

## واسنجی و تحلیل حساسیت رفتار هیدرولیکی آبخوان در شبیه‌سازی زهکش حایل دشت قزوین

محمد افلاطونی<sup>۱</sup>، لیلا اسکندری<sup>۲\*</sup>، حسین دهقانی سانج<sup>۳</sup>

۱. استادیار آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد شیراز

۲. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد شیراز

۳. استادیار آبیاری و زهکشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۱۱)

### چکیده

در طرح زهکشی شوره‌زار قزوین، برای کاهش سطح ایستابی و جلوگیری از پیشروی شوری، زهکش حایلی همراه سازه‌های آبی و ۹۹ چاهک مشاهده‌ای در جهت عمود بر زهکش در ۹ راستا احداث شده است. در این پژوهش برای بررسی رفتار هیدرولیکی آبخوان و اثر زهکش حایل با استفاده از مدل PMWIN در حالت جریان ناپایدار با گام زمانی ماهیانه واسنجی ضرایب هیدرودینامیکی با کد PEST و روش سعی و خطا صورت گرفت. در تحلیل حساسیت، مدل در سه مرحله افزایش و سه مرحله کاهش، بدون تغییر در سایر ضرایب هیدرودینامیکی، اجرا شد. واریانس خطا قبل از واسنجی ۰/۳۳۶ و پس از واسنجی به ۰/۱۲۷ متر رسید. بر اساس نتایج شاخص حساسیت (SI) مدل به ترتیب نسبت به ضریب آب‌گذری، تغذیه، و آب‌دهی ویژه بیشترین حساسیت را دارد و تأثیر رسانایی هیدرولیکی زهکش بیشتر در محدوده چاهک‌های مشاهده‌ای مجاور کانال در شعاع تأثیر زهکش است و در کل مدل تأثیر محسوسی ندارد.

**کلیدواژگان:** آب زیرزمینی، شعاع تأثیر زهکش، شوره‌زار قزوین، ضرایب هیدرودینامیکی، واسنجی معکوس، PMWIN

### مقدمه

مدیریت منابع آبی به منظور تأمین نیازهای بشر و کاهش خسارات ناشی از برداشت‌های بی‌رویه موضوع مهمی است که در جهت استفاده بهینه از منابع آبی مطرح است. مدل‌های ریاضی به منزله ابزاری مفید برای شناسایی سیستم و انتخاب گزینه‌های مختلف مدیریتی به کار می‌رود؛ طوری که با تغییر پارامترهای مختلف می‌توان واکنش آبخوان را مشاهده کرد. امروزه در اکثر مناطق جهان، برای تعیین چگونگی و شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. PMWIN یکی از مدل‌های کاربردی شبیه‌سازی جریان در آبخوان‌هاست که بر پایه کد MODFLOW به منزله یک مدل تفاضل محدود سه‌بعدی برای تشریح و پیش‌بینی رفتار جریان در منابع آب زیرزمینی به کار می‌رود. یکی از قابلیت‌های مدل یادشده واسنجی خودکار ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از کد PEST است؛ که با محاسبه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی سطح ایستابی در چاهک‌های مشاهده‌ای به صورت تکراری و با

به حداقل رساندن خطاها عملیات واسنجی را به‌سادگی انجام می‌دهد. بنابراین، ابتدا داده‌ها به صورت لایه‌های مختلف درمی‌آید و به MODFLOW داده می‌شود و پس از اجرای مدل نتایج آن به کد PEST انتقال می‌یابد تا عملیات واسنجی انجام شود.

در پژوهشی برای پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان دشت آب‌باریک بم با استفاده از مدل MODFLOW آبخوان با استفاده از آمار سطح ایستابی در ۲۴ چاه پیرومتری شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد برداشت بیش از حد از آبخوان منطقه در سال‌های اخیر سبب افزایش روند کاهشی سطح ایستابی شده است؛ طوری که طرح تغذیه مصنوعی آبخوان نیز قادر به توقف این روند کاهشی نیست (Katibeh and Hafezi, 2004). پژوهشگران دیگری نشان دادند دشت رامهرمز با مشکل بالابودن سطح ایستابی مواجه است. به همین دلیل گزینه ایجاد زهکش با استفاده از بسته زهکش موجود در MODFLOW در این منطقه به مثابه یک گزینه مدیریتی بررسی شد (Chitsazan *et al.*, 2006). پژوهشگران دیگری در دشت سیرجان تغییرات سطح ایستابی را با مدل MODFLOW شبیه‌سازی کردند. با تخمین پارامترهای هدایت هیدرولیکی ضریب ذخیره و میزان

