعه برای شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز اهر چای از بین مدل‌های مختلف قابل دسترس از جمله نرم‌افزار WEAP، GIS و LARS-WG استفاده شده است.

نرم‌افزار WEAP در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم توسعه یافت (بلانکو-گویتز، ۱۳۹۲). این نرم‌افزار جامع و پیشرفته برای شبیه‌سازی سیستمی منابع آب توسعه یافته است که در مدیریت منابع آب حوضه‌های آبریز کاربرد گسترده‌ای دارد. از نقطه نظر ابزار تحلیلی، تمام ابعاد مدیریت آب و چاره اندیشی‌های متفاوت را می‌تواند ارزیابی کند و مصارف چند منظوره و رقابتی را در یک سیستم منابع آب مدل کند (فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین امروزه پیش‌بینی بلندمدت متغیرهای اقلیمی برای اطلاع از میزان تغییرات و در نتیجه در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای تعدیل اثرات تغییر اقلیم مورد توجه اقلیم‌شناسان و پژوهش‌گران قرار گرفته است. بر همین اساس مدل‌های شبیه‌ساز گردش عمومی جو (GCM) توسعه یافته‌اند که می‌توانند پارامترهای اقلیمی را در ریزمقیاس پیش‌بینی نمایند. ^{۶۵} LARS-WG یک مدل ریزمقیاس نمایی آماری است؛ که مولد مصنوعی داده‌های آب و هواشناسی است. این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد، تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار رود نسخه اولیه LARS-WG در بوداپست طی سال ۱۹۹۰ به عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک‌های کشاورزی در کشور مجارستان ابداع شد. کارایی این مدل بوسیله زمف در سال ۱۹۹۰ در ۱۸ ایستگاه هواشناسی واقع در آمریکا و اروپا و آسیا مورد ارزیابی قرار گرفت (سمنوف و همکاران، ۱۹۹۸). مدل‌های

اثرات توسعه سیستم‌های آبیاری مدرن بر تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در استان خراسان رضوی نشان دادند؛ تحت شرایط عدم تغییر کل سطح زیرکشت، میزان تاثیر سرمایه‌گذاری در تجهیزات انتقال آب تاثیر بسیار بیشتری بر کنترل کسری مخزن آب‌های زیرزمینی دارد. از طرف دیگر، تنها با گسترش سیستم‌های نوین آبیاری در سطح مزارع و باغ‌ها، تعادل‌سازی در منابع آب زیرزمینی محقق نخواهد شد، بلکه افزایش راندمان بکارگیری سیستم‌ها از طریق بهبود مدیریت استفاده از آن‌ها و کنترل سطح زیرکشت نیز باید تحقق یابد. در این رابطه در برخی مناطق کاهش سطح زیرکشت اجتناب ناپذیر بود. همچنین اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار در مزارع و باغ‌ها باید همراه با نظارت و آموزش کافی باشد؛ تا امکان افزایش راندمان مصرف و همچنین افزایش تولید فراهم شود. والا جایگزینی روش‌های نوین آبیاری به جای سنتی، به تنهایی تاثیری کمی بر کاهش مصرف آب خواهد گذاشت. گسترش سیستم‌های نوین آبیاری با مدیریت فعلی مزارع زارعین توجیه اقتصادی ندارد و با در نظر گرفتن یارانه انرژی زیان‌آور نیز می‌باشد. علیرضا و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی سناریوهای توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم در دشت ورامین پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داده است توسعه بدون برنامه سامانه‌های آبیاری تحت فشار نه تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف آب نمی‌شود، بلکه منجر به تخریب آبخوان‌های زیرزمینی کشور نیز منجر می‌شود. احدی و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی بازده آبیاری مزرعه برای سه محصول عمده حوضه ریو گراند مکزیک با ترکیبی از روش‌های سنجش از راه دور و اندازه‌گیری‌های میدانی پرداخته‌اند. ارزیابی عملکرد آبیاری در این مطالعه نشان داد: پتانسیل بهبود بهره‌وری آبیاری در این حوضه قابل افزایش است اما بهبود راندمان مزرعه و بهره‌وری تحویل آب می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در منابع آب‌های زیرزمینی در نیومکزیکو شود. مهدوی و همکاران (۱۳۹۲) با شبیه‌سازی آبخوان دشت بهار-همدان، تاثیر افزایش بازده آبیاری از طریق سامانه‌های تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی را منفی

^{۶۵} Long Ashton Research Station Weather Generator

^{۶۴} General Circulation Model

ایجاد وضعیت بحرانی در آینده خواهد شد. در این مطالعه علت اصلی کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی تغییر کاربری اراضی بیان شده است. بلانکو و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از ترکیب مدل *WEAP* و مدل بهینه‌سازی *GAMS*، بیلان آب در حوضه آبریز گوادیانا واقع در کشور اسپانیا را مدل‌سازی کردند. آنها ضریب نش-ساتکلیف را برای ایستگاه‌های هیدرومتری در دوره واسنجی بین ۰/۷۳ تا ۰/۸۸ گزارش کردند در بررسی علل کاهش حجم دریاچه آرال و یا در منطقه کیتیوی کنیا برای بررسی و تحلیل تأثیر مخازن ذخیره‌ای بر وضعیت منابع آب، نرم‌افزار *WEAP* به کار رفته است. شلوت و همکاران (۲۰۱۲) از مدل *WEAP-MABIA* بیلان آبی در سوریه در حوضه آلپو با در نظر گرفتن تغذیه آب‌های زیرزمینی بررسی نمودند. اطلاعات هیدروژئولوژی مربوط به حوضه در مدل هیدروژئوئیک *MABIA* به کار برده شد و با استفاده از این روش نتایج تغذیه سالانه آب‌های زیرزمینی *(GWR)* در حوضه آبریز رودخانه کوایک واقع در حوضه آلپو برای سال‌های هیدروژئوئیک ۲۰۰۹-۲۰۱۰ ارزیابی گردید در حوضه دریاچه نایواشا در کنیا برای بررسی سیستم حوضه این دریاچه از نرم‌افزار *WEAP* با هدف یافتن علل و نوع مشکلات آبی استفاده شده است. محمدپور و همکاران (۱۳۹۶) در یک مطالعه بر روی رودخانه اهرچای نشان دادند توسعه آبیاری تحت فشار بدلیل کاهش تلفات نفوذ عمقی و رواناب سطحی و همچنین افزایش تلفاتی از جمله بادبردگی سبب کاهش جریانات بازگشتی و رواناب‌های سطحی به این رودخانه شده است. در یک تحقیق دیگر مالمیر و همکاران (۱۳۹۵) با ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم بر تخصیص آب کشاورزی در سطح حوضه قره‌سو با مدل *WEAP* و مدل گردش عمومی جو *HadCM3* نشان دادند تغییرات اقلیمی تحت سناریوی انتشار A2 نشان‌دهنده کاهش آبدهی در رودخانه و افزایش نیاز تأمین نشده بخش کشاورزی در دوره آبی می‌باشد. همچنین فرج‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) اثر تغییر اقلیم بر اطمینان‌پذیری تأمین آب پایین دست سد کرخه و راهکارهای سازگاری با آن را با نرم‌افزارهای *WEAP* و *LARS-WG* را مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند ساخت سدهای جدید به دلیل افزایش تخصیص آب در بالادست، می‌تواند اطمینان‌پذیری تأمین

تولید سناریوهای اقلیمی (*CSGs*) برای پیش‌بینی وضعیت دما و بارش از سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌کنند. در مدل *LARS-WG* از روش زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی بارش و سری‌های فوری برای تخمین درجه حرارت استفاده می‌شود. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرایندهای تصادفی و با میانگین و انحراف معیارهای روزانه مدل‌سازی می‌شوند. رفتار حاکم بر مقادیر مانده‌ها که از تفاضل مقادیر میانگین از مقدار مشاهداتی بدست می‌آیند، از طریق تحلیل خود همبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه به‌دست می‌آیند (سمنوف و همکاران، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲).

نرم‌افزار *WEAP* و *LARS-WG* در کشورهای مختلف در طرح‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی مورد استفاده قرار گرفته است، به-عنوان نمونه: آلانی و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر تغییرات آب و هوا در تأمین آب آبیاری از سد نبهان تونس را با استفاده از روش *MABIA* در نرم‌افزار *WEAP* و مدل اقلیمی *LARS-WG* بررسی کردند. نتایج حاکی از افزایش متوسط تبخیر و تعرق سالانه حدود ۱،۴٪ و کاهش بارندگی سالانه ۱۱،۴٪ بود که منجر به کاهش ۲۴٪ در آب‌های ورودی به حوضه آبریز می‌شد. همچنین، نتایج نشان داد میزان عرضه موجود در شرایط کنونی، تقاضای سیستم را برآورده نمی‌کند و تغییرات آب و هوایی می‌تواند وضعیت را بدتر کند، مگر اینکه برنامه‌ریزی بهتری برای استفاده از منابع آب انجام شود. سازانا و همکاران (۲۰۱۹) اثرات هیدروژئوئیک افزایش کشاورزی آبی ناشی از توسعه شهرنشینی بر روی آب‌های زیرزمینی در یک حوضه آبریز در کشور شیلی را با مدل تلفیقی *WEAP-MODFLOW* تحت شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار داده و نشان دادند؛ در مناطق نیمه خشک مانند کشور شیلی، توسعه شهرنشینی می‌تواند با افزایش مصرف آب شهری و افزایش آبیاری سبب افت سطح آب‌های زیرزمینی شده و اثرات منفی بر هیدروژئوئیک توامان آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز بگذارد. مرتضایی فریزه‌ندی (۱۳۹۴) اثرات تغییرات کاربری اراضی بر تراز آب‌های زیرزمینی را با استفاده از *WEAP* (در استان چهارمحال و بختیاری مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند بیلان آب زیرزمینی در منطقه منفی بوده و ادامه برداشت فعلی باعث

استراتژی توسعه آبیاری تحت فشار در کشور می‌باشد؛ که نتایج آن قابل تعمیم به تمام نقاط کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

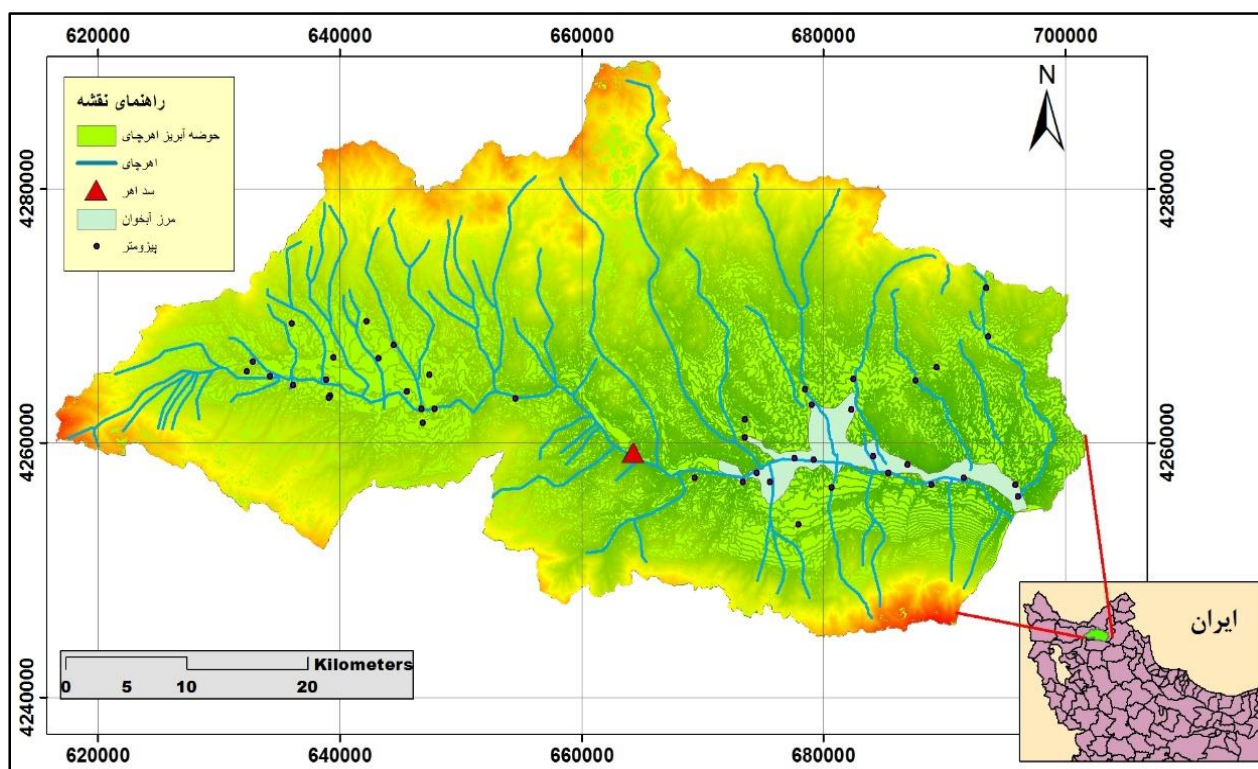
دشت اهر با مختصات جغرافیایی $46^{\circ} 19' 24''$ تا $48^{\circ} 19' 26''$ طول شرقی و $38^{\circ} 44' 56''$ عرض شمالی در استان آذربایجان شرقی واقع شده و ارتفاع کف آن بین ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ متر تغییر می‌کند. این دشت قسمتی از حوضه آبریز ارس می‌باشد. بر اساس آمار ۳۰ ساله منطقه (از سال ۱۳۶۲ تا سال ۱۳۹۲) اخذ شده از ارگان‌های ذیربط، متوسط نزولات جوی سالانه حدود ۳۲۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱/۱ می‌باشد. همچنین توپوگرافی منطقه کوهستانی و دارای اقلیم نیمه مرطوب سرد می‌باشد.

این منطقه از نظر تقسیمات زمین ساخت بخش غربی واحد البرز - آذربایجان را تشکیل می‌دهد و از روند ساختاری و ساختمانی زون مذکور پیروی می‌کند. از ویژگی‌های زون مذکور شباهت رخساره سنگ‌های پرکامبرین، کامبرین و اردوئین به ایران مرکزی می‌باشد. بررسی‌های اکتشافی در مطالعات منابع آب، شامل مطالعات ژئوفیزیک و حفاری‌های اکتشافی برای تعیین ابعاد، مشخصات، حدود گسترش سفره‌های آب زیرزمینی و ضرائب هیدرودینامیکی توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی صورت پذیرفته، که نشان می‌دهد: در حوضه آبریز اهر، پهنه‌های مسطح یا نسبتاً کم شیب که محل انباشت و تمرکز رسوبات ناپیوسته باشد، وسعت کمی دارند و به لحاظ گسترش سازندهای غیرقابل نفوذ و یا با نفوذپذیری کم، آبخون آبرفتی حائز اهمیت است. دشت اهر عمدتاً در اثر فعالیت جریان‌های سطحی و یا در اثر فرسایش و تخریب ارتفاعات بوجود آمده و از نهشته‌های جوان، تراس‌های رودخانه‌ای، مخروط افکنه‌های جدید، واریزه‌ها و یا رسوبات حاصل از فرسایش و تخریب ارتفاعات تشکیل شده است. ضخامت لایه آبدار این حوضه آبریز تا حدود ۲۵ متر مورد شناسایی قرار گرفته و عمدتاً در مرکز دشت و شامل آبرفت‌های ریز تا دانه متوسط حاشیه و بستر رودخانه اهر می‌باشد. آبخوان دشت اهر وسعتی معادل

آب کشاورزی پایین دست سد کرخه را تا کمتر از ۷۰ درصد کاهش دهد. همچنین استفاده مجدد از آب، با اطمینان‌پذیری ۹۱ درصد، به‌عنوان موثرترین راهکار برای سازگاری با تغییرات اقلیمی شناخته شد. از سایر مطالعات می‌توان ب احمدی و همکاران (۱۳۹۳) اشاره کرد که اثر تغییر اقلیم بر تخصیص منابع آب دشت مراغه را با استفاده از نرم‌افزارهای WEAP و LARS-WG مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین زین الدینی و همکاران (۱۳۹۶) از نرم‌افزارهای WEAP و LARS-WG جهت ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی تحت شرایط تغییر اقلیمی استفاده نمودند و به تشریح مدل‌ها پرداختند. مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد: هرچند در زمینه ارزیابی سیستم‌های آبیاری مطالعات متعددی انجام شده است ولی مطالعات بیشتر به سطح مزرعه محدود شد، یا به‌صورت سناریوسازی بوده و یا به یک موضوع خاص پرداخته شده است، و مطالعات کافی و جامعی در سطح حوضه آبریز با آمار و اطلاعات واقعی انجام نشده است. مسلم و بدیهی است به‌دلیل ماهیت متفاوت مدیریت آب در سطح یک حوضه آبریز و یک مزرعه، توسعه آبیاری تحت فشار نیز تأثیرات متفاوتی در سطح مزرعه و سطح حوضه آبریز دارد. پیچیدگی این مسئله ضرورت انجام مطالعات بیشتر در زمینه بررسی و ارزیابی تأثیرات استفاده از این سامانه‌ها در رفتار طبیعی هیدرولوژی حوضه‌های آبریز جهت مدیریت بهتر و صحیح‌تر منابع آب را آشکار می‌سازد. بنابراین در تحقیق حاضر وضعیت تغییرات تراز آبخوان دشت اهر در حوضه آبریز اهر چای متأثر از توسعه آبیاری تحت فشار در این منطقه، برای دو دوره قبل و بعد از تغییر روش‌های آبیاری از سطحی به تحت فشار با استفاده از نرم‌افزارهای WEAP و LARS-WG مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه، در این منطقه تأثیر توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار بر آب‌های زیرزمینی قبلاً مورد بررسی قرار نگرفته، همچنین به‌دلیل ویژگی‌های خاص توپوگرافی منطقه که امکان توسعه کشاورزی را بعد از تغییر روش‌های آبیاری از سطحی به تحت فشار نداده است؛ و وجود اطلاعات کامل آماری در منطقه، علت اصلی انتخاب آن به‌عنوان منطقه مورد مطالعه برای مدل‌سازی با نرم‌افزار WEAP و بررسی تأثیر توسعه

شکل ۱ موقعیت حوزه آبریز، آبخوان، رودخانه اهرچای و پیرومترها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مصارف کشاورزی این منطقه علاوه بر دریافت از رودخانه، بخصوص قبل از ایجاد شبکه آبیاری تحت فشار در این ناحیه از آبخوان دشت اهر، چمسه‌ها و چاهای نیمه عمیق موجود در این حوزه آبریز نیز تامین می‌شدند. طرح شبکه آبیاری-زهکشی ستارخان در پایین دست سد ستارخان اهر در سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۵ در این ناحیه اجرا شده است، که با اجرای آن نیمی از اراضی به سامانه-های آبیاری تحت فشار مجهز شده‌اند.

۵۲٫۳ کیلومترمربع دارد، که در طول رودخانه اهرچای با عرض حاشیه‌ای کم از اطراف رودخانه گسترده شده و از توان آبدهی نسبتاً مناسبی برخوردار است. آزمایشات پمپاژ چاه‌های اکتشافی صورت گرفته در منطقه نشان داده است: بیشترین مقدار قابلیت انتقال در محدوده مطالعاتی اهر بیش از ۴۸۶۰ مترمربع در روز و کمترین مقدار نیز به میزان ۴۴ مترمربع در روز با ضریب ذخیره ۵ درصد می‌باشد (مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوزه آبریز ارس، ۱۳۸۹). در این دشت حدود ۲۵ پیرومتر وجود دارد که از آمار و اطلاعات آن‌ها در این مطالعه استفاده شد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۹۳).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز اهرچای در ایران.

که در آن: h بار هیدرولیکی آبخوان، K هدایت هیدرولیکی آبخوان در جهات سه‌گانه مختصات آرتزین (x, y و z)، S_s ضریب ذخیره، W مقدار تخلیه و یا تغذیه آبخوان و t متغیر زمان می‌باشند. همچنین برای تهیه یک مدل موفق ریاضی با یک ساختار توصیفی درست و مناسب از یک آبخوان لازم است پارامترهای ورودی به درستی به مدل تعریف شوند. در این مطالعه ساخت مدل آب زیرزمینی توسط مدل $WEAP$ در یک دوره شبیه‌سازی

روش‌شناسی تحقیق

جهت بررسی رفتار و حل مسائل مربوط به آب‌های زیرزمینی لازم است رفتار فیزیکی آبخوان و محیط متخلخل آن شناسایی شود. معادله سه بعدی عمومی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی معروف به معادله لاپلاس در شرایط جریان ماندگار، به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

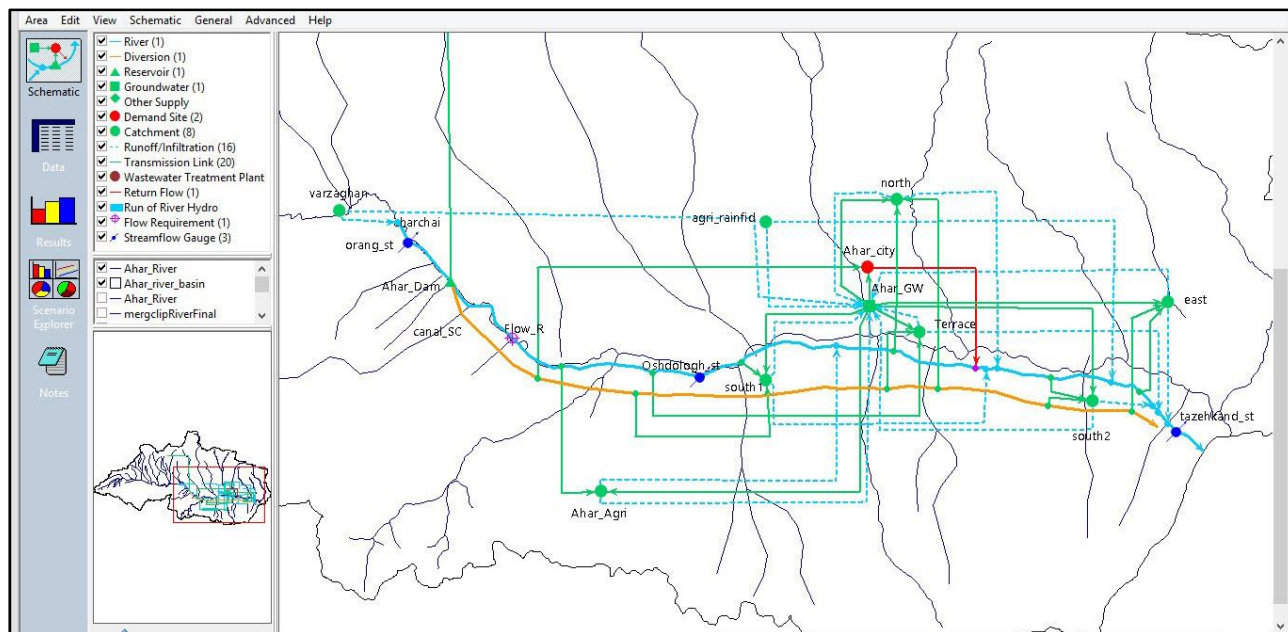
$$\text{return flow} = \text{inflow} * (1 - \text{consumption})$$

(۲)

در حوضه آبریز اهر چای، مصارف کشاورزی با ۸۴ درصد از مجموع تخلیه منابع آب زیرزمینی، بیشترین سهم مصارف را دارد، و ۱۶ درصد باقیمانده به ترتیب با ۱۲ و ۴ درصد به منظور مصارف شرب و صنعت منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد (مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه آبریز اهر چای، ۱۳۸۹). میزان دبی چاه‌های منطقه در سه گروه کمتر از ۵ لیتر در ثانیه، بین ۵ تا ۱۰ لیتر در ثانیه و بیشتر از ۱۰ لیتر در ثانیه می‌باشد، که اغلب چاه‌ها از دبی کمتر از ۵ لیتر در ثانیه برخوردارند، از نظر میزان تخلیه کل آن‌ها به مقدار ۶۷۹۷۶۲ مترمکعب در سال می‌باشد؛ که از این مقدار حدود ۶۲۰۳۱۹ مترمکعب (حدود ۹۱/۳ درصد) مربوط به چاه‌های کم عمق و حدود ۵۹۴۴۳ مترمکعب (حدود ۸/۷ درصد) مربوط به چاه‌های عمیق می‌باشد، میزان تخلیه آب برای نوع مصرف در چاه‌های کم عمق غالباً برای مصارف کشاورزی است. با توجه به روش آبیاری سطحی که عمدتاً غرقابی است، تلفات ناشی از مصارف کشاورزی زیاد بوده، و همه ساله حجم قابل توجهی از آب زیرزمینی از طریق تبخیر و زهکشی در مزارع و الحاق به جریان‌ات سطحی از دسترس خارج می‌شود. به علاوه حجم قابل توجهی نیز مجدداً به مخازن زیرزمینی برمی‌گردد. حجم برگشتی از محل مصارف کشاورزی در مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه آبریز اهر چای به طور متوسط حدود ۲۰ درصد از مجموع مصارف برآورد شده است. همچنین در مورد مصارف شرب شهری و روستایی و صنعت، آب برگشتی بین ۶۰ تا ۷۰ درصد مصارف اعلام شده است. شایان ذکر است؛ با توجه به دوره مصرف تخلیه چشمه‌ها و قنوات منطقه که عمدتاً از فروردین و اردیبهشت ماه شروع و تا مهر و یا نیمه آبان ماه ادامه می‌یابد؛ و لحاظ نمودن میزان متوسط تخلیه منابع منطقه، حدود ۵۰ درصد تخلیه کشاورزی چشمه‌ها و قنوات محدوده مورد مطالعه به عنوان مصارف آب در نظر گرفته شده است.

۱۶ ساله (مهر ۱۳۷۶ تا شهریور ۱۳۹۳) انجام شد (محمدپور و همکاران، ۱۳۹۵). پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات از ارگان‌های مربوطه در منطقه، برای، برای مدل‌سازی ابتدا محدوده مطالعاتی مورد نظر در مدل تعریف شده و نقشه‌های پایه مربوطه از جمله نقشه‌های هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در محیط GIS تهیه شده است. این نقشه‌ها شامل محدوده مورد نظر جهت برنامه‌ریزی منابع آب، مرزها، جانمایی رودخانه‌ها، منابع آب سطحی و زیرزمینی و تمامی عوارض مرتبط با طرح بود که در هدایت و ساخت سیستم و تعیین چارچوب اصلی مدل مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن اجزای مدل شامل مشخصات آبخوان دشت اهر و میزان برداشت از آن (از چاه‌های بهره‌برداری منطقه، آزمایش‌های پمپاژ، شبکه پیزومتری)، آمار هواشناسی و پارامترهای مرتبط با آن، وضعیت توپوگرافی و زمین شناسی منطقه، وضعیت آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها و غیره، سد ستارخان، نقاط برداشت و برگشت آب و میزان مصارف کشاورزی، شرب، صنعت و نیاز زیست محیطی (آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، ۱۳۹۳)، و موقعیت آن و سایر اطلاعات مورد نیاز مدل تعریف شد. بعد از ورود اطلاعات، عملیات واسنجی و صحت‌سنجی برای کل سیستم انجام شد.

برای محاسبه نیاز آبی مربوط به بخش کشاورزی، ابتدا الگوی کشت منطقه از ارگان‌های زیربط در منطقه اخذ گردید. سپس الگوی کشت و درصد سطح زیرکشت هر محصول به طور جداگانه تعیین شده و اراضی کشاورزی زراعی یا باغی همراه با نوع سیستم آبیاری مشخص شد. برای تعیین نیاز آبی، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار *NETWAT*، مقدار نیاز خالص آبیاری ماهانه برای هر محصول به دست آمد و با توجه به سطح زیرکشت هر محصول، مقدار نیاز خالص آبیاری کل به دست آمد. نیاز ناخالص آبی یا همان نیاز آبی گیاه، نیز با توجه به راندمان‌های آبیاری موجود در منطقه برای دو بخش نیاز کشاورزی زراعی آبی و محصولات باغی محاسبه شد. جریان بازگشتی با رابطه زیر در نرم‌افزار *WEAP* محاسبه می‌شود.

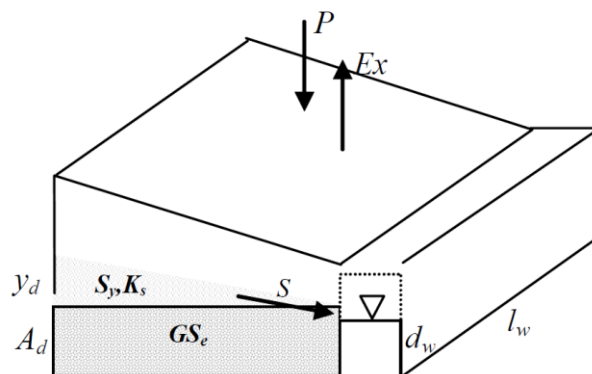


شکل ۲- اجزای شماتیک مدل سازی در حوضه مورد مطالعه.

زیرزمینی می تواند تعامل بین آن دو را بر هم زند (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ وینتر و همکاران، ۲۰۰۱). برای درک این تعامل مهم، ماژول آب زیرزمینی موجود در مدل WEAP، امکان برقراری جریان آب بین آبخوان و رودخانه و شبیه سازی اندرکنش آب های سطحی و زیرزمینی را فراهم می کند (شکل ۳).

مدل سازی آب های زیرزمینی در مدل WEAP

در چرخه هیدروژئولوژی، آب های سطحی و زیرزمینی بصورت دینامیکی باهم در ارتباطند. زمانی که سطح آب زیرزمینی افت پیدا می کند، جریان رودخانه آبخوان را تغذیه می کند و برعکس. کشاورزی آبی بدلیل برداشت همزمان آب از آب های سطحی و



شکل ۳- شماتیک اندرکنش آب های سطحی و زیرزمینی در مدل WEAP و متغیرهای آن.

آبخوان و Ad : عمق متوسط آبخوان است. اگر y_d : ارتفاع افت و خیز آبخوان باشد، ذخیره اولیه، GS ، در زمان $t=0$ از رابطه زیر بدست می آید:

$$GS(0) = GS_e + (y_d * h_d * l_w * S_y) \quad (4)$$

و ارتفاع عمودی افت و خیز آبخوان از رابطه زیر بدست می آید:

$$y_d = \frac{GS - GS_e}{(h_d * l_w * S_y)} \quad (5)$$

در مدل WEAP، آبخوان به شکل یک گوه متقارن در دو سوی رودخانه فرض شده است؛ که با رودخانه در تعادل است. این حجم متعادل در یک سمت، GS_e ، از رابطه زیر بدست می آید:

$$GS_e = h_d * l_w * A_d * S_y \quad (3)$$

که در آن، hd : فاصله نرمال گسترش آبخوان در طول رودخانه (m)؛ l_w : طول تعامل آبخوان با رودخانه (m)؛ S_y : ضریب ذخیره

ظرفیت رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی منطقه توسعه ریشه گیاه، جهت جریان ترجیحی، درصد آب برگشتی، نسبت تغذیه طبیعی و هدایت هیدرولیکی آبخوان‌ها. پس از واسنجی، بدون تغییر در متغیرهای ثابت و پارامترهای واسنجی شده، نتایج مدل با داده‌های مشاهده شده برای دوره شبیه‌سازی مقایسه و اعتبارسنجی شد. در این پژوهش برای ارزیابی کمی نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب نش-ساتکلیف^{۶۶} (NSE) و شاخص تطابق^{۶۷} (d) استفاده شد (محمدپور و همکاران، ۱۳۹۶).

بعد از واسنجی، آنالیز حساسیت انجام گرفت، با این عمل پارامترهای حساس مدل شناسایی گردید. در هر مدل‌سازی برخی از پارامترهای مدل نسبت به دیگر پارامترها حساس‌تر هستند، و با کوچکترین تغییر در مقادیر آن‌ها، اختلاف زیادی بین نتیجه شبیه‌سازی حاصل از مدل و مقادیر واقعی مشاهده می‌گردد. بنابراین منظور از تعیین پارامترهای حساس، برآورد و پیش‌بینی رفتار مدل است. تحلیل حساسیت با ثابت نگه داشتن تمام پارامترها در مقدار واقعی و با تغییر یک پارامتر در هر مرحله اجرا می‌شود. به‌طوری که تأثیر تغییرات هر پارامتر بر تابع هدف انتخاب شده مشخص شود.

در این پژوهش، با فراخوانی مقادیر واقعی پارامترهای مورد نظر در بخش آب زیرزمینی و تعیین حدود بالا و پایین برای آن‌ها و ثابت نگهداشتن سایر پارامترها، حساسیت مدل نسبت به آن‌ها سنجیده شد. به‌طور پیش فرض، مدل تحلیل حساسیت پارامترها را با تغییر در ۱۰ درصد پارامترها انجام می‌دهد. درصد تغییرات در میزان تغذیه و تخلیه آبخوان، به ازای تغییر هر کدام از پارامترها محاسبه شد. نتایج بیانگر آن است که حساس‌ترین پارامترها عبارتند از: ضریب نفوذ به دشت (ضریبی که با ضرب کردن آن در بارندگی منطقه، میزان تغذیه طبیعی به دشت به دست می‌آید) و ضریب آب‌دهی ویژه. همچنین آنالیز حساسیت در بخش آب‌های سطحی هم انجام گرفت. تغییر برخی از پارامترها تأثیر چشمگیری روی رژیم آبدی رودخانه داشت، از

که در صورت صعود بیشتر، آب به رودخانه برگشت پیدا می‌کند. نفوذ آب از رودخانه به آبخوان، S ، با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S = (K_s * \frac{y_d}{h_d}) * l_w * d_w \quad (۶)$$

که K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع آبخوان ($m/time$) و d_w : عمق خیس شده زیر لایه رودخانه (m) است که در زمان ثابت است. هدایت هیدرولیکی اشباع نرخ جریان آب عبوری به سمت آبخوان را کنترل می‌کند. بعد از برآورد میزان نفوذ، یک دوم حجم کل آبخوان از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$GS(i) = GS(i-1) + (1/2 R - 1/2 E - S) \quad (۷)$$

که در آن E : آب برداشت شده از آبخوان برای تامین تقاضاها و R : سهم شرکت‌پذیری حوضه در تغذیه آبخوان است. حجم کل ذخیره آبخوان برابر $2GS(i)$ می‌باشد.

هنگامی که یک آبخوان آبرفتی به مدل معرفی می‌شود، تغذیه آبخوان، R ، از طریق نفوذ عمقی انجام می‌گیرد، ($Vol/time$):

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (f_j k_j z_{1,j}^2) \quad (۸)$$

که در آن: A_j مساحت هر زیرحوضه مشار در تغذیه آبخوان، $z_{1,j}$ شماره هر زیرحوضه، k_j تخمینی از هدایت هیدرولیکی، $z_{1,j}$ ذخیره نسبی آب خاک، به‌عنوان کسری از ذخیره موثر کل، که بین ۰ تا ۱ متغیر است، مقدار ۰ نشان دهنده نقطه پژمردگی نهایی و ۱ ظرفیت مزرعه است و f_j یک پارامتر تنظیم شبه فیزیکی مربوط به خاک، نوع پوشش زمین و توپوگرافی است (یاتس و همکاران، ۲۰۰۵).

واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت: ضرورت انجام عملیات واسنجی و اعتبارسنجی به علت عدم قطعیت برخی از پارامترهای مدل می‌باشد. فرایند واسنجی و اعتبارسنجی در مدل $WEAP$ با ابزار $PEST$ انجام می‌شود. بعد از تشکیل فایل ورودی، مدل بر مبنای اطلاعات دبی ایستگاه‌های هیدرومتری و داده‌های پیزومتریک محدوده مطالعاتی، کالیبره گردید. پارامترهای واسنجی عبارتند از: ضریب گیاهی کاربری‌های غیرزراعی،

جمله اینکه، مدل بسیار به پارامترهای خاک حساس بوده و تغییر در پارامترهای از قبیل هدایت هیدرولیکی لایه سطحی خاک، شرایط رطوبتی خاک، نفوذ پذیری، ضریب مقاومت جریان بر رواناب تولیدی بسیار تاثیرگذار بودند.

در نهایت شبیه سازی یکپارچه منابع آب حوضه آبریز انجام شد. برای بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی، بیلان آب در مدل منطقه انجام شد. در محاسبه بیلان، مقادیر برداشت از هر کدام از منابع سطحی و زیرزمینی، مصارف مختلف، مقادیر رواناب و برگشت آب کشاورزی و فاضلاب به هر کدام از سامانه های رودخانه ای، مقادیر نشت از رودخانه ها به آب زیرزمینی و بلعکس، مقدار نفوذ عمقی (تغذیه آب زیرزمینی)، بارندگی، شرایط رطوبتی خاک و غیره در نظر گرفته شد.

تبادل بین رودخانه و دشت با توجه به عرض مقطع، تراز سطح آب رودخانه در بازه بین دو مقطع، تراز بستر، ضریب قابلیت انتقال بستر، سطح آب زیرزمینی، برداشت از رودخانه به آبخوان و غیره در تمامی بازه ها محاسبه و اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در مدل اعمال شد. نهایتاً مدل شبیه سازی شده مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت (محمودپور و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل ۲ اجزای مدل به صورت شماتیک در حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. فرایند مدل سازی آب های زیرزمینی در مدل WEAP به شرح زیر می باشد.

تعریف سناریو

با تعریف سناریوهای مختلف مدیریتی، تاثیر تغییرات ایجاد شده در سیستم مدیریت منابع و مصارف حوضه آبریز بر روی منابع آب سطحی و زیرزمین منطقه مشخص می شود. لذا در این راستا، پس از انجام واسنجی مدل و تطبیق مدل تهیه شده بر آبخوان تحت سناریوی مرجع، ۳ سناریو در مدل تعریف و برای دوره ۳۰ ساله آتی اثرات آن ها بررسی شد.

سناریوها بترتیب شامل: ۱- سناریوی آبیاری سطحی با مدیریت برتر زراعی ۲- سناریوی تغییر الگوی کشت پرمصرف به کم مصرف و ۳- پیش بینی برای آینده با شرایط تغییر اقلیم و توسعه آبیاری تحت فشار بودند. در سناریوی اول فرض شد آبیاری

تحت فشار در منطقه توسعه پیدا نکرده و کشاورزی منطقه با مدیریت برتر زراعی شامل عملیات تسطیح، آبیاری سطحی مدرن، توسعه شبکه آبیاری مدرن سطحی و ... تحت شرایط اقلیمی واقعی انجام شد؛ به طوری که برای آبیاری سطحی بازده حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد در نظر گرفته شد. در سناریوی دوم، الگوی کشت زراعی در منطقه از پرمصرف به کم مصرف تغییر یافت. الگوی کشت کم مصرف از لحاظ نیاز آبیاری، مثلاً گندم یا جو و الگوی کشت پرمصرف از نظر نیاز آبی مانند یونجه و چغندر قند می باشند. با توجه به اینکه تنها کشت پرمصرف منطقه یونجه بود، در این سناریو این محصول بطور فرضی از لیست الگوی کشت منطقه حذف و با گندم و جو جایگزین شد. کشاورزی منطقه بدون تغییر در سطح زیرکشت، نوع سیستم آبیاری و تحت شرایط اقلیمی واقعی فرض شد.

سناریوی سوم برخلاف سناریوهای دیگر با هدف پیش بینی برای آینده با شرایط تغییر اقلیم ساخته شد. برای انجام این سناریو، ابتدا شرایط اقلیمی آینده منطقه با مدل LARS-GW پیش بینی شده و سپس نتایج حاصل از آن به مدل اصلی انتقال داده شده و در نهایت شرایط منطقه برای بررسی تغییرات در شرایط آبی شبیه سازی شد. بدین منظور، اطلاعات مورد نیاز منطقه از مدل گردش عمومی ۳ CGCM^{۶۸} و ۳ HadCM^{۶۹} شامل مقادیر بارندگی و درجه حرارت و ساعات آفتابی، برای دوره (۲۰۳۰ - ۲۰۱۱) تحت سناریوی انتشار موجود در مدل A2، A1B و B1 ریزمقیاس شدند.

برای بررسی تاثیر این تغییرات بر جریان رواناب در رودخانه اهر چای نتایج شبیه سازی به مدل WEAP وارد شد. در این سناریو فرض شده است، نوع سیستم های آبیاری و راندمان آن ها، همچنین الگوی کشت و سطح زیرکشت منطقه برای دوره ۳۰ سال آینده هیچ گونه تغییر نداشته و شبیه سازی فقط برای تغییرات اقلیمی آتی در شرایط ادامه روند کنونی منطقه صورت گرفت.

نتایج و بحث

^{۶۹} Hadley Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model

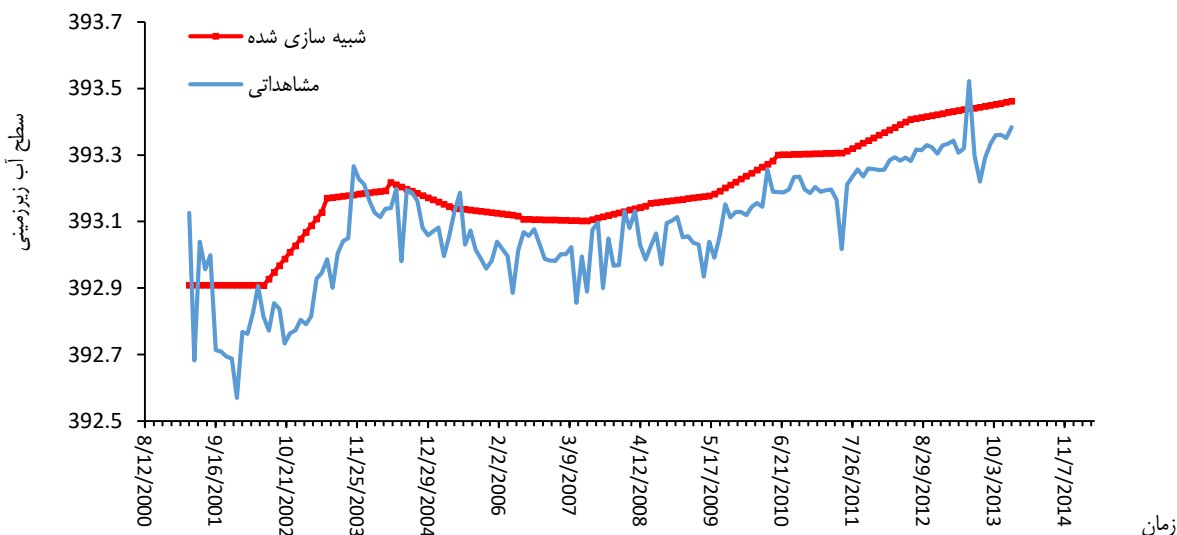
^{۶۸} Coupled Global Climate Model

با توجه به واسنجی انجام گرفته، مدل WEAP برای سناریوی مرجع حوضه مورد مطالعه در یک دوره ۱۶ ساله ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۳ اجرا شد و نتایج مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۳ ارائه شد (محمدپور و همکاران، ۱۳۹۵). همان‌طور که از مقادیر جدول ۲ مشهود است؛ واسنجی مدل با داشتن شاخص بهره‌وری نش-ساتکلیف بین ۰/۸۰ تا ۰/۸۸ نتایج خوب و معقولی را ارائه کرد.

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های ارزیابی نتایج مدل

مدل	نام ایستگاه هیدرومتری	واسنجی				اعتبارسنجی			
		R ² (-)	RMSE (m ³ /s)	NSE (-)	D (-)	R ² (-)	RMSE (m ³ /s)	NSE (-)	d (-)
اول (آبیاری) سطحی	اورنگ	۰/۹۵	۰/۴۵	۰/۸۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۳۰	۰/۸۸	۰/۹۹
	تازه کند	۰/۹۶	۰/۳۴	۰/۸۰	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۳۵	۰/۸۷	۰/۹۹
	اورنگ	۰/۹۵	۰/۳۱	۰/۸۵	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۳۰	۰/۸۶	۰/۹۹
دوم (آبیاری) بج-	تازه کند	۰/۹۶	۰/۲۳	۰/۸۳	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۳۰	۰/۷۸	۰/۹۷
آبخوان		۰/۸۵				۰/۸۷			

همچنین مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده سطح ایستابی در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، سطح آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده از



شکل ۳- مقایسه سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل

از خروجی‌های مهم مدل WEAP پارامترهای بیلان آب می‌باشد. بررسی نتایج بیلان آب حوضه در هر دو دوره نشان داد: کل آب قابل استفاده در حوضه آبریز اهرچای در دوره آبیاری سطحی برابر ۱۱۶۵۰/۴۱ میلی‌متر در سال (مجموع سالیانه کل دوره آماری) و در دوره آبیاری تحت فشار برابر ۳۳۸۶/۶۶ میلی‌متر (مجموع سالیانه کل دوره آماری) بود. رواناب/ نفوذ کل (حجم از خروجی‌های مهم مدل WEAP پارامترهای بیلان آب می‌باشد. بررسی نتایج بیلان آب حوضه در هر دو دوره نشان داد: کل آب قابل استفاده در حوضه آبریز اهرچای در دوره آبیاری سطحی برابر ۱۱۶۵۰/۴۱ میلی‌متر در سال (مجموع سالیانه کل دوره آماری) و در دوره آبیاری تحت فشار برابر ۳۳۸۶/۶۶ میلی‌متر (مجموع سالیانه کل دوره آماری) بود. رواناب/ نفوذ کل (حجم غیرمصرفی) در آبیاری سطحی (۶۵۷۰/۷۰ میلی‌متر (مجموع سالیانه کل دوره آماری))، تقریباً هفت برابر بزرگتر از آبیاری تحت فشار (۱۰۲۶/۹۷ (مجموع سالیانه کل دوره آماری)) بود. درحالیکه تبخیر-تعرق کل (حجم مصرفی) در آبیاری تحت فشار (۶۴۰۳/۷۴ میلی‌متر (مجموع سالیانه کل دوره آماری)) نسبت به آبیاری سطحی (۵۰۸۷/۸۱ میلی‌متر بر سال (مجموع سالیانه کل

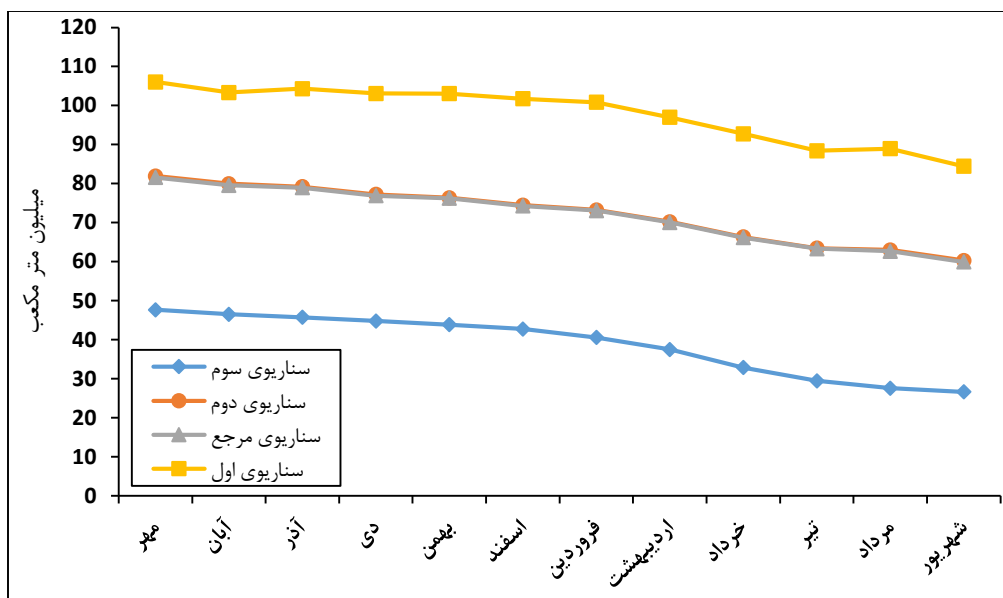
دوره آماری)) بالاتر بود. تبخیر-تعرق مفید و اثرات منفی $WDEL_{70}$ در آبیاری تحت فشار این اختلاف را توجیه می‌کند. تبخیر-تعرق محصول یا مفید بمیزان ۳۱٪ در آبیاری سطحی و ۵۷٪ در آبیاری تحت فشار از کل آب قابل استفاده بود. تقریباً تمام آب‌های بازگشتی ناشی از رواناب و نفوذ در حوضه به رودخانه بازگشته است (۹۳٪ و ۹۸٪ به ترتیب در سطحی و تحت فشار). مجموع آب‌های خارج شده از حوضه در آبیاری تحت فشار حدود ۵۲٪ بالاتر از آبیاری سطحی بود که بدلیل الگوی کشت بسیار متراکم‌تر، تامین بهتر نیاز آبی محصولات و $WDEL$ بزرگتر در آبیاری بارانی می‌باشد. همچنین میزان کل آب مصرف شده در حوضه بدلیل پایین بودن حجم‌های رواناب/ نفوذ غیرقابل بازیافتی (کمتر از ۲۰٪ از کل آب قابل استفاده) در هر دو نوع آبیاری مشابه هم بودند (محمدپور و همکاران، ۱۳۹۶).

نتایج اعمال سناریو در مدل و مقایسه آن‌ها

نتایج بدست آمده از مقایسه سناریوها در مدل $WEAP$ نسبت به سناریوی مرجع (شکل ۴ و جدول ۳) نشان می‌دهد متوسط سالانه بلند حجم آبخوان در شرایط سناریوی اول ۲۵/۹۴٪ افزایش، در شرایط سناریوی دوم ۰/۲۵٪ افزایش، در شرایط سناریوی سوم ۳۳٪ کاهش خواهد یافت. این مطلب بدین معنی است، در صورتی که در منطقه آبیاری تحت فشار توسعه پیدا نمی‌کرد و بجای آن آبیاری سطحی با مدیریت برتر صورت می‌گرفت رواناب سطحی تولید شده در حوضه و همچنین جریان بازگشتی ناشی از کشاورزی در حوضه بیشتر از مقدار معادل آن

در شرایط آبیاری تحت فشار می‌شد که بدلیل پایین بودن بازده آبیاری در شرایط کنونی، بخش زیادی از آب مصرفی از دسترس خارج شده و به هدر می‌رود. همچنین در شرایط سناریوی دوم به دلیل اینکه درصد کشت محصولات پرمصرف بالا نمی‌باشد اعمال این سناریو بر شرایط هیدروژئولوژیک حوضه تاثیر چندانی نداشت. در شرایط سناریوی سوم، پیش‌بینی می‌شود با ادامه روند کنونی (اجرای سامانه‌های آبیاری تحت فشار) در شرایط اقلیمی آینده، حجم آبخوان بطور متوسط ۳۳٪ کاهش خواهد یافت. همانطور که ملاحظه می‌شود ادامه روند کنونی برداشت از آبخوان، سبب کاهش حجم آبخوان، بخصوص در ماه‌های خشک سال، در اواخر تابستان شده که با توجه به کم آب بودن این منطقه، شرایط خوبی را در آینده نخواهد داشت و با بحران کمبود آب مواجه خواهد شد.

کاهش حجم و عمق آبخوان، سبب افزایش هزینه‌های تولید و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی شده، که بنوبه خود سبب کاهش بازده کشاورزی و افزایش مهاجرت شده، و تبعاتی از جمله افت آبخوان و نشست زمین خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت در صورتی که هرگونه تغییری در کشاورزی منطقه اعم از تغییر الگوی کشت یا تغییر نوع سیستم آبیاری بوجود بیاید بر هیدروژئولوژی حوضه آبریز بسیار تاثیرگذار بوده و تراز آب زیرزمین و حجم آبخوان دشت اهر در حوضه متاثر از جریانات بازگشتی ناشی از کشاورزی در حوضه تغییر پیدا خواهد نمود.



شکل ۴- مقایسه سناریوها به ترتیب برای متوسط ماهانه حجم آبخوان در کل دوره پیش‌بینی.

جدول ۳- خلاصه نتایج سناریوسازی در مدل در منطقه مورد مطالعه

سناریو	مقایسه نتیجه سناریو اعمال شده نسبت به متوسط سالانه بلند مدت حجم آبخوان در سناریوی مرجع
سناریوی اول	۲۵/۹۴ درصد افزایش
سناریوی دوم	۰/۲۵ درصد افزایش
سناریوی سوم	۳۳ درصد کاهش

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل هیدروژئولوژیک حوضه آبریز اهرچای به منظور بررسی اثرات توسعه آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی این حوضه توسعه یافت. به منظور شبیه‌سازی مدل‌های هیدروژئولوژیک حوضه مورد مطالعه از روش رطوبت خاک مدل WEAP استفاده شد. کل دوره شبیه‌سازی ۱۶ سال بود. نتایج ارزیابی بر اساس شاخص‌های آماری عملکرد خوب مدل را نشان داد. بعد از مدل‌سازی جهت‌نشان دادن تأثیر تغییرات ایجاد شده بر روی آبخوان دشت اهر در مدل سه سناریو توسعه داده شد. مقایسه نتایج اجرای سناریوهای مطرح شده در مدل نشان داد که توسعه آبیاری تحت فشار سبب تغییر کاهش جریان‌ات بازگشتی کشاورزی به حوضه و کاهش چشم‌گیر حجم آبخوان و افت تراز آب زیرزمینی دشت اهر شده و تأثیرات منفی بر هیدروژئولوژی آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز اهرچای گذاشته

هدف از مقایسه سناریوها در این تحقیق، برآورد هدف اصلی اجرای این تحقیق، یعنی ارزیابی تأثیر توسعه آبیاری تحت فشار بر تغییرات تراز و حجم آبخوان دشت اهر بود. همان‌طور که در بیان نتایج و مقایسه سناریوها گفته شد: مقایسه نتایج اجرای سناریوهای مطرح شده در مدل نشان داد: توسعه آبیاری تحت فشار سبب تغییر کاهش جریان‌ات بازگشتی کشاورزی به حوضه و کاهش چشم‌گیر حجم آبخوان شده و تأثیرات منفی بر هیدروژئولوژی آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز اهرچای گذاشته است. این نتایج با نتایج مطالعات بسیاری از محققان از جمله مهدوی و همکاران، ۱۳۹۲؛ احدی و همکاران، ۲۰۱۳؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ علیزاده و همکاران، ۲۰۱۴؛ مرتضایی فریزه‌ندی و همکاران، ۱۳۹۴؛ نیکبخت و نجیب، ۲۰۱۵؛ بلانکو و همکاران، ۲۰۱۳؛ محمدپور و همکاران، ۱۳۹۶ و بسیاری تحقیقات دیگر تطابق دارد.

است. بر اساس نتایج می‌توان گفت توسعه آبیاری تحت فشار در منطقه مورد مطالعه بر هیدرولوژی حوضه آبریز تاثیر منفی داشته است. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات مهدوی و همکاران، ۱۳۹۲؛ احدی و همکاران، ۲۰۱۳؛ مرتضایی فریزندی و همکاران، ۱۳۹۴؛ نیکبخت و نجیب، ۲۰۱۵؛ بلانکو و همکاران، ۲۰۱۳؛ محمدپور و همکاران، ۱۳۹۶؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۳ و علیزاده و همکاران، ۱۳۹۳ و بسیاری تحقیقات دیگر مطابقت دارد. همچنین با توجه به قابلیت خوب مدل WEAP در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک در حوضه‌های آبریز، این مدل برای برنامه‌ریزان منابع آب امکان بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی قبل از اجرای طرح‌ها را بدون صرف هزینه سنگین و در کمترین زمان ممکن فراهم می‌نماید. لذا استفاده از مدل WEAP جهت شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب کشور توصیه می‌شود. نتایج این تحقیق حاکی از این است که می‌توان از این مدل تغییرات سیستم آبیاری را در سطح حوضه مورد رفتارسنجی قرار داد و واکنش هر کدام را با دقت خوبی ارزیابی نمود. با این مدل‌سازی امکان بررسی سناریوهای تغییر اقلیم، تغییر الگوی کشت، مدیریت منابع آب و و غیره در آینده حوضه مورد مطالعه و حوضه‌های مشابه قابل بررسی است.

منابع

احمدی، ف.، پناهی، م.، میثاقی، ف.، ۱۳۹۳. بررسی تأثیر اقلیم بر تخصیص منابع آب دشت مراغه با استفاده از نرم افزار WEAP، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه زنجان.

زارع، ش.، محمدی، ح.، صبحی، م.، ۱۳۹۶. شبیه‌سازی اثرات توسعه سیستم‌های آبیاری مدرن بر تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی خراسان رضوی. نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی. ۳۱(۲): ۱۹۵-۱۷۵.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی. ۱۳۹۳. گزارش بیان محدوده مطالعاتی اهر چای.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی. ۱۳۸۹. مطالعات بهنگام‌سازی بیان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز ارس.

علیزاده، ح.، لیاقت، ع.م.، سهرابی، ت.، ۱۳۹۳. ارزیابی سناریوهای توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی با

خاک. ۳(۴): ۱۵-۱.

المیر، م.، محمدرضاپور، ا.ا.، شریف آذری، س.، ۱۳۹۵. ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم بر تخصیص آب کشاورزی در سطح حوضه قره‌سو با مدل WEAP. مهندسی آبیاری و آب. ۶(۲۳): ۱۵۵-۱۴۳.

محمدپور، م.، زینالزاده، ک.، رضوردی‌نژاد، و.، حصاری، ب.، ۱۳۹۵. واسنجی و اعتبار سنجی مدل WEAP در شبیه‌سازی اثر تغییر سیستم‌های آبیاری روی پاسخ هیدرولوژیک حوضه آبریز اهر چای. مجله اکوهیدرولوژی. ۳(۳): ۴۷۷-۴۹۰.

محمدپور، م.، زینالزاده، ک.، رضوردی‌نژاد، و.، حصاری، ب.، ۱۳۹۶. ارزیابی پاسخ‌های هیدرولوژیک حوضه آبریز به توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار (مطالعه موردی: حوضه آبریز اهر چای). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۱۱): ۶۲۶-۶۳۵.

مرتضایی فریزندی، ق.، کهندل، ا.، ۱۳۹۴. بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: چهارمحال بختیاری). علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۹(۳۱): ۱۰-۱.

فرج‌زاده، م.، مدنی لاریجانی، ک.، مساح، ع.، داوطلب، ر.، ۱۳۹۳. اثر تغییر اقلیم بر اطمینان‌پذیری تأمین آب پایین دست سد کرخه و راهکارهای سازگاری با آن. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۳(۳): ۶۳-۴۹.

مهدوی، م.، فرخزاده، ب.، سلاقچه، ع.، ملکیان، آ.، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی آبخوان دشت بهار- همدان و بررسی سناریوی مدیریتی با استفاده از مدل PMWIN. مجله پژوهش‌های آبخیزداری. ۹۸: ۱۰۸-۱۱۶.

Ahadi, R., Samani, Z., Skaggs, R. 2013. Evaluating on-farm irrigation efficiency across the watershed: A case study of New Mexico's Lower Rio Grande Basin. *Agricultural Water Management*, 124, 52- 57.

Allani, M., Mezzi, R., Zouabi, A., Béji, R., Joumade-Mansouri, F., Hamza, M. E., & Sahli, A. (2019). Impact of future climate change on water supply and irrigation demand in a small mediterranean catchment. Case study: Nebhana dam system, Tunisia. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.131>.

Azari, A., Akhoond A. M., Radmanesh, F., Haghighi, A., 2015. Groundwater-Surface Water Interaction Simulation in Terms of Integrated Water Resource Management (Case Study: Dez Plain), *Irrigation Science & Engineering* 38 (2), 33-47.

Blanco-Gutiérrez, I., Varela-Ortega, C., Purkey, D.R., 2013. Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach. *Journal of environmental management*; 128, 144-160

Liang, X., Xie, Z. Huang, M., 2003. A new parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water

- Semenov, M.A., Barrow, E.M., Lars-Wg, A., 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Version 3.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., Richardson, C.W., 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate research*, 10, 95-107.
- Studies of comprehensive water plan of country in the Aras basin, 2010.
- Winter, T. (2001). "Ground water and surface water: the linkage tightens, but challenges remain. *Hydrologic Processes*, 15, 18: 3605-06.
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A. and Galbraith, H., 2005b. WEAP21: A demand-, priority-, and preference driven water planning model. Part 2: Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, 30(4); 501-512.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. and Huber-Lee, A., 2005a. WEAP21: A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4): 487-500.
- Zayn al-Dini, S., Anvari, S., Bagheri, M.H., Zahmatkesh, Z., 2017. Using WEAP Model to Assess Different Management Scenarios under Climate Change Conditions, The 14th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman.
- budgets with the variable infiltration capacity (VIC) land surface model. *Journal of Geophysical Research*, 108: D16.
- Mahdavi, M., Farokhzadeh, B., Salajeghe, A., Malakian, A., 2012. Assistant Professor of Tehran University, Sourì M., Simulation of Hamedan- Bahar aquifer and investigation of management scenarios by using PMWIN, *Journal of Watershed Management Research*, 98, 108-116.
- Nikbakht, J., Najib, Z., 2015. The Effect of Increasing Irrigation Efficiency on Groundwater Fluctuations (Case Study: Ajabshir Plain -East Azarbaijan). *Journal of Irrigation and Water Management*, 5(1), 115-127.
- Raskin, P., Hansen, E., Zhu, Z., 1992. Simulation of water supply and demand in the Aral Sea region. *Journal of water International*. 17, 55-67.
- Sanzana, P., Gironás, J., Braud, I., Muñoz, J. F., Vicuña, S., Reyes-Paecke, S., ... & Hitschfeld, N. (2019). Impact of Urban Growth and High Residential Irrigation on Streamflow and Groundwater Levels in a Peri-Urban Semiarid Catchment. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55(3), 720-739.
- Schlote, A., Hennigs, V. and Schaffer, U., 2012. Water Balance for the Aleppo Basin, Syria Implications of Land Use on Simulated Groundwater Abstraction and Recharge. *International Conference Hydrogeology of Arid Environments*. Federal Institute for Geosciences.