

مدلسازی آبخوان دشت توپسرکانبا مدل MODFLOW و ارزیابی وضعیت

هیدروژئولوژیکی تحت شرایط موجود و آینده

عبدالله طاهری تیزرو*^۱، مرتضی کمالی^۲

چکیده

منابع آب زیرزمینی یکی از با ارزش‌ترین منابع طبیعی محسوب می‌شوند؛ از همین رو مدلسازی آب زیرزمینی در سال‌های اخیر به عنوان ابزاری قدرتمند در بحث‌های مدیریتی، بهینه‌سازی مصرف و پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی مطرح شده است. هدف از این مطالعه، مدلسازی آبخوان دشت توپسرکان با مدل MODFLOW در قالب نرم افزار PMWIN به عنوانی مدلی کارآمد در مباحث آب زیرزمینی می‌باشد. شبیه‌سازی برای یک دوره یکساله شامل ۱۲ دوره تنش یک ماهه (مهر ۸۷ تا شهریور ۸۸) انجام گردید. مدل مذکور برای ۱۰ ماه اول دوره شبیه‌سازی، واسنجی و با داده‌های مشاهداتی دو ماه باقیمانده، صحت‌سنجی گردید. نتایج واسنجی در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار، نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه از حوالی شمال شرقی دشت به سمت مناطق میانی و خروجی دشت واقع در جنوب غربی آن افزایش می‌یابند. پس از صحت‌سنجی مدل و حصول اطمینان از توانایی مدل در پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان، اقدام به تعریف دو سناریوی ده ساله گردید. در سناریوی نخست، ادامه روند کنونی برداشت آب زیرزمینی و در سناریوی دوم، افزایش راندمان آبیاری منطقه به میزان ۲۰ درصد و در نتیجه کاهش برداشت‌ها مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل از هر دو سناریو، نشان دهنده کاهش سطح ایستابی در پیزومترهای دشت به جز در دو پیزومتر ۳ و ۶ است که با افزایش مواجه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی، آب زیرزمینی، توپسرکان، سناریو، MODFLOW

^۱دانشیار، گروه مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایمیل: ttizro@yahoo.com تلفن: ۰۹۱۸۱۱۹۰۰۵۲
^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
 ایمیل: Morteza_Kamali90@yahoo.com تلفن: ۰۹۱۲۰۳۵۷۷۳۵

مقدمه

مستعد، استرس کمتری را به آبخوان وارد می‌کند. محل‌های پیشنهادی برای سازه‌های استحصال آب باران، سبب کاهش افت غالب در آب زیرزمینی می‌گردد. تیزرو و همکاران (۲۰۱۱) از مدل MODFLOW برای پیش‌بینی واکنش آبخوان به تغذیه مصنوعی انجام شده از طریق سازه تغذیه احداثی و ۱۳ چاه حفر شده، در دو حالت ماندگار و غیرماندگار و تحت دو سناریوی متفاوت در حوضه بهار استان همدان، استفاده نمودند. با در نظر گرفتن شرایط نرمال تغذیه توسط سازه‌ها، سطح ایستابی در محدوده مورد مطالعه به میزان ۱/۷ m افزایش یافت. نتایج این مطالعه نشان داد که احداث سازه‌های تغذیه مصنوعی در مدیریت آب زیرزمینی، در بخش‌هایی از دشت بهار مفید خواهد بود.

هدف از این مطالعه، مدل‌سازی و ارزیابی شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW در دشت تویسرکان، استان همدان می‌باشد. بررسی پتانسیل توسعه آب‌های زیرزمینی با توجه به در نظر گرفتن ویژگی‌های آبخوان منطقه، پیش‌بینی وضعیت آبخوان طی چند سال آینده در راستای تدوین برنامه‌ریزی‌های متناسب با نحوه تغییرات آبخوان و تعیین مناطق حساس و بحرانی آبخوان به منظور کنترل برداشت‌های غیر مجاز از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت تویسرکان در استان همدان با وسعت ۸۰۵ کیلومتر مربع، یکی از دشتهای حوضه علیای رودخانه کرخه محسوب می‌شود و در جنوب کوه الوند قرار گرفته است. این دشت بین طول‌های جغرافیایی ۵° ۴۸' و ۳۵° ۴۸' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۲° ۳۴' و ۴۲° ۳۴' شمالی واقع شده است. وسعت آبخوان معادل ۱۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد و ۶۵۵ کیلومتر مربع دیگر نیز شامل ارتفاعات حاشیه دشت است. شیب عمومی دشت از شمال شرق به

مدلسازی آب زیرزمینی در سال‌های اخیر به عنوان ابزاری قدرتمند در مباحث مدیریتی، مطرح شده و در بهینه‌سازی مصرف و پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی، به کمک مدیران و برنامه‌ریزان شتافته است (ژو و لی، ۲۰۱۱؛ جوسرت و همکاران، ۲۰۰۹؛ لاروک و همکاران، ۲۰۰۸). مدل عددی جریان آب زیرزمینی، MODFLOW، (مک‌دونالد و هارباگ، ۱۹۹۶) دارای استفاده فراوانی در سرتاسر جهان برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی (رجانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ میتلستت و همکاران، ۲۰۱۱؛ السلاما و همکاران، ۲۰۱۱)، مدیریت سطح آب زیرزمینی و استخراج آن (لثو و همکاران، ۲۰۱۰، لثو و همکاران، ۲۰۰۶) است. مدل MODFLOW شبیه‌ساز سه بعدی جریان آب زیرزمینی از طریق روش عددی تفاضلات محدود بوده و قادر است که جریان آب زیرزمینی را تحت شرایط پیچیده هیدرولیکی و با فرایندهای گوناگون هیدرولوژیکی شبیه‌سازی نماید (ژو و لی، ۲۰۱۱).

مایرلس^۹ (۲۰۱۲) به بررسی مشکلات ناشی از شوری خاک و سطوح ایستابی بالا در مناطق تحت آبیاری دره جزریلواقع در سرزمین‌های اشغالی پرداخت. در این مطالعه از مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW برای شبیه‌سازی سطوح آب زیرزمینی و از تکنیک‌های GIS برای تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل جریان آب زیرزمینی و ارزیابی نواحی تحت خطر شوری تحت دو شرط هیدروژئولوژیکی و در طول فصل خشک، بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که ۳۲۵ ha از منطقه دارای شوری خاک بالاست و ۶۲۷۵ ha از منطقه دارای پتانسیل شوری می‌باشد. شیشیر^۱ و همکاران (۲۰۱۱) مدل عددی MODFLOW را به همراه GIS در زیرحوضه رودخانه بانگانگادر هند توسعه دادند. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، سناریوهای مختلف با تغییر دبی چاه‌ها ارائه شد تا محل‌سازهایی به منظور استحصال آب باران مشخص گردد. نتایج نشان داد که افزایش دبی چاه‌ها در نواحی

^۶Mittelstet^۷Al-Salamah^۸Liu^۹Mirlas^۱ Shishir^۱Zhou and Li^۲Jusseret^۳Larroque^۴McDonald and Harbaugh^۵Rejani

$$F = \sum_{i=1}^{12} 0.8(R - C \log E) \quad (1)$$

که F میزان نفوذ سالیانه بر حسب E mm تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه بر حسب R mm، بارندگی ماهیانه بر حسب C mm ضریب ثابت وابسته به دما که از رابطه $C = 0.6917T^{0.3981}$ به دست می‌آید. T نیز متوسط درجه حرارت ماهیانه ($^{\circ}C$) می‌باشد. در این معادله E بر اساس روش تورنت‌وایت محاسبه گردیده و در فرمول فائو مورد استفاده قرار گرفته است. پس از انجام محاسبات بالا، ضریب ۱۱ درصد برای نفوذ بارش در نظر گرفته شد. در مطالعات پیشین ضریب نفوذ ۱۵ درصد برای بارش‌های روی داده در منطقه در نظر گرفته شده بود (بی‌نام، ۱۳۸۸).

مدلسازی آبخوان دشت توپسرکان

برای شبکه بندی آبخوان دشت توپسرکان، از سلول‌هایی با ابعاد 500×500 متر برای پوشش آبخوان استفاده گردید. در پایان شبکه‌ای متشکل از ۳۵۶۴ سلول (66×54) تهیه گردید. در مدل حاضر بنابر شرایط آبخوان (نبود دریاچه و یا رودخانه با سطح آب ثابت بر روی زمین) سلول با بار ثابت وجود نداشته و مدل متشکل از شبکه‌ای با سلول‌های فعال و غیرفعال است. یکی از مهمترین مراحل ساخت مدل، شناخت درست مرزها و اعمال شرایط مرزی می‌باشد. مرزهای شبیه‌سازی شده در این مطالعه، شامل مرز بدون جریان^۱ و مرز بار عمومی^۲ هستند.

یکی از موارد مورد نیاز در ساخت مدل، داشتن ضخامت هر لایه می‌باشد. از آنجا که هم کف و هم سقف لایه‌ها یک سطح مستوی نبوده و دارای پستی و بلندی می‌باشد، از این رو ضخامت لایه در نقاط مختلف، متغیر بوده که بایستی محاسبه و وارد مدل گردد. فایل‌های ورودی به مدل PMWIN باید دارای فرمت DAT به شکل ماتریسی متناسب با نوع شبکه‌بندی مدل باشد. از این رو مدل PMWIN دارای توانایی درون‌یابی با توجه به نوع شبکه‌بندی مدل در قالب ابزار Field Interpolator می‌باشد. این ابزار از چهار روش Shepard's Inverse Distance، Renka's، Akima's bivariate interpolation و triangulation و Kriging به منظور درون‌یابی استفاده می‌کند. با توجه به زمین آمار بودن روش Kriging.

سمت جنوب غرب بوده و میزان متوسط شیب حوضه $3/8$ درصد می‌باشد. متوسط بارندگی در دشت توپسرکان برای یک دوره آماری ۱۸ ساله، ۴۳۰ میلی‌متر گزارش شده است (بی‌نام، ۱۳۸۸). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت توپسرکان را به همراه توپوگرافی دشت نشان می‌دهد. میزان متوسط دمای ماهانه در دوره آماری ۲۳ ساله نیز برابر $12/6$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، نوع آبخوان دشت توپسرکان، آبخوان آزاد می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۸۸).

هیدروژئولوژی و بیلان آب زیرزمینی در منطقه

مورد مطالعه

ترسیم هیدروگراف واحد آبخوان دشت توپسرکان (شکل ۲) از سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ تا ۹۱-۱۳۹۰ نشان داد که سطح ایستابی در طول این مدت افتی در حدود ۱۰ متر را داشته است. عواملی نظیر برداشت بیش از حد، کاهش بارندگی و عدم برنامه‌ریزی‌های جامع در زمینه مدیریت مناسب آب زیرزمینی منجر به چنین افتی شده‌اند.

عوامل بیلان در آبخوان دشت توپسرکان نیز شامل موارد زیر است:

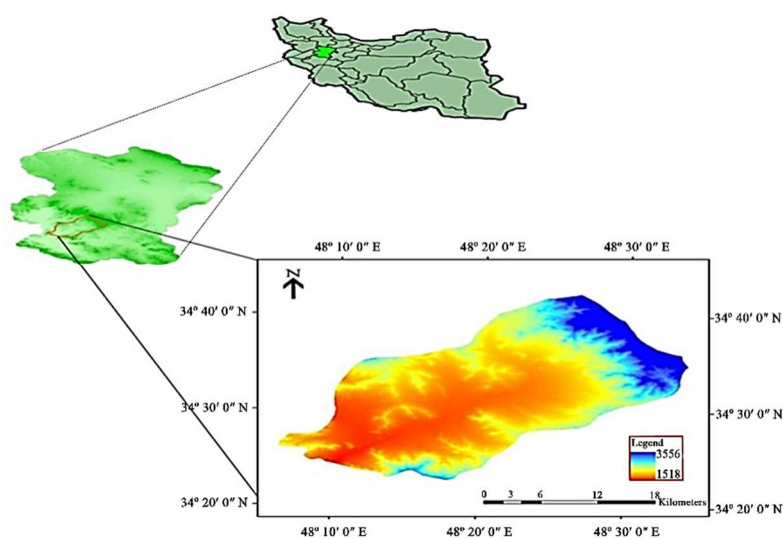
عوامل ورودی: ۱- جریان زیرزمینی ورودی، ۲- نفوذ ناشی از بارندگی، ۳- نفوذ از جریان‌ات سطحی، ۴- آب برگشتی زراعی، ۵- آب برگشتی مصارف شرب و بهداشت عوامل خروجی: ۱- جریان آب زیرزمینی خروجی، ۲- برداشت از آب زیرزمینی

ضرایب مربوط به آب برگشتی زراعی و مصارف شرب و صنعت بر اساس مطالعات آب منطقه‌ای در سال ۸۸-۱۳۸۷ به ترتیب به میزان ۱۶ و ۵۵ درصد در نظر گرفته شد (بی‌نام، ۱۳۸۸). در مورد نفوذ ناشی از بارش نیز با احتساب ضریب رواناب ۱۵ درصد، میزان بارش تبدیل شده به رواناب محاسبه و سپس ضریب نفوذ ۱۵ درصد نیز با توجه به جنس رسوبات آبرفتی لحاظ گردید (بی‌نام، ۱۳۸۸).

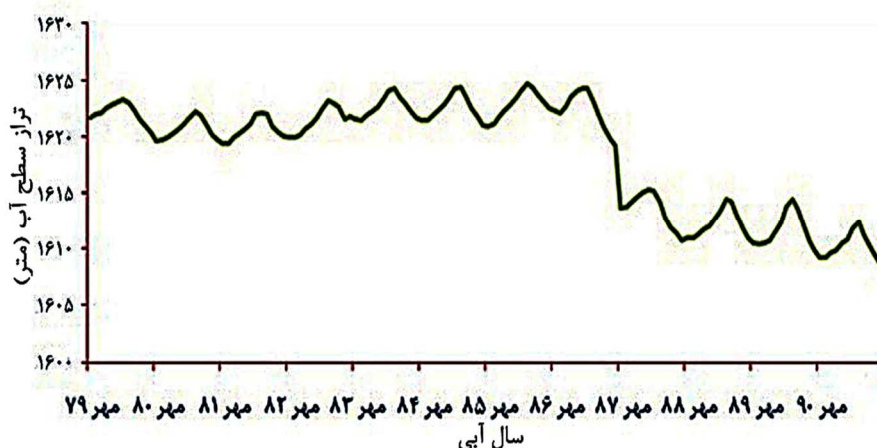
برآورد میزان نفوذ مستقیم از ریزش‌های جوی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی امکان‌پذیر است. جهت تعیین این مقدار از فرمول فائو (رابطه ۱) استفاده شده است (علیزاده، ۱۳۸۵).

²General-Head Boundary

¹No Flow Boundary



شکل ۱- دشت توپسرکان در استان همدان



شکل ۲- هیدروگراف واحد آبخوان توپسرکان



شکل ۳- موقعیت پیزومترهای مورد استفاده در مدل‌سازی آبخوان دشت توپسرکان

مشخصات واریوگرام مربوط به این روش برای هر سری از داده‌ها (تراز سنگ کف، تراز سطح زمین و تراز سطح

صورت دستی مراحل پایانی واسنجی اعمال گردید. همچنین مطابق با معادلات ارائه شده رفتار جریان در حالت غیرماندگار با لحاظ نمودن تغذیه و تخلیه برابر، معادله زیر به دست می‌آید:

$$(۴) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

با ثابت نگه داشتن هدایت هیدرولیکی به دست آمده در حالت ماندگار، اینبار تنها مجهول معادله آبدهی ویژه (S_s) است. بنابراین در همان دوره یک ماهه واسنجی هدایت هیدرولیکی، در شرایطی که میزان تخلیه و تغذیه با برابری حذف شده باشد، مدل با وضعیت غیر ماندگار اجرا شد و آبدهی ویژه ابتدا توسط $pest$ و سپس بصورت دستی واسنجی گردید.

صحت‌سنجی

مدل‌سازی آبخوان دشت تویسرکان، در یک دوره یک‌ساله و حدفاصل مهر ۸۷ تا شهریور ۸۸ انجام شد. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی باید مدل تهیه شده با داده‌ها و شرایط واقعی مورد ارزیابی واقع گردد. مدل آبخوان دشت تویسرکان با اعمال آمار و اطلاعات محیطی دو ماه مرداد و شهریور ۱۳۸۸ صحت‌سنجی گردید.

آنالیز حساسیت

برای آنالیز حساسیت به عوامل واسنجی شده، به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مقدار اولیه به آن‌ها، اضافه یا کم می‌شود، در حالی که بقیه داده‌های ورودی ثابت می‌مانند. در شش حالت جدید ایجاد شده، مدل اجرا و واریانس خطای به دست آمده با سایر مقادیر ترسیم و مقایسه می‌شود. حساس‌ترین عوامل پارامترهایی هستند که با درصد تغییرات اعمال شده، بیشترین واریانس خطا را ایجاد کنند.

تعریف سناریوها برای انجام پیش‌بینی توسط مدل

پس از صحت‌سنجی مدل، پیش‌بینی برای یک دوره ده ساله تا شهریور ۱۳۹۸ انجام پذیرفت. به منظور تعریف سناریو باید پیش‌بینی از شرایط آینده دشت نظیر بارش به

ایستایی) در نرم افزار GS+ تعیین و مدل گوسی انتخاب گردید و وارد ابزار Field Interpolator گردید.

در مدل‌سازی آبخوان دشت تویسرکان از ۱۳ حلقه چاه مشاهداتی استفاده گردیده است (شکل ۳). تراز سطح ایستایی در این چاه‌ها به صورت ماهانه اندازه‌گیری شده است.

واسنجی مدل

برای مدل‌سازی آبخوان دشت تویسرکان با توجه به الگوی کشت، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و نیز وضعیت بارش در منطقه، ۱۲ دوره تنش یک ماهه در سال آبی ۸۸-۸۷ در نظر گرفته شد. گام‌های زمانی نیز به صورت ماهانه در نظر گرفته شد. در معادله حاکم بر جریان در محیط متخلخل آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط ماندگار، سمت راست معادله برابر صفر می‌گردد. بر همین مبنا و با احتساب متغیر بودن هدایت هیدرولیکی در نقاط مختلف دشت، رابطه جریان در شرایط ماندگار و غیر همگن به صورت زیر در می‌آید:

$$(۲) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - R = 0$$

پارامترهای متغیر در معادله فوق، هدایت هیدرولیکی (K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}) و میزان تغذیه و تخلیه (R) است. برای محاسبه و واسنجی هدایت هیدرولیکی باید شرایط ماندگار را در سیستم اعمال نمود. پس از بررسی تغییرات ارتفاع آب در تمامی پیزومترهای سطح دشت در سال آبی ۸۸-۱۳۸۷، سطح آب در ماه چهارم شبیه‌سازی (دی‌ماه ۱۳۸۷) در اکثر پیزومترها تقریباً یکسان بود. در این مقطع زمانی می‌توان میزان تخلیه و تغذیه را یکسان و شرایط را ماندگار فرض کرد. با این فرض عبارت R از معادله فوق حذف شده و رابطه زیر به دست می‌آید که تنها مجهول آن هدایت هیدرولیکی است.

$$(۳) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

با واسنجی مدل در شرایط مرزی معلوم و ارتفاع آب اندازه‌گیری شده در پیزومترها و با استفاده از مدل معکوس PEST، حدود هدایت هیدرولیکی در دشت تعیین گردید. سپس در طی چندین مرحله تغییر مرزبندی در بازه تغییرات هدایت هیدرولیکی به روش معکوس، نهایتاً به

آگاهی از نوع و تعداد سیستم‌ها و روش‌های آبیاری در دشت توپسرکان، نیاز است تا از نوع محصولات کشت شده در منطقه و نیاز آبی آن‌ها اطلاع یابیم. به‌منظور تعیین آب مورد نیاز گیاهان کشت شده در منطقه، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار نت‌واتنیاز خالص آبیاری را برای هر یک از گیاهان در منطقه به‌دست آوردیم. با توجه به قابلیت این نرم افزار، با انتخاب دشت توپسرکان، نیاز خالص گیاهان مورد نیاز برآورد گردید.

در دشت توپسرکان ۳۳۱۱/۴۷ هکتار از اراضی آبی موجود، با استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار آبیاری می‌شوند. سیستم‌هایی که گرفته شده در این مناطق غالباً از نوع بارانی کلاسیک، بارانی قرقره‌ای و قطره‌ایمی‌باشند. تقریباً همه این اراضی از طریق منابع زیرزمینی آب خود را تأمین می‌کنند. با توجه به کشت‌های انجام شده، بر اساس اطلاعات دریافت شده از سازمان جهاد کشاورزی و آب منطقه‌ای استان همدان (دبی تخلیه، سطح زیر کشت تحت پوشش چاه و نوع کشت)، راندمان آبیاری برای هر نوع سیستم، محاسبه گردید؛ به‌طوری که برای آبیاری قطره‌ای از ۱۱ نمونه، برای آبیاری بارانی قرقره‌ای از ۲۱ نمونه و برای آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و نیمه متحرک از ۱۳ نمونه استفاده شد، که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. به‌منظور محاسبه راندمان کل، از رابطه ۶ **Error!** **Reference source not found.** استفاده شد.

(۶) میزان آب بر دشتی از چاه (متر مکعب در سال) / نیاز خالص آبی (متر مکعب در سال) = راندمان کل / برای به‌دست آوردن راندمان کل آبیاری سطحی در دشت توپسرکان نیز مانند آبیاری تحت فشار با استفاده از اطلاعات کسب شده شرکت آب منطقه‌ای استان همدان (تخلیه سالانه از چاه، سطح زیر کشت تحت پوشش چاه و کشت غالب) و به کار بردن رابطه ۶ **Error!** **Reference source not found.** برنامه نت‌وات، راندمان کل محاسبه گردید. به‌طوری که برای محاسبه راندمان کل آبیاری نشتی از ۷ نمونه و برای محاسبه راندمان کل آبیاری غرقابی از ۵۱ نمونه استفاده شد. نتایج محاسبات را در جدول ۲ مشاهده می‌نمائید.

عنوان عامل تغذیه صورت پذیرد. بدین منظور از آمار و اطلاعات ۴ ایستگاه بابا پیرعلی (۲۰ ۹۴۸ شرقی و ۳۷ ۹۳۴ شمالی در ارتفاع ۱۸۹۰ متری از سطح دریا)، سرابی (۲۸ ۹۴۸ شرقی و ۲۱ ۹۳۴ شمالی در ارتفاع ۱۹۲۰ متری از سطح دریا)، آغاجاناغی (۰۳ ۹۴۸ شرقی و ۵۰ ۹۳۴ شمالی در ارتفاع ۱۸۰۲ متری از سطح دریا) و خسروآباد (۰۲ ۹۴۸ شرقی و ۳۷ ۹۳۴ شمالی در ارتفاع ۱۵۲۵ متری از سطح دریا) استفاده گردید. برای پیش‌بینی بارش به صورت ماهانه از روش فراگمنت استفاده گردید. برای بکارگیری این روش ابتدا می‌بایست از روشی نظیر مارکوف که برای مقادیر سالانه کاربرد دارد، مقادیر سالانه بارش را پیش‌بینی نمود (هان، ۲۰۰۲).

برای پیش‌بینی بارش سالانه به روش مارکوف، از رابطه ۵ استفاده می‌گردد که بارش هر سال را از روش بارش سال قبل خود برآورد می‌کند.

$$X_{i+1} = \bar{X} + r_1(X_i - \bar{X}) + S * t_i * (\Delta) \sqrt{(1 - r^2)}$$

که در این معادله، X_{i+1} مقدار بارش در سال مد نظر برای پیش‌بینی، \bar{X} میانگین داده‌های واقعی موجود، r_1 همبستگی مرتبه اول، X_i مقدار بارش در سال قبل از X_{i+1} ، S انحراف معیار داده‌های واقعی موجود و t_i عدد تصادفی نرمال می‌باشد.

سپس برای تمام سال‌ها، مقادیر ماهانه را بر مقدار بارش سالانه همان سال تقسیم می‌کنیم تا ضرایب مخصوص در هر ماه برای سال خاص خود حاصل گردد. در گام بعد، داده‌های واقعی بارش سالانه را از کمترین تا بیشترین مقدار خود مرتب می‌نماییم و سپس بین هر دو سال متوالی، میانگین‌گیری انجام می‌شود تا بازه‌ای از مقادیر میانگین به دست آید. در ادامه داده‌های سالانه پیش‌بینی شده را مورد بررسی قرار می‌دهیم؛ بدین صورت که داده‌های پیش‌بینی شده در هر بازه‌ای از مقادیر میانگین که قرار گرفته باشند، از ضریب ماهانه همان سالی برای پیش‌بینی بارش استفاده می‌شود که در میان آن بازه قرار گرفته است. از همین رو مقادیر ماهانه بارش برای دشت توپسرکان در ۴ ایستگاه مد نظر تا سال ۱۳۹۸ پیش‌بینی شد.

در تعریف سناریوی دوم به موضوع افزایش راندمان آبیاری در دشت توپسرکان توجه گردید. لذا نیاز است تا راندمان آبیاری در دشت مشخص گردد. از این رو علاوه بر

جدول ۱- راندمان کل برای سیستم‌های تحت فشار در دشت توپسرکان

نوع آبیاری	تعداد نمونه	سطح زیر کشت (هکتار)	نوع کشت	راندمان کل (درصد)
بارانی کلاسیک ثابت و نیمه متحرک	۱۳	۱۳۰/۳۶	یونجه، گندم، چغندر و سیب‌زمینی	۵۱/۴۷
بارانی قرقره‌ای	۲۱	۶۰۵/۵	غلات، یونجه و چغندر	۶۱/۰
موضعی (قطره‌ای و بابلر)	۱۱	۴۶/۶۳	سیب، هلو، گردو، انگور	۵۶/۳۶
متوسط راندمان کل سیستم‌ها	-	-	-	۵۹/۱۳

جدول ۲- راندمان کل روش‌های آبیاری سطحی در دشت توپسرکان

نوع آبیاری	تعداد نمونه	سطح زیر کشت (هکتار)	نوع کشت	راندمان کل (درصد)
غرقابی	۵۱	۴۱۹/۹	یونجه، گندم، جو، ذرت، لوبیا، گردو، هلو و بادام	۴۱/۳۸
نشتی	۷	۱۵۰/۸	غلات، یونجه و چغندر	۳۴/۷۷
متوسط وزنی راندمان کل روش‌ها	-	-	-	۳۹/۶۳

نتایج و بحث

واسنجی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه

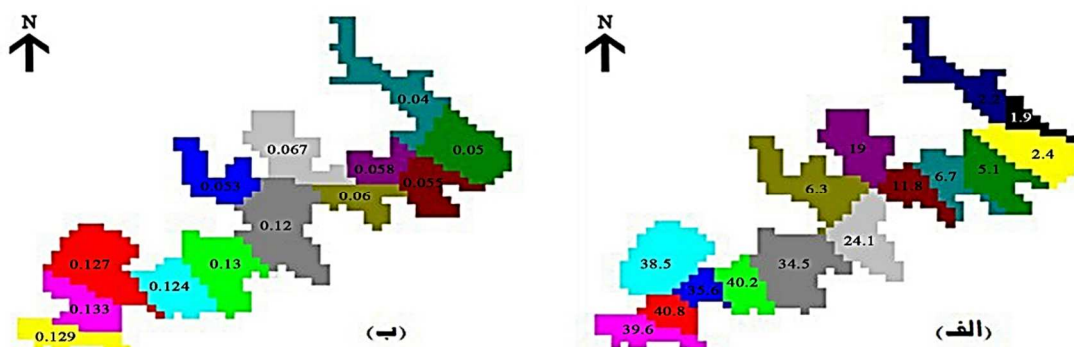
اولین مرحله از انجام عملیات واسنجی مربوط به هدایت هیدرولیکی است. دقت در تعیین این پارامتر تأثیر زیادی در دقت سایر عوامل دارد. برای واسنجی این عامل از سطح ایستابی دیمه به عنوان حالت ماندگار استفاده گردید. نقشه به دست آمده از مرحله واسنجی مدل در شکل ۴-الف آمده است. بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی در نواحی میانی به سمت خروجی دشت می‌باشد و در حاشیه شرقی دشت و در نزدیکی ارتفاعات کمترین مقدار خود را داراست. بر اساس شکل ۴-الف به جز در برخی از بخش‌ها، به نظر می‌رسد که هدایت هیدرولیکی به سمت خروجی دشت به صورت پیوسته در حال افزایش است. دومین پارامتر واسنجی شده، آبدهی ویژه در شرایط غیرماندگار می‌باشد. نقشه به دست آمده از مقادیر آبدهی ویژه در شکل ۴-ب آمده است. مشابه هدایت هیدرولیکی، نقاط خروجی دشت دارای بالاترین مقادیر آبدهی می‌باشند. بالاترین حد آبدهی ویژه در این مطالعه و در مطالعه آب منطقه‌ای (بی‌نام، ۱۳۸۸) در بخش‌های میانی و انتهایی آبخوان برآورد شده است. بر اساس سه مورد آزمایش تست پمپاژ صورت گرفته در منطقه، آنچه برای میانگین میزان آبدهی ویژه در کل آبخوان پیشنهاد گردید،

مقدار ۰/۰۶ بود. (بی‌نام، ۱۳۸۸)؛ اما بر اساس نتایج حاصله از واسنجی مدل، میانگین آبدهی ویژه (۰/۰۹) بالاتر از مقدار پیشنهادی پس از انجام آزمایشات پمپاژ می‌باشد.

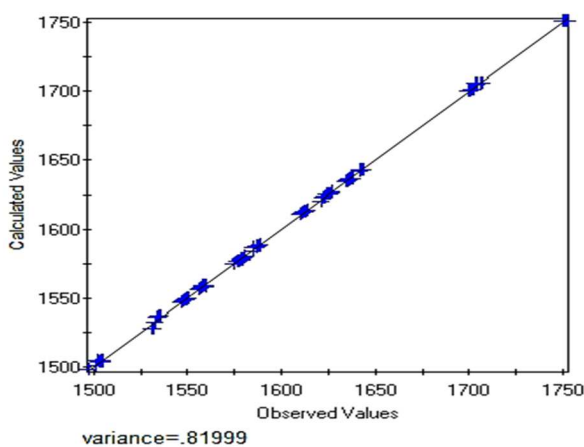
واسنجی آبدهی ویژه

مقادیر تغذیه در تک تک دوره‌های تنش به صورت دستی اعمال و واسنجی گردید. در این مرحله تخلیه چاه‌ها بر اساس آمار تخلیه به مدل وارد گردید (ضرایب برگشتی نیز طبق ضرایب مذکور، اعمال شد) و مقادیر تغذیه نیز با استفاده از بسته Recharge وارد مدل گردید و توسط کد PEST تخمین زده شد. زمان شروع شبیه‌سازی مهر ۱۳۸۷ و واسنجی تا تیرماه ۱۳۸۷ انجام گردید. واریانس خطای بدست آمده در پایان واسنجی در تمام نقاط مشاهده‌ای در کل ۱۰ ماه (شکل ۵ Error! Reference source not found) برابر ۰/۸۲ می‌باشد. چیت سازان و کشکولی (۱۳۸۱) تفاوت بین بارهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و مشاهده شده را تا چند فوت بیان نمودند.

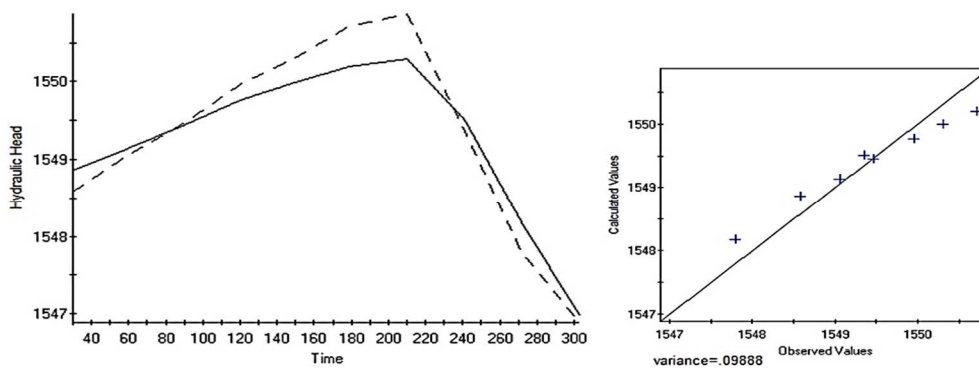
لازم به ذکر است که تمامی شکل‌های ۵ تا ۹ خروجی خود مدل بودند. همچنین در شکل‌های مربوط به مقایسه بارهای مشاهده شده و محاسبه شده و میزان واریانس خطادر شکل‌های ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹، محور افقی بار مشاهده شده و محور عمودی بار محاسبه شده (خروجی مدل) بر



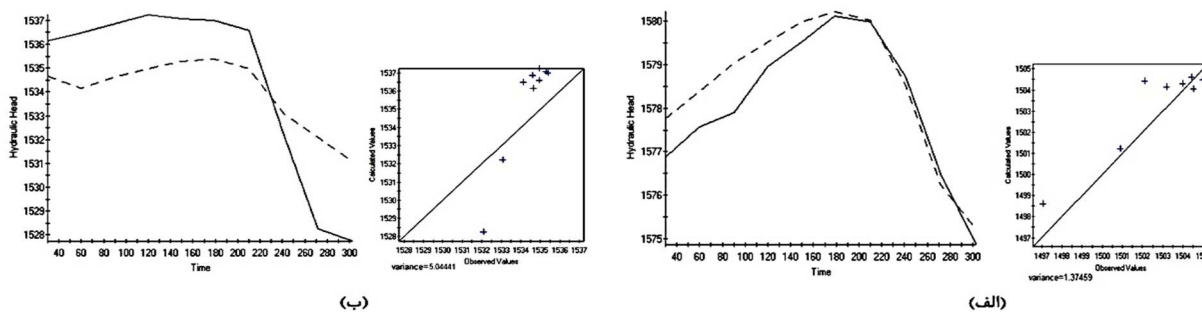
شکل ۴- مقادیر هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) (الف) و آبدهی ویژه (ب) پس از واسنجی



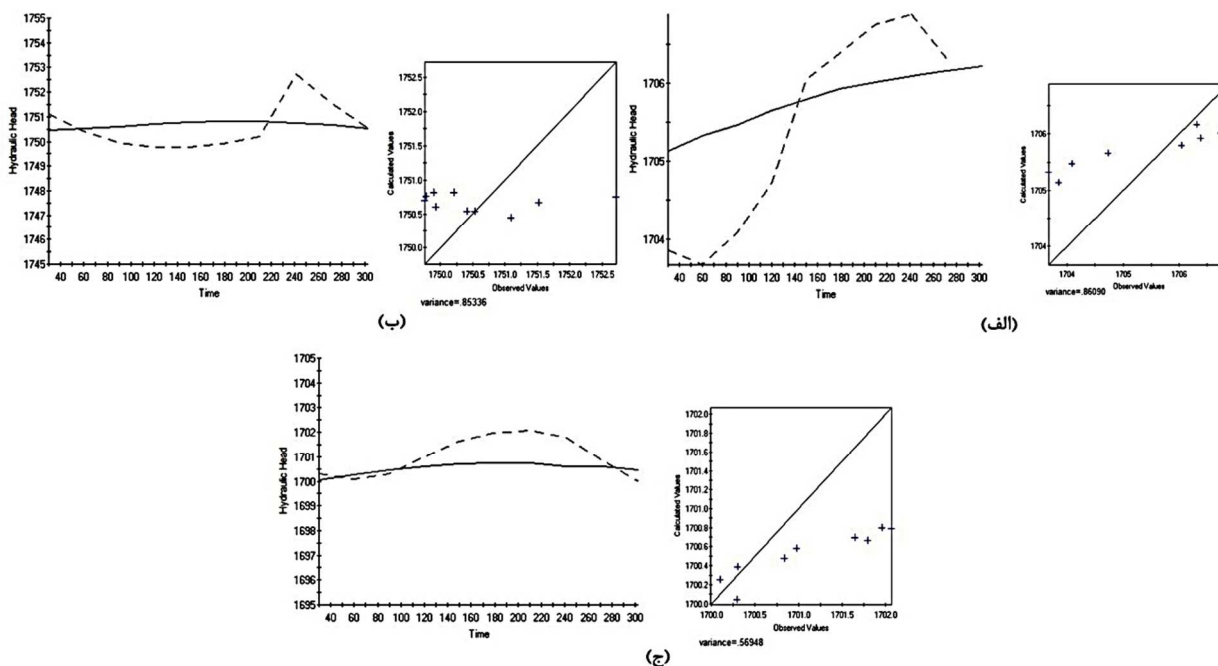
شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی در کل دوره‌های تنش



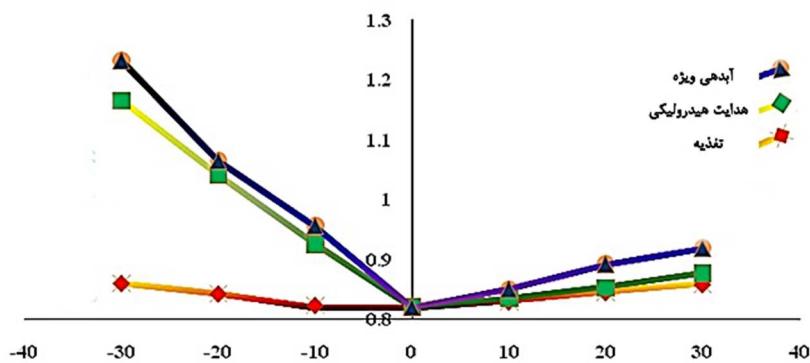
شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی در پیژومتر ۱۰



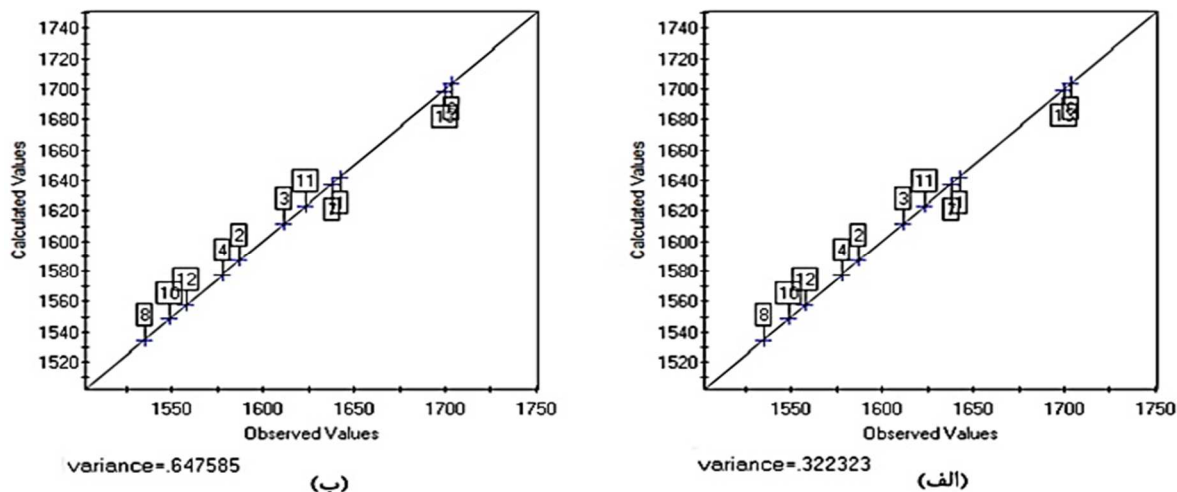
شکل ۷- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی در پیژومترهای ۵ (الف) و ۸ (ب)



شکل ۸- مقایسه مقادیر مشاهداتی در پیزومترهای ۶، ۹ و ۱۳



شکل ۹- مقایسه آنالیز حساسیت برای سه عامل هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه



شکل ۱۰- صحت سنجی مدل برای دو ماه مرداد (الف) و شهریور (ب)

حسب روز است.

طبق نتایج حاصله کمترین واریانس خطا مربوط به حسب متر هستند. در نمودارهای بار هیدرولیکی در مقابل زمان نیز در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نیز بار هیدرولیکی همان تراز سطح آب بر حسب متر و زمان بر پیژومتر ۱۰ واقع در قسمت جنوب شرقی دشت می‌باشد که واریانس مربوط به مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، ۰/۰۹۸۸ می‌باشد (شکل ۶). بیشترین واریانس خطا نیز مربوط به دو پیژومتر ۵ (شکل ۷-الف) و ۸ (شکل ۷-ب) است که در خروجی دشت واقع شده‌اند که مقادیر واریانس برای آن دو پیژومتر به ترتیب برابر ۱/۳۷ و ۵/۰۴ می‌باشد. هر چند به نظر می‌رسد که پس از فروردین ۱۳۸۸ مقادیر محاسباتی و مشاهداتی به هم، بسیار نزدیک می‌شوند. پیژومترهای قسمت میانی دشت نیز دارای واریانس کمتری در مقایسه با بخش‌های دیگر دشت هستند. همچنین در پیژومترهای ۶ (شکل ۸-الف)، ۹ (شکل ۸-ب) و ۱۳ (شکل ۸-ج) که در بخش‌های پرشیب شمال شرقی دشت واقع شده‌اند، هیدروگراف‌های حاصله نتوانسته‌اند نوسانات سطح ایستابی را به خوبی بخش‌های میانی دشت شبیه‌سازی نمایند. بنابراین به نظر می‌رسد که در خروجی دشت توپسرکانکه محل خروج آب زیرزمینی نیز می‌باشد و نیز در بخش‌های شمال شرقی دشت، مدل نتوانسته به خوبی سطح آب زیرزمینی را شبیه‌سازی نماید (در حالت اول در مورد میزان واریانس خطا و در حالت دوم در مورد شبیه‌سازی نوسانات آب زیرزمینی). نتایج حاصل از واسنجی مدل MODFLOW در دشت ملایر نشان داد که مدل توانایی شبیه‌سازی آبخوان را ندارد (بهشتی، ۱۳۸۵). هرچند در مطالعه پورطبری و همکاران (۱۳۹۴) نتایج از توانایی مدل MODFLOW در شبیه‌سازی آبخوان و پیش بینی رفتار تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در مقایسه با مدل‌های شبکه عصبی استاتیکی بود.

آنالیز حساسیت

مدل آبخوان دشت توپسرکان، حساسیت بیشتری به کاهش هدایت هیدرولیکی نسبت به افزایش آن نشان می‌دهد. آنالیز حساسیت آبدی ویژه نیز با قرار دادن مقدار واقعی هدایت هیدرولیکی و اعمال تغییرات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی در آبدی ویژه انجام شد. پس از اجرای مدل، نمودار آنالیز حساسیت، وضعیتی مشابه با هدایت

هیدرولیکی را نشان می‌دهد. با این تفاوت که مدل نسبت به آبدی ویژه حساسیت بیشتری نسبت به هدایت هیدرولیکی دارد. سومین مورد در آنالیز حساسیت نیز با ثابت نگه داشتن مقادیر آبدی ویژه و هدایت هیدرولیکی در مورد عامل تغذیه انجام پذیرفت. بر خلاف ضرایب هیدرودینامیکی، مدل نسبت به تغذیه هم به هنگام کاهش و هم به هنگام افزایش آن، عکس العمل نسبتاً یکسانی نشان می‌دهد؛ واکنشی که در مقایسه با ضرایب هیدرودینامیکی نیز دارای حساسیت کمتری است. شکل ۹ نیز نشان دهنده مقایسه هر سه عامل در آنالیز حساسیت می‌باشد. در کل می‌توان گفت که مدل در ابتدا نسبت به آبدی ویژه، و ثانیاً نسبت به هدایت هیدرولیکی و در پایان نسبت به تغذیه حساس‌تر است. در حالی که در پژوهش کریمی‌پور و رخشنده‌پور (۱۳۹۴) حساسیت مدل در دشت شیراز به ترتیب نسبت به پارامترهای تغذیه، هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه کاهش می‌یافت. همچنین حساسیت مدل PMWIN در دشت قزوین به ترتیب نسبت به هدایت هیدرولیکی، تغذیه و آبدی ویژه کاهش می‌یافت (افلاطونی و همکاران، ۱۳۹۴). در مطالعه پورحقی و همکاران (۱۳۹۳) نیز آبدی ویژه و هدایت هیدرولیکی حساس‌ترین پارامترهای شناخته شدند که با نتایج آنالیز حساسیت این مطالعه سازگار است.

صحت‌سنجی

تأیید مدل تهیه شده با پیش‌بینی بار هیدرولیکی مرداد و شهریور و مقایسه آن با بار هیدرولیکی مشاهداتی انجام گرفت. مدل آبخوان دشت توپسرکان با اضافه شدن دو دوره تنش ۳۱ روزه و اعمال شرایط و تنش‌های دو ماه آخر سال مورد مطالعه، اجرا و بار هیدرولیکی محاسبه شده با مقدار واقعی مقایسه گردید. پیش‌بینی سطح ایستابی در مرداد ۱۳۸۸ با واریانس ۰/۳۲ (شکل ۱۰-الف) و در شهریور همان سال با واریانس ۰/۶۴ (شکل ۱۰-ب) انجام گردید.

پیش‌بینی سطح ایستابی در طول ۱۰ سال آینده

پس از انجام مرحله صحت‌سنجی، مدل جهت پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان تحت سناریوهای مختلف آماده می‌باشد. در تعریف سناریو باید شرایط احتمالی را به

از پیژومترها نظیر پیژومتر ۶، به نظر می‌رسد استفاده از نوع راه حل خطی، سبب اندکی اختلاف در سطح ایستابی پیش‌بینی شده گردیده است. زیرا این پیژومتر در محلی قرار گرفته که تغییرات در میزان ارتفاع در یک فاصله مکانی کوتاه بسیار زیاد است و به عبارت دیگر دارای شیب زیادی می‌باشد. هر چند در مطالعه محمدی و همکاران (۱۳۹۴) که با مدل PMWIN صورت گرفت به این نتیجه رسیدند که در بخش مرکزی دشت شیروان با افزایش سطح آب زیرزمینی و در سایر بخش‌ها با کاهش آن روبرو هستیم. در شکل ۱۳ پس از میانگین‌گیری سطح آب به صورت سالانه در سطح آبخوان، اقدام به مقایسه دو سناریو به صورت سالانه گردید. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود هرچند که میانگین سطح آب در هر دو سناریو دارای روند کاهشی می‌باشد، اما سطح آب در سناریوی اول در پایان دوره ده ساله شبیه‌سازی در حدود سه متر پایین‌تر از سناریوی دوم قرار دارد. همچنین افزایش ۲۰ درصدی راندمان آبیاری سبب منظم‌تر شدن نوسانات سطح ایستابی در هیدروگراف حاصله شده است. مهدوی و همکاران (۱۳۹۲) نیز در مطالعه‌ای که در دشت همدان-بهار انجام دادند به این نتیجه دست یافتند که تغییر شیوه آبیاری به دلیل صرفه جویی در مصرف آب، بیشترین تأثیر را بر کاهش میزان افت سطح تراز آبخوان در آینده خواهد داشت. نیکبخت و نجیب (۱۳۹۴) نیز در مطالعه‌ای در دشت عجب‌شیر به این نتیجه دست یافتند که با جایگزین شدن سیستم‌های آبیاری سنتی با تحت فشار، سطح آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی با افزایش روبرو خواهد شد.

نقشه‌های هم افت آب زیرزمینی در طی ۱۰ سال (اردیبهشت ۸۸ تا اردیبهشت ۹۸) به ترتیب برای سناریوی اول (شکل ۱۴-الف) و سناریوی دوم (شکل ۱۴-ب) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افت تراز سطح آب در اردیبهشت ۹۸ نسبت به اردیبهشت ۸۸ با اعمال سناریوی اول بیشتر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

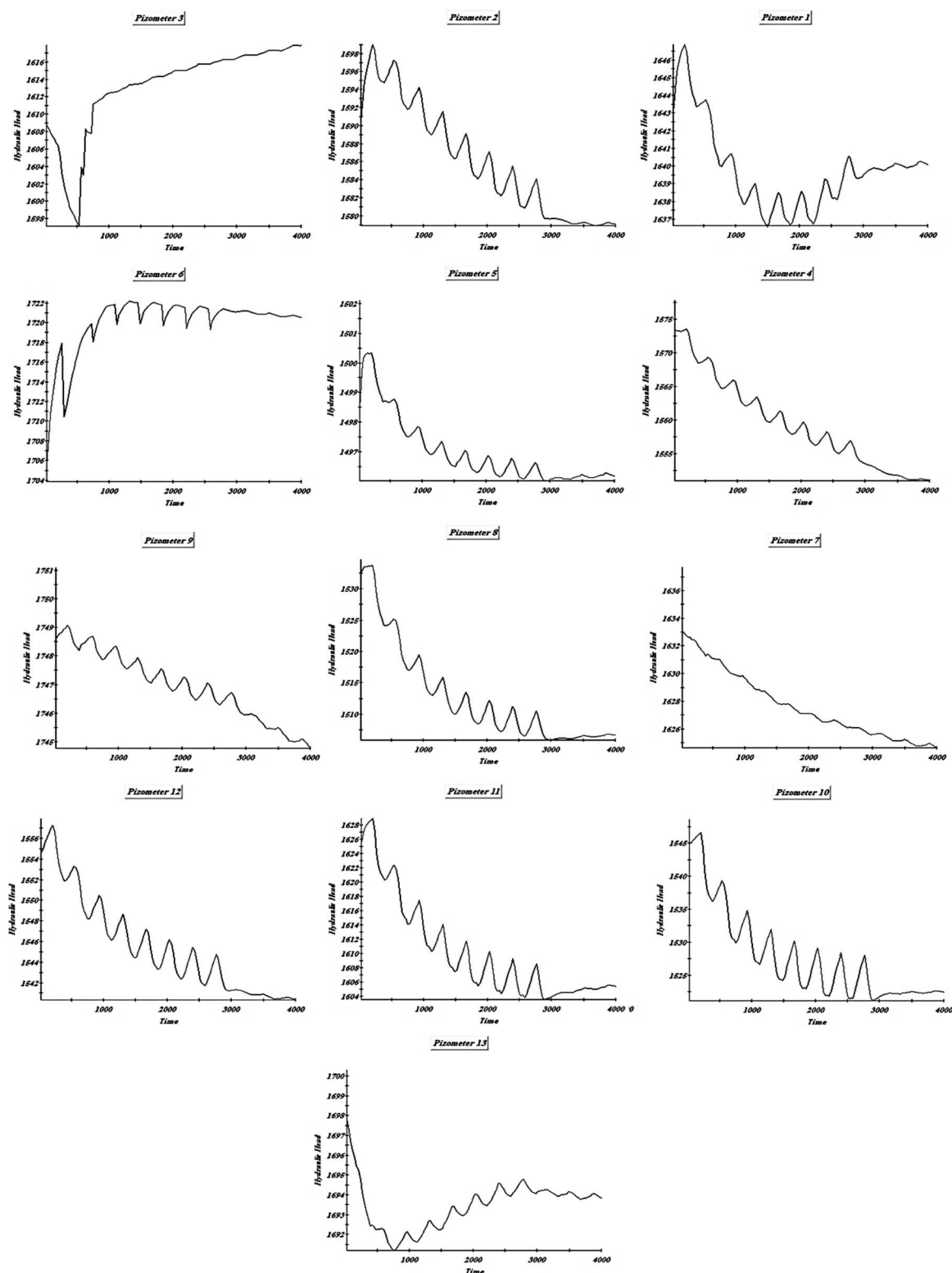
این مطالعه از نخستین مطالعاتی است که در مورد شبیه‌سازی آبخوان دشت توپسرکان با مدل PMWIN صورت گرفته است. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار، نشان دهنده این است که بخش‌های میانی دشت دارای بالاترین مقادیر هدایت

صورت لایه‌های اطلاعاتی وارد مدل نمود. در این مطالعه دو سناریو ده ساله (تا سال آبی ۹۷-۱۳۹۸) مد نظر قرار گرفت. سناریوی نخست بر مبنای ادامه روند برداشت کنونی از آبخوان طراحی گردید. در این سناریو همچنین تغذیه با استفاده از بارش‌های پیش‌بینی شده توسط روش فراگمنت که در بخش بیان شد، برآورد و وارد مدل گردید. در سناریوی دوم، راندمان آبیاری در منطقه، مورد نظر واقع شد. بدین صورت که جایگزینی سیستم‌های آبیاری سنتی با سیستم‌های تحت فشار و افزایش راندمان به میزان ۲۰ درصد اعمال گردید. تغذیه نیز بر همان مبنای سناریوی اول وارد مدل گردید. هیدروگراف‌های استخراج شده از سناریوی اول برای هر پیژومتر به صورت جداگانه در **Error! Reference source not found.** شکل ۱۱ و برای سناریوی دوم نیز در هر پیژومتر در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

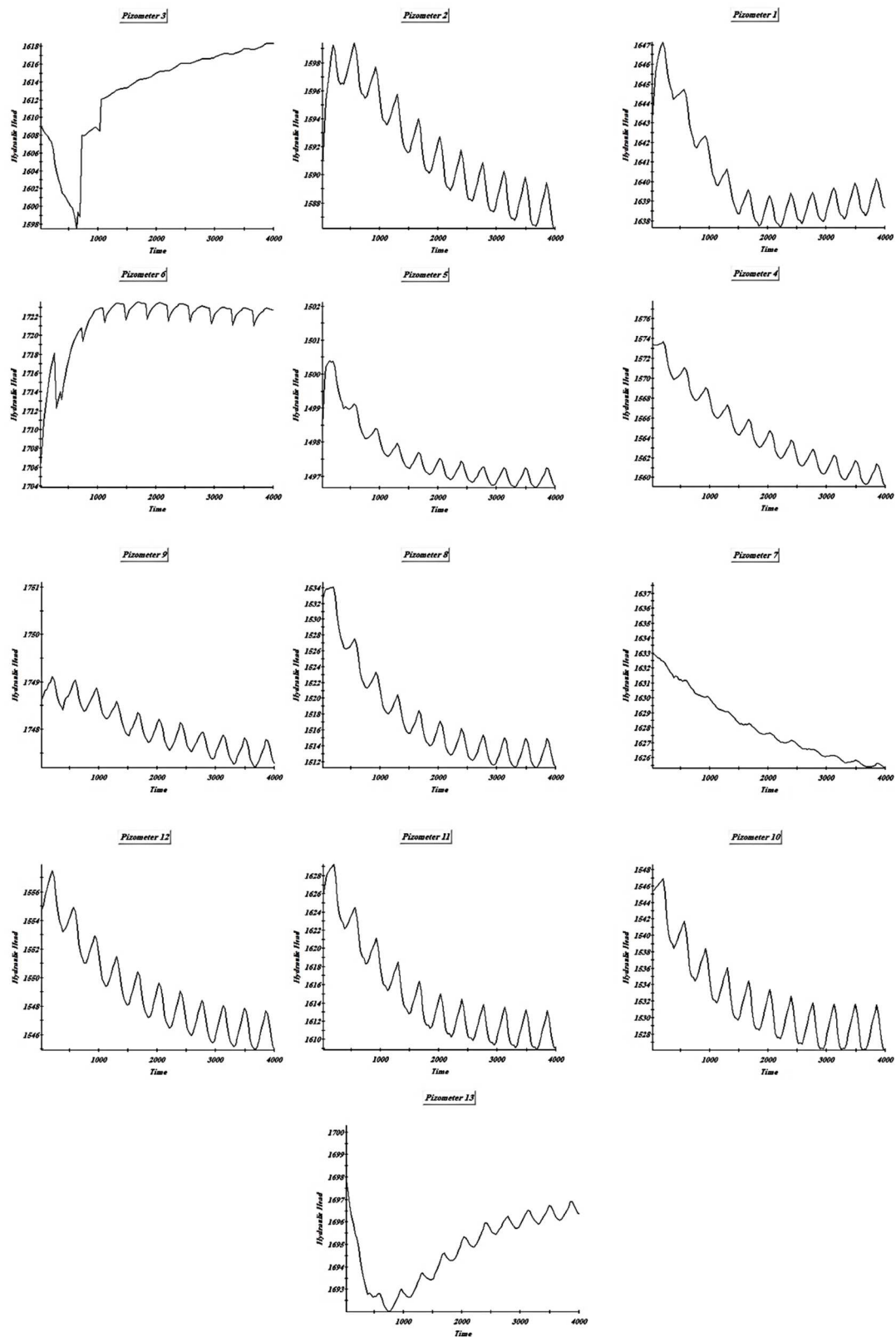
بر اساس هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده در هر دو سناریو، به جز دو پیژومتر ۳ و ۶، در سایر پیژومترها سطح ایستابی در پایان دوره شبیه‌سازی نسبت به سطح ابتدایی افت پیدا کرده است. در سناریوی اول بیشترین میزان افت با میزان $25/83$ متر مربوط به پیژومتر ۸ و کمترین افت نیز به میزان $2/285$ متر مربوط به پیژومتر ۵ است. میزان افزایش سطح ایستابی در پیژومتر ۳ معادل $9/022$ متر و در پیژومتر ۶ معادل $15/066$ متر می‌باشد. در سناریوی دوم نیز بیشترین افت مربوط به پیژومتر شماره ۸ است، هر چند که افت به میزان $4/531$ کاهش یافته و سطح ایستابی به $21/3$ متر رسیده است. اما کمترین افت مربوط به پیژومتر ۹ با $1/352$ متر افت می‌باشد. هر چند کمترین اختلاف مربوط به پیژومتر ۵ به میزان $0/516$ بوده است. در پیژومتر ۳ افزایش سطح ایستابی در پایان دوره شبیه‌سازی نسبت به آغاز آن، $9/264$ متر افزایش را نشان می‌دهد که در مقایسه با سناریوی اول تنها $0/242$ متر افزایش داشته است. اما در مورد پیژومتر ۶، اعمال سناریوی دوم سبب افزایش سطح ایستابی به میزان $1/661$ متر گردیده است و به $16/727$ متر رسیده است. قابل ذکر است که در مورد نحوه تغییرات در هیدروگراف‌ها، به مقایسه بین مقادیر بارش پیش‌بینی شده و میزان برداشت‌ها در هر دو سناریو در محدوده هر پیژومتر گردید. آنچه از این مقایسه مشخص گردید آن است که روند در تمامی هیدروگراف‌ها مطابق با پیش‌بینی‌های انجام شده است. هرچند در برخی

نقاط خروجی آب زیرزمینی نیز واریانس خطای مدل بالاست. به نظر می‌رسد شیوه حل خطی قادر به شبیه‌سازی این بخش آبخوان نبوده است. با بررسی سناریوی تغییر سیستم‌های آبیاری منطقه و افزایش ده درصدی راندمان مشخص گردید که این سناریو نیز تنها

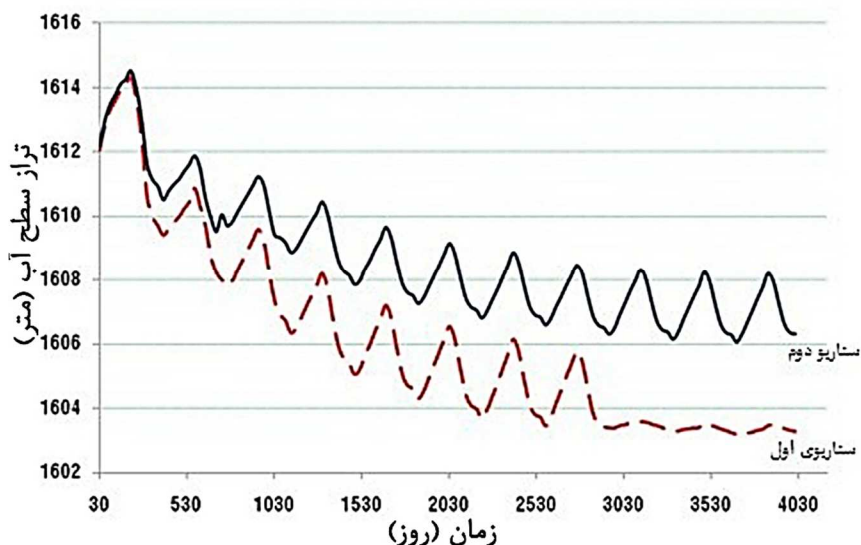
هیدرولیکی و آبدهی ویژه هستند و از این رو با آمار سازمان آب منطقه‌ای مبنی بر وجود چاه‌های با آبدهی بالا در این مناطق هماهنگی دارند (بی‌نام، ۱۳۸۸). نتایج واسنجی تغذیه نیز نشان داد که مدل در نقاط پرشیب دشت نتوانسته نوسانات سطح آب را به خوبی نشان دهد و نیز در



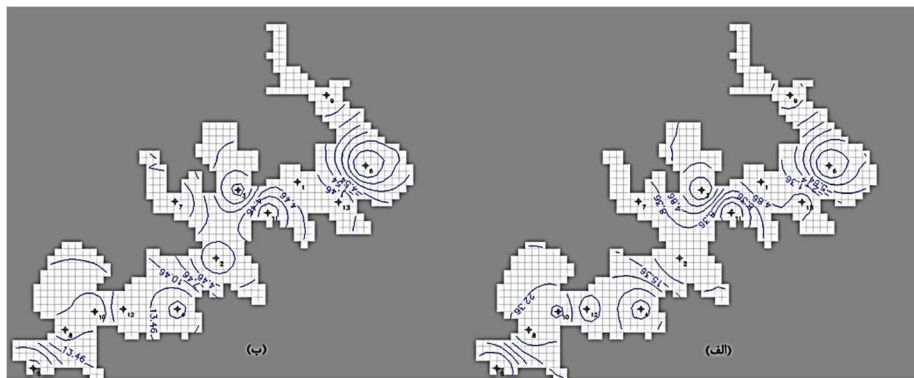
شکل ۱۱- هیدروگراف‌های خروجی مدل پس از طراحی سناریوی اول



شکل ۱۲- هیدروگراف‌های خروجی مدل پس از طراحی سناریوی دوم



شکل ۱۳- مقایسه میانگین سالانه سطح ایستابی آبخوان تویسرکان برای دو سناریوی تعریف شده



شکل ۱۴- نقشه هم افت آب زیرزمینی در آبخوان دشت تویسرکان برای دوره ده ساله در سناریوی ۱ (الف) و ۲ (ب)

نظیر مدل‌های تغییر اقلیم نیز برای پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود که با تعیین ضریب اطمینان بر اساس خروجی مدل‌های مختلف آب زیرزمینی و پایش مداوم سطح ایستابی و نیز وضع قوانین سخت‌گیرانه، روند فعلی برداشت‌ها مهار گردد و با انجام پروژه‌های تغذیه مصنوعی در مکان‌های مستعد این امر، به افزایش سطح ایستابی کمک گردد.

سپاسگذاری

از جناب آقای دکتر میرعباسی عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز به سبب یاری بی دریغ خود در انجام این مقاله و نیز از مسئولین محترم آب منطقه‌ای استان همدان کمال تشکر و امتنان را داریم.

منابع

(۱) افلاطونی م. اسکندری ل. و دهقانی ح. ۱۳۹۴.

مسکنی بر کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه خواهد بود و باید در کنار آن نیاز است تا سناریوهای دیگری نظیر تغییر الگوی کشت و آمایش سرزمین نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین نتایج نشان داد که با افت سطح آب زیرزمینی در تمامی بخش‌های دشت به جز بخش‌های شرقی دشت روبرو خواهیم بود که با نتیجه تحقیق شکوهی و همکاران (۱۳۹۳) که با استفاده از مدل GMS در همین دشت صورت گرفت در انطباق است. کاهش افت سطح آب زیرزمینی در مناطق جنوبی دشت به دلیل تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری بیشتر از سایر نقاط آن است. نتایج نشان داد که در سناریوی اول بیشترین میزان افت با میزان ۲۵/۸۳ متر مربوط به پیژومتر ۸ و کمترین افت نیز به میزان ۲/۲۸۵ متر مربوط به پیژومتر ۵ است. در سناریوی دوم نیز بیشترین افت مربوط به پیژومتر شماره ۸ است، هر چند که افت به میزان ۴/۵۳۱ کاهش یافته و سطح ایستابی به ۲۱/۳ متر رسیده است. نیاز است تا از مدل‌های دیگری

سوریم. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی آبخوان دشت همدان-بهار و بررسی سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل PMWIN. فصلنامه پژوهش‌های آب‌خیزداری (پژوهش و سازندگی). شماره ۹۸.

۱۲) نیکبخت ج. نجیب ز. (۱۳۹۴). اثر افزایش راندمان آبیاری بر نوسانات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت عجبشیر-آذربایجان شرقی). مدیریت آب و آبیاری. دوره ۵. شماره ۱. ۱۲۷-۱۱۵.

13) Al-Salamah, L.S., Ghazaw, Y.M. and Ghumman, A.R. 2011. Groundwater modeling of Saq Aquifer Buraydah Al Qassim for better water management strategies. Environmental Monitoring and Assessment 173 (1-4): 851-860.

14) Haan, C. T. 2002. Statistical Methods in Hydrology. Iowa State Press, P. 496.

15) Jusseret, S., Tam, V. T. and Dassargues, A. 2009. Groundwater flow modelling in the central zone of Hanoi, Vietnam. Hydrogeology Journal 17: 915-934.

16) Larroque, F., Treichel, W. and Dupuy, A. 2008. Use of unit response functions for management of regional multilayered aquifers; application to the North Aquitaine Tertiary system (France). Hydrogeology Journal 16: 215-233.

17) Liu, C.W., Lin, C.N., Jang, C.S., Chen, C.P., Chang, J.F., Fan, C.C. and Lou, K.H. 2006. Sustainable groundwater management in Kinmen Island. Hydrological Processes 20: 4363-4372.

18) Liu, C.W., Chou, Y.L., Lin, S.T., Lin, G.J. and Jang, C.S. 2010. Management of high groundwater level aquifer in the Taipei Basin. Water Resources Management 24 (13): 3513-3525.

19) McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. US Geological Survey Open-file Report. PP. 83-875.

20) Mirlas, V. 2012. Assessing soil salinity hazard in cultivated areas using MODFLOW model and GIS tools: A case study from the Jezre'el Valley. Agricultural Water Management 109: 144-154.

21) Mittelstet, A.R., Smolen, M.D., Fox G.A. and Adams D.C. 2011. Comparison of aquifer sustainability under groundwater administrations in Oklahoma and Texas. Journal of the American Water Resources Association 47 (2): 424-431.

22) Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S.N., and Mull, R. 2008. Simulation modeling for efficient groundwater management in balasore coastal basin, India. Water Resources Management 22 (1): 23-50.

23) Shishir, G., Chaharb, B.R. and Didier, G. 2011. Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. International Journal of Applied Earth

و استنجی و تحلیل حساسیت رفتار هیدرولیکی آب خوان در شبیه‌سازی زهکش حائل دشت قزوین. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. سال چهل و پنجم. شماره ۳.

۲) بهشتی ع. س. ۱۳۸۵. مطالعه هیدروژئولوژی دشت ملایر و ارائه مدل ریاضی آن با استفاده از کد مادفلو جهت مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی. دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

۳) پورحقی، آ. آخوندعلی ع. م. رادمنش ف. میرزایی س. ی. (۱۳۹۳). مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی با مدل MODFLOW (مطالعه موردی: دشت نورآباد). علوم و مهندسی آبیاری. دوره ۳۷. شماره ۸۲، ۲-۷۱.

۴) پورطبری م. م. عبادی ت. و مکنون ر. ۱۳۹۴. ارائه مدل هوشمند تعیین رفتار تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی با لحاظ نمودن وضعیت دینامیکی سیستم آبخوان. مجله آب و فاضلاب. شماره ۷۶.

۵) چیت‌سازان م. و کشکولی ج. ع. ۱۳۸۱. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۶۸۰ صفحه.

۶) دفتر مطالعات پایه منابع آب. ۱۳۸۸. گزارش توجیهی تمديد ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت تویسرکان در سال آبی ۸۷-۸۸ وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان.

۷) شکوهی ف. عبده کلاهی ع. مجیدی ع. یعقوبی ب. و بخشی‌پور آذر. ۱۳۹۳. مدلسازی جریان آب زیرزمینی دشت تویسرکان با استفاده از مدل ریاضی GMS، اولین همایش معماری، عمران و محیط زیست شهری.

۸) علیزاده ا. ۱۳۸۵. اصول هیدرولوژی کاربردی. دانشگاه امام رضا (ع). مشهد. ۸۰۸ صفحه.

۹) کریمی‌پور ا. ر. و رخشنده‌رو غ. ۱۳۹۴. آنالیز حساسیت رفتار هیدرولیکی آبخوان دشت شیراز با استفاده از مدل PMWI. مجله آب و فاضلاب. شماره ۷۸.

۱۰) محمدی ا. کرمی غ. و دولتی ارده‌جانی ف. ۱۳۹۴. مطالعه مدیریت آبخوان با استفاده از مدل PMWIN، مطالعه موردی: آبخوان شیروان. نشریه منابع آب و توسعه، سال اول، شماره ۳.

۱۱) مهدوی م. فرخزاده ب. سلاجقه ع. ملکیان آ. و

- 24) Observation and Geoinformation 13: 127-139.
- 25) Taheri Tizro, A., Voudouris, K. S. and Akbari, K. 2011. Simulation of a groundwater artificial recharge in a semi-arid region of Iran. Irrigation and Drainage 60: 393-403.
- 26) Zhou Y. and Li W. 2011. A review of regional groundwater flow modeling. Geoscience Frontiers 2(2): 205-214.