\* نویسنده مسئول: L.Eskandari@gmail.com

ایستای آبخوان برای پنجاه سال آینده پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد، با افزایش دوره پیش‌بینی، شیب افت کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افت قابل توجه سطح ایستایی با گذشت زمان است (Faatehi *et al.*, 2011). در پژوهشی دیگر برای واسنجی مدل PMWIN در مطالعه تغییرات سطح ایستایی آبخوان دشت جیرفت از داده‌های اندازه‌گیری شده سطح ایستایی در ۴۱ چاه مشاهده‌ای در یک دوره شش ساله استفاده شد. تخمین پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضریب آب‌دهی ویژه، و مقدار تغذیه با استفاده از PEST با تطابق ارتفاع سطح ایستایی اندازه‌گیری شده و به دست آمده از اجرای مدل انجام پذیرفت. نتایج مدل شامل پیش‌بینی تغییرات سطح ایستایی آبخوان دشت جیرفت در چهار سال آینده است (Pour Seyedi and Kashkooli, 2012). با استفاده از تلفیق مدل MODFLOW و MAPGIS وضعیت آبخوان دشت واقع در شمال چین (NCP) بررسی شد. در نهایت بیلان آب زیرزمینی دشت مذکور برای بازه زمانی یک‌ساله تهیه شد. نتایج حاکی از بیلان منفی دشت است که وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی این دشت را در اثر بهره‌برداری بیش از حد مجاز نشان می‌دهد (Wang *et al.*, 2008).

دشت قزوین کاسه‌شکل است و به علت نزدیک شدن سازند مارن به سطح زمین در انتهای دشت خروجی مناسبی ندارد. در طرح ملی زهکشی اراضی شورزار قزوین، برای کاهش سطح ایستایی و جلوگیری از پیش‌روی شوری، زهکش حایلی از نوع خاکی با مقطع دوزنقه‌ای به طول ۳۰ کیلومتر و عرض کف ۲ متر و شیب بدنه ۱ قائم و ۲ افقی و عمق حدود سه متر با شیبی ناچیز طراحی شده که روان شدن آب شور در مسیر طرح را ممکن کرده است. برای پایش اثر زهکش ۹۹ چاهک مشاهده‌ای در راستای عمود بر زهکش در ۹ راستا احداث و با توجه به مقادیر ماهیانه رقوم سطح ایستایی در این چاهک‌ها رفتار هیدرولیکی آبخوان در تغییرات سطح ایستایی با استفاده از مدل PMWIN شبیه‌سازی شد. در حالت جریان ناپایدار شرایط واقعی آبخوان در نظر گرفته شده و دوره مدل‌سازی به صورت یک‌ساله با گام زمانی ماهیانه (۱۲ ماه) صورت گرفته است. بر این اساس ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان با روش PEST و همچنین سعی و خطا واسنجی و میزان حساسیت مدل به پارامترهای ورودی تحلیل می‌شود.

تغذیه با استفاده از مدل PEST تطابق سطح ایستایی با اجرای مدل صورت پذیرفته است. واسنجی و صحت‌سنجی مدل نشان داد مقادیر سطح ایستایی پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر مشاهداتی تطابق خوبی دارد (Abbasi and Rahnama, 2007). برای برآورد عمق و فاصله مناسب زهکش‌های زیرزمینی بر اساس کیفیت زهاب از یک مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Visual MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال نمک به سمت لوله‌های زهکشی استفاده و بر اساس آن رابطه‌ای ارائه و واسنجی شد که بر مبنای آن شاخص‌های کیفیت شیمیایی زهاب (EC و TDS) می‌توانند با توجه به عمق و فاصله زهکش‌ها، بار هیدرولیکی، میزان تغذیه، و مقادیر شاخص‌های شیمیایی جریان ورودی تغذیه‌کننده و آب زیرزمینی تعیین شوند (Aslani *et al.*, 2011). در پژوهشی دیگر، به بررسی رفتار هیدرولیکی آبخوان دشت شیراز پرداخته شده و آبخوان مورد نظر با مدل PMWIN شبیه‌سازی شده و زهکش‌های در حال احداث در این دشت نیز در نظر گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب زهکش‌هاست که در افزایش دبی زهکشی شده در مقایسه با ورودی و خروجی از دشت در همه سناریوها خود را نشان می‌دهد (Karimipour *et al.*, 2010). با استفاده از MODFLOW آب‌های زیرزمینی شهر کرايست چرچ در زلاندنو را بر اساس داده‌های ماهیانه ۱۵۷ چاه تأمین آب شرب شهر مدل‌سازی کردند و با روش واسنجی معکوس PEST پارامترهای هدایت هیدرولیکی و میزان تغذیه را تخمین زدند و با استفاده از داده‌های ۳۱ چاه انتخابی جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کردند (Thorley and Callander, 2005). پژوهشگران دیگری به منظور مشخص کردن محدوده تغذیه چاه‌های آب شرب شهر استراگونبای در ویسکونسین امریکا آب‌های زیرزمینی این منطقه را در دو حالت جریان ماندگار و غیر ماندگار با کد MODFLOW شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل و مقایسه آن‌ها با داده‌های مشاهداتی نشان داد برای منطقه مذکور اجرای مدل در حالت غیر ماندگار بازتاب بهتری نسبت به رفتار آبخوان ارائه می‌دهد (Tod *et al.*, 2001). در پژوهشی با استفاده از مدل MODFLOW شیوه‌ای صحیح در مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان گربایگان در جنوب شرقی شیراز ارائه شد و با استفاده از اطلاعات موجود اقدام به واسنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار شد و برای کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی آزمون صحت‌سنجی انجام شد. سپس هیدروگراف واحد و تراز سطح

زیرزمینی، در سیستم سه‌بعدی، غیر خطی و آب‌گذری غیر ایزوتروپیک (رابطه بوسینسک) به صورت رابطه ۱ (Abkhan Consulting Engineers, 2003) است.

(رابطه ۱)

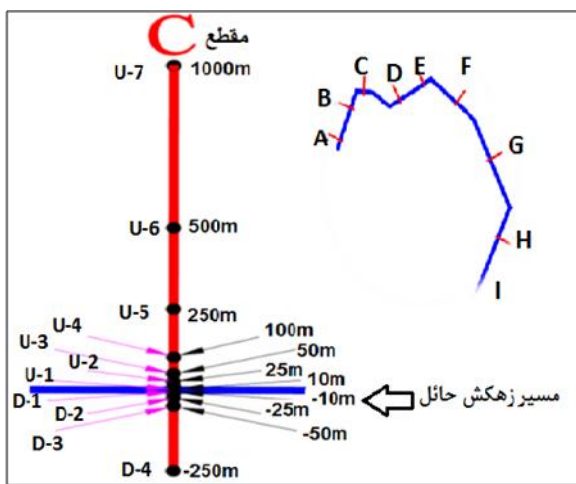
$$\frac{\partial}{\partial x} [K_x h \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_y h \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [K_z h \frac{\partial h}{\partial z}] \pm R = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

$h$  بار هیدرولیکی سفره (L)،  $S_y$  ضریب ذخیره سفره (بدون بعد)،  $R$  تغذیه یا تخلیه (L/T)،  $K$  ضریب آب‌گذری در جهات مختلف (L/T)، و  $t$  زمان (T) است.

در صورتی که  $K_x = K_y = K_z$  باشد معادله به صورت ایزوتروپیک قابل ارائه است.

### شرایط اولیه و مرزهای مدل

شرایط اولیه مدل مقدار پتانسیل سطح آب در آب‌خوان در ابتدای زمان مدل‌سازی است. شبیه‌سازی در حالت ماندگار با استفاده از داده‌های سطح ایستابی تیر ۱۳۸۹ صورت گرفته است. چاهک‌ها در ۹ مقطع A تا I در فاصله‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، و ۱۰۰۰ متر در بالادست (U-۱ تا U-۷) و ۵۰، ۲۵۰ متر در پایین‌دست (D-۱ تا D-۴) زهکش قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ موقعیت چاهک‌های مشاهده‌ای عمود بر زهکش حایل به طور نمونه در مقطع C می‌آید.



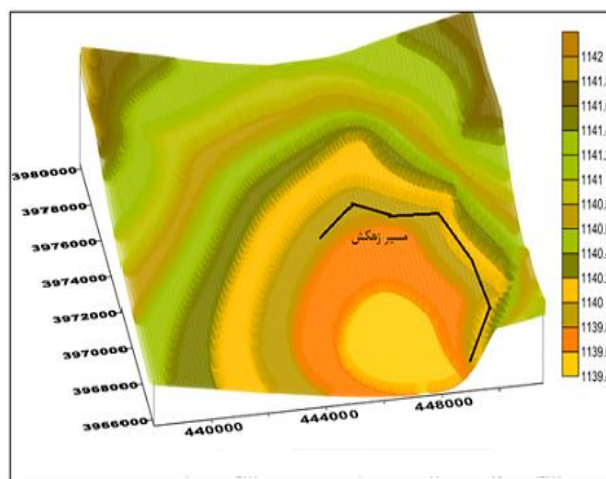
شکل ۲. موقعیت چاهک‌های مشاهده‌ای در مسیر زهکش حایل

مرز فوقانی مدل همان سطح آزاد آب است که بنا به میزان تغذیه و تخلیه در طول زمان تغییر می‌کند و یک سطح تغذیه است. مرز تحتانی مدل لایه نفوذناپذیر یا سنگ بستر است که هیچ‌گونه تبادل جریان از این سطح به داخل یا خارج سیستم وجود ندارد. مرزهای هیدرولیکی منطقه سطوح ایستابی، سنگ کف، و مرزهای جریان عرضی را تشکیل می‌دهد. در این

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد. در سیستم UTM دشت در ناحیه ۳۹ درجه شمالی قرار دارد که شامل حاشیه شوره‌زار قزوین با محدوده جغرافیایی طول‌های ۳۸۰ تا ۴۲۰ کیلومتر و عرض‌های ۳۹۲۰ تا ۳۹۸۰ کیلومتر است. بر اساس گزارش «مطالعات مدل بهره‌برداری بهینه منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت قزوین» این منطقه در اثر یک افتادگی تکتونیکی به وجود آمده و بر اساس جنس رسوبات، وجود رودخانه‌های متعدد، و نحوه رسوب‌گذاری آب‌خوان بزرگی در منطقه ایجاد شده است که قدرت آب‌دهی در قسمت‌های مختلف آن فرق می‌کند. آب‌خوان آزاد و تک‌لایه‌ای، ضخامت متوسط آب‌خوان ۱۵۰ متر، و ضخامت لایه آبدار ۱۲۰ متر در نظر گرفته می‌شود (Abkhan Consulting Engineers, 2003). در این پژوهش نوع شرایط مرزی سیستم آب زیرزمینی از نوع دیریکله (مرز با پتانسیل معلوم)، نوع جریان آب‌خوان آرام، جریان به سمت زهکش‌ها ماندگار و دوبعدی فرض می‌شود. در شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه شده و مسیر اصلی زهکش حایل می‌آید.



شکل ۱. دشت کاسه‌شکل قزوین و مسیر زهکش حایل

### رابطه جریان

جهت تشکیل معادلات پایه در سیستم آب‌خوان با استفاده از یک حجم کنترل فرضی با ابعاد  $\Delta x$  و  $\Delta y$  و  $\Delta z$  و در نظر گرفتن رابطه پیوستگی رابطه حرکت و اصل بقای انرژی رابطه اساسی جریان آب زیرزمینی نوشته می‌شود. روش حل این معادله دیفرانسیل جزئی از طریق تفاضل محدود است. صورت کلی رابطه جریان آب زیرزمینی با توجه به نوسان سطح آب

منظور مقدار ارتفاع هیدرولیکی  $h_{i,j,k}$  در هر گام زمانی و برای هر سلول توسط نرم‌افزار تعیین و مقدار  $d_{i,j,k}$  که برابر رقوم کف کانال زهکش در هر مقطع است وارد مدل می‌شود. در شرایطی که بار هیدرولیکی در آب‌خوان بالاتر از تراز کف کانال زهکش باشد، آب زیرزمینی از آب‌خوان با دبی معینی به سمت کانال زهکش جابه‌جا می‌شود. اگر بار هیدرولیکی در آب‌خوان کمتر از ارتفاع کف زهکش باشد، جریان به سمت زهکش متوقف می‌شود. رسانایی هیدرولیکی زهکش به هدایت هیدرولیکی آب‌خوان موجود در منطقه زهکش و نیز به خصوصیات مصالح پرکننده در اطراف زهکش بستگی دارد. معمولاً مقدار رسانایی هیدرولیکی زهکش به صورت تخمینی وارد مدل می‌شود و در طول واسنجی مقدار مناسبی برای آن در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه دبی وارد شده از هر سلول به داخل زهکش از رابطه ۲ استفاده می‌شود که ساده‌شده رابطه داری است (Karimipour *et al.*, 2010).

$$Q_d = C_d (h-d) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$Q_d$  دبی وارد شده از هر سلول به داخل زهکش  $(L^3/T)$ ،  $C_d$  رسانایی هیدرولیکی زهکش  $(L^2/T)$ ،  $h$  بار هیدرولیکی در سلول آب‌خوان  $(L)$ ،  $d$  ارتفاع کف کانال زهکش در سلول  $(L)$  است. مقدار رسانایی هیدرولیکی زهکش با رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$C_d = K \cdot L \quad (\text{رابطه ۳})$$

$K$  هدایت هیدرولیکی بین آب‌خوان و زهکش  $(L/T)$  و  $L$  طول جریان بین دو سلول زهکش  $(L)$  است.

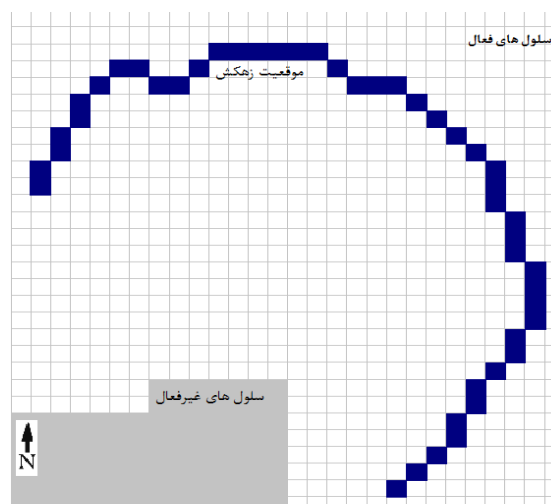
### منابع تغذیه و تخلیه از آب‌خوان

مدل PMWIN قابلیت شبیه‌سازی بیلان آب زیرزمینی در هر گام زمانی در یک دوره مشخص با پارامترهای ورودی را دارد؛ طوری که در صورت وجود نقص در اطلاعات ورودی، با تکمیل آمار بیلان آبی، سایر محاسبات را به صورت خودکار انجام می‌دهد. منابع تغذیه و تخلیه تنش‌های وارد بر آب‌خوان و تشکیل‌دهنده بیلان آب‌خوان منطقه مطالعاتی است. با توجه به مطالعات هواشناسی و گزارش‌های ارائه‌شده در مطالعات مدل بهره‌برداری آب زیرزمینی دشت قزوین، در محدوده حاشیه شوره‌زار دشت قزوین آب‌خوان قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد و در اثر تبخیر شدید این منطقه در اثر سالیان متوالی به شوره‌زار تبدیل شده است. بنابراین منطقه مورد نظر غیر قابل کشت است و در آن فعالیت‌های کشاورزی صورت نمی‌گیرد. منابع تخلیه شامل تبخیر و حجم آب ورودی به زهکش است که در مدل مربوط به شبیه‌سازی زهکش و تبخیر وارد مدل می‌شود. در این

منطقه مرزها با ترسیم خطوط هم‌پتانسیل سطح ایستابی و تعیین جهت حرکت آب با استفاده از نرم‌افزار SURFER تعیین شده است. بنابراین با مشخص شدن جهت جریان و لحاظ کردن اختلاف بار هیدرولیکی طرفین مرزهای جریان عرضی مقادیر جریان ورودی و خروجی در منطقه مشخص می‌شود.

### شبکه‌بندی مدل و ورود فایل‌های Ascii Matrix

ابتدا مختصات و مشخصات کلی مورد نیاز در تشکیل یک مدل مفهومی تعیین و لایه‌های اطلاعاتی از پارامترهای مورد نظر در هر مرحله تشکیل و به صورت ورودی در سیستم مدل‌ساز اصلی استفاده شد. اطلاعات رقوم سطح ایستابی لایه فوقانی و تحتانی با انترپولاسیون به روش کریجینگ ساده در نرم‌افزار ArcGis تبدیل به فایل رستری و به صورت Ascii Matrix وارد مدل MODFLOW شد. آب‌خوان به شبکه‌ای متشکل از ۳۰ سطر و ۲۸ ستون که ابعاد هر سلول ۵۰۰ در ۵۰۰ متر است تقسیم می‌شود. مرزها در شبیه‌سازی ارتفاع هیدرولیکی با نام IBOUND تعریف می‌شود. در مدل‌سازی MODFLOW، سلول‌های فعال با کد ۱ و سلول‌های غیر فعال با کد ۰ و سلول‌های با بار هیدرولیکی ثابت با کد ۱- در نظر گرفته شدند. مطابق شکل ۳ در این شبکه‌بندی سلول‌های سفید بیانگر سلول‌های فعال و سلول‌های خاکستری نشان‌دهنده سلول‌های غیر فعال هستند. مناطق باتلاقی در خروجی محدوده مطالعه شده سلول‌های با بار ثابت در نظر گرفته شد.



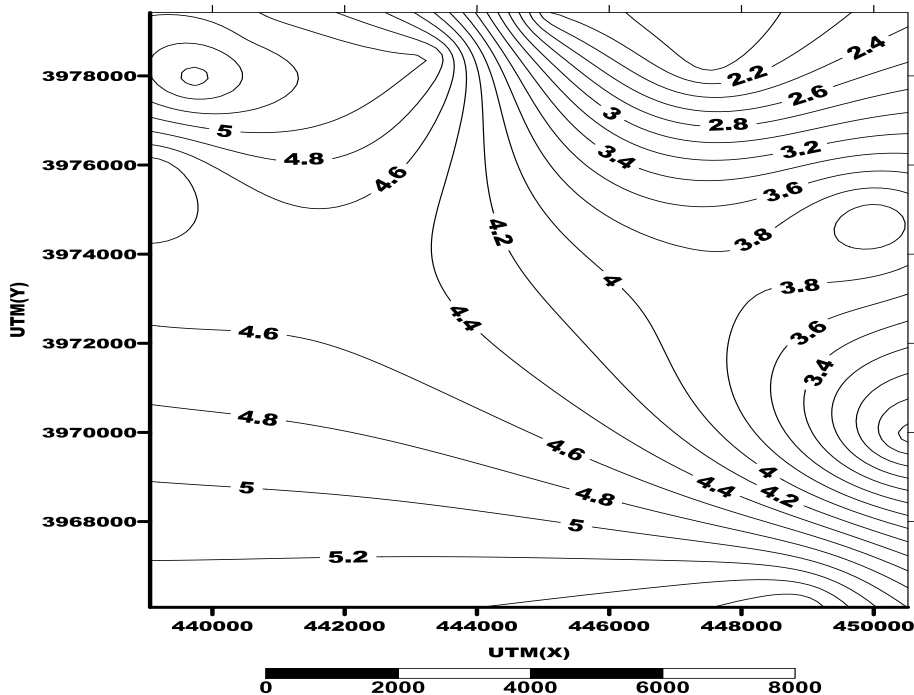
شکل ۳. سلول‌های فعال (سفید)، غیر فعال (خاکستری)، و مسیر زهکش حایل

### رسانایی هیدرولیکی زهکش

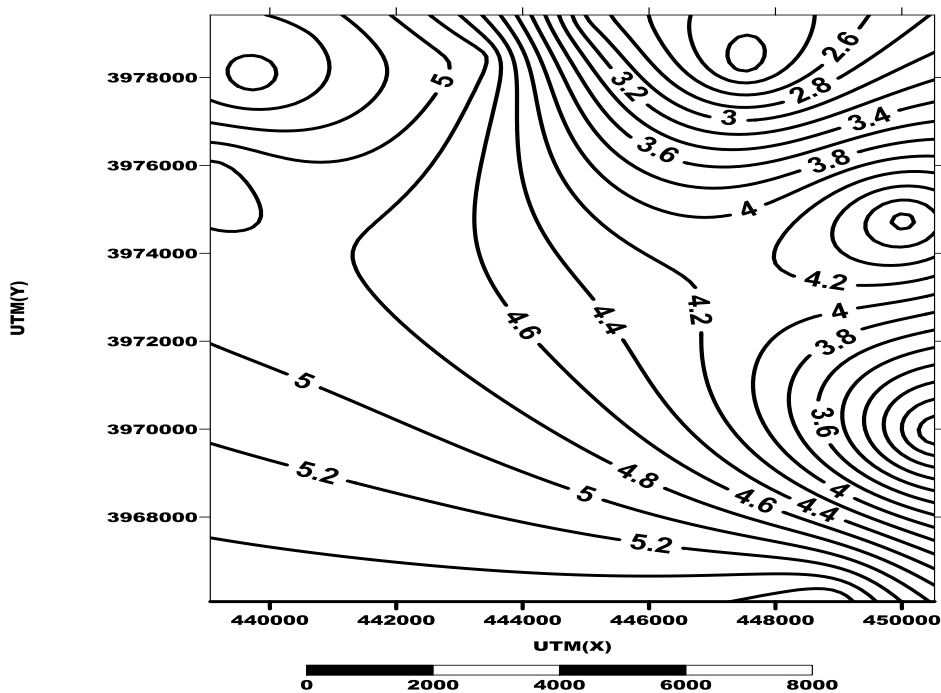
به منظور شبیه‌سازی تأثیر زهکش حایل منطقه از Drain Package موجود در مدل MODFLOW استفاده شد. بدین

نفوذ سطحی از طریق بارش‌های جوی است. در نهایت، مقدار پارامتر تغذیه و تخلیه به هر سلول در ورودی مدل اختصاص داده می‌شود. توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در ۹ مقطع در بالادست و پایین‌دست زهکش در شکل ۴ و ۵ می‌آید.

پژوهش، به دلیل آنکه سطح آب زیرزمینی در طول مسیر زهکش متغیر است و به طور میانگین بین ۱ تا ۳٫۵ متر نسبت به زمین تغییر می‌کند، عمق بحرانی در ۴ متری نسبت به سطح زمین فرض می‌شود و تبخیر از سطح آب زیرزمینی در این عمق در نظر گرفته نمی‌شود. منابع تغذیه شامل نشست از بالادست و



شکل ۴. هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده (متر بر روز) بالادست زهکش



شکل ۵. هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده (متر بر روز) پایین‌دست زهکش

یافته‌ها و بحث

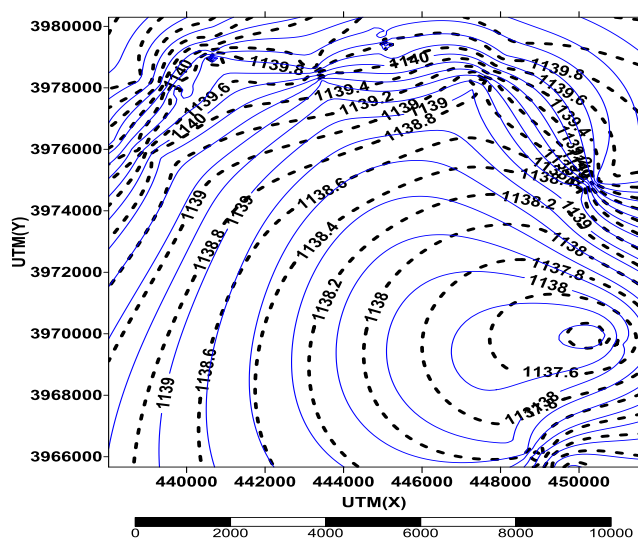
نتایج واسنجی

ابتدا مدل در حالت جریان پایدار اجرا شد و سپس تنظیم واقعی مدل در حالت غیر پایدار صورت گرفت. برای این منظور تخمین حدود ضرایب هیدرودینامیکی با روش واسنجی خودکار PEST صورت گرفت. این روش، به‌رغم اینکه واسنجی مدل را ساده‌تر می‌کند، در آب‌خوان‌هایی با سازند آبرفتی و آهکی، وجود گسل در منطقه یا کافی نبودن چاهک‌های مشاهده‌ای، و وجود عوامل ناشناخته‌ای که در تغذیه و تخلیه دخالت دارند نتایج را با خطا همراه می‌کند. به همین دلیل، واسنجی به صورت دستی (سعی و خطا) نیز انجام شد. بر اساس شکل‌های ۶ و ۷ با اجرای مدل قبل از واسنجی واریانس خطا ۰/۳۳۶ متر بود که پس از واسنجی به مقدار ۰/۱۲۷ متر کاهش یافت. بر اساس گزارش Abkhan Consulting Engineers (2003) ضرایب هیدرودینامیکی که از آزمایش پمپاژ ۲۰۰ حلقه چاه در دشت قزوین به دست آمده مقدار ضریب آب‌گذری بین ۱ تا ۱۶ متر در

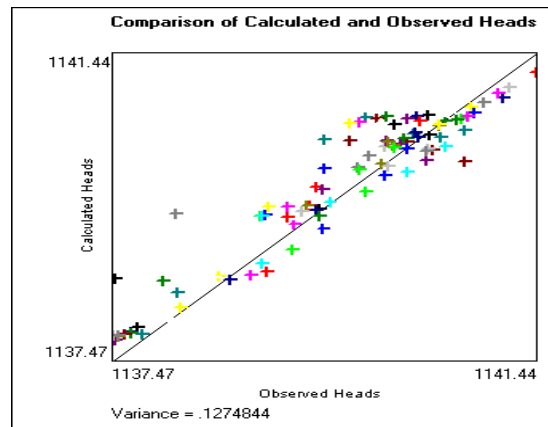
روز است. از طرفی با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی در بالادست و پایین دست زهکش به طور متوسط بین ۲ تا ۶ متر در روز متغیر است. در تحقیق Karimipour et al. (2010) در ۹ چاه مشاهده‌ای قبل از واسنجی واریانس خطا ۱۹/۲ متر در برآورد سطح ایستابی بوده که با واسنجی واریانس به حدود ۳ متر کاهش یافته است. به علاوه ضریب رسانایی زهکش با تخمین اولیه مقدار ۲۰ متر مربع در روز و پس از بهینه‌سازی در طول واسنجی مقدار ۰/۱۰۵ تعیین شد. در پژوهش Pour Seyedi and Kashkooli (2012) در آب‌خوان دشت جیرفت با حل معکوس PEST مقدار تغذیه ۰/۱۰۰۰۱ متر در روز، هدایت هیدرولیکی بین ۰/۱ تا ۱۲ متر در روز، و ضریب آب‌دهی ویژه بین ۳ تا ۵ درصد به دست آمد. تفاوت‌های موجود در نتایج پژوهش حاضر را با توجه به عواملی نظیر بافت خاک، وجود سازندهای بی‌کربناته، تفاوت تراوایی در قسمت‌های مختلف دشت، ویژگی‌های خاص آب‌خوان، و ... می‌توان تفسیر کرد. خلاصه این نتایج در جدول ۱ و مقادیر سطح ایستابی در شروع شبیه‌سازی و پس از آن در شکل ۸ می‌آید.

جدول ۱. نتایج واسنجی پارامترهای اولیه

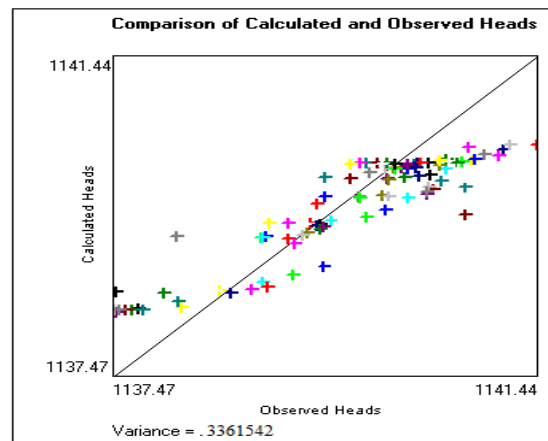
پارامتر	تخمین مقدار اولیه با کد PEST	مقدار تعدیل شده
مقدار تغذیه آب‌خوان (متر در روز)	۰/۱۰۰۰۷۲	۰/۱۰۰۰۵۲
ضریب آب‌گذری (متر بر روز)	۹	۵
تخلخل مؤثر (درصد)	۰/۴	۰/۳۵
قابلیت انتقال (متر مربع بر روز)	۱۰۸۰	۶۰۰
آب‌دهی ویژه (درصد)	۰/۵	۰/۳
رسانایی هیدرولیکی زهکش (متر مربع بر روز)	۷	۰/۱۰۵



شکل ۸. سطح ایستابی آب‌خوان (متر) در شروع شبیه‌سازی (خطوط توپر) و پس از آن (خط چین)



شکل ۶. شبیه‌سازی سطح ایستابی پس از واسنجی



شکل ۷. شبیه‌سازی سطح ایستابی قبل از واسنجی

حساسیت به دست می‌آید. بنابراین، در مرحله اول به صورت دستی از عوامل مورد نظر در سلول‌های شبکه ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصد از مقدار اولیه کاسته و در مرحله بعد همین درصدها به مقدار اولیه اضافه می‌شود. مدل در شش حالت جدید (سه مرحله افزایش و سه مرحله کاهش) بدون تغییر در سایر پارامترهای ورودی اجرا و واریانس خطا در شرایط جدید با توجه به خروجی مدل محاسبه می‌شود. این نتایج در جدول ۲ می‌آید.

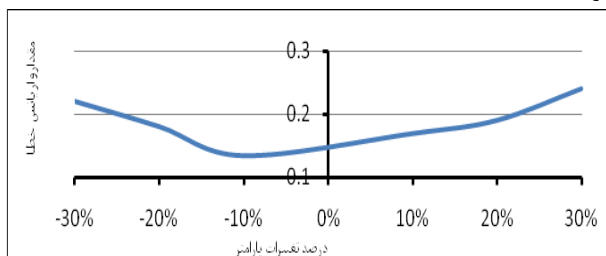
### نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

مبنای تشخیص پارامترهای حساس در این پژوهش واریانس خطا بود که با توجه به Scatter Diagram موجود در مدل MODFLOW به دست آمد. با بررسی نتایج مدل پس از اعمال تغییرات، شاخص حساسیت (SI) در هر یک از پارامترها با واریانس خطا مقایسه شد؛ طوری که افزایش واریانس خطا بیانگر حساسیت بیشتر مدل است. برای هر واریانس خطا یک شاخص

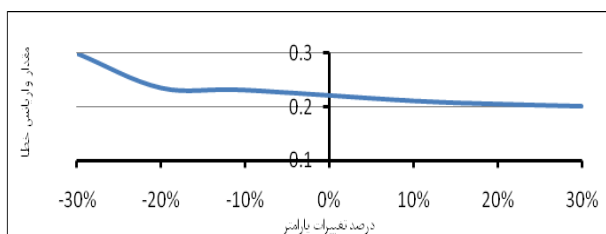
جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای ورودی

درصد تغییرات	هدایت هیدرولیکی		تغذیه		آب‌دهی ویژه	
	واریانس خطا	شاخص حساسیت (SI)	واریانس خطا	شاخص حساسیت (SI)	واریانس خطا	شاخص حساسیت (SI)
۱۰	۰,۲۱۱	۲	۰,۱۶۹	۱	۰,۱۷۳	۱
۲۰	۰,۲۰۴	۲	۰,۱۹۱	۱	۰,۱۷۸	۱
۳۰	۰,۲	۲	۰,۲۴۰	۲	۰,۱۸۳	۱
-۱۰	۰,۲۳۱	۲	۰,۱۳۴	۱	۰,۱۶۳	۱
-۲۰	۰,۲۳۴	۲	۰,۱۸۲	۱	۰,۱۶۵	۱
-۳۰	۰,۲۹۸	۲	۰,۲۲۱	۲	۰,۱۶۹	۱
میانگین	۰,۲۲۸	۲	۰,۱۸۹	۱,۳۳	۰,۱۷۲	۱

محدوده مورد نظر، نتایج مدل با خطای بیشتری مواجه خواهد بود.



شکل ۹. تحلیل حساسیت مدل به مقدار تغییرات تغذیه



شکل ۱۰. تحلیل حساسیت مدل به مقدار تغییرات ضریب آب‌گذری

### حساسیت مدل به مقدار آب‌دهی ویژه

نتایج تحلیل حساسیت نسبت به آب‌دهی ویژه در شکل ۱۱ می‌آید. این شکل نشان می‌دهد با تغییر ضریب آب‌دهی ویژه مقدار نوسانات سطح ایستابی محاسباتی در کل دوره زمانی به شدت کاهش می‌یابد؛ به نحوی که در محلی که ضریب آب‌دهی

### حساسیت مدل به مقدار تغذیه

بر اساس جدول ۲ با افزایش ۳۰ درصد در مقدار تغذیه، مقدار واریانس خطا پس از واسنجی از ۰,۱۲۷ متر در روز به ۰,۲۴ افزایش می‌یابد. تأثیر این ضریب در تراز سطح ایستابی محاسباتی نشان می‌دهد اولاً میزان تغذیه به آب‌خوان با توجه به بیلان آبی محدوده مطالعه شده به راحتی می‌تواند کم یا زیاد برآورد شود و ثانیاً حساسیت مدل نسبت به میزان تغذیه بسیار زیاد است. شکل ۹ نشان می‌دهد حساسیت مدل نسبت به افزایش تغذیه بیشتر از کاهش تغذیه است که به علت تأثیرگذاری هدایت هیدرولیکی بر مقدار تغذیه آب‌خوان در این ناحیه است.

### حساسیت مدل به مقدار هدایت هیدرولیکی

بر اساس شکل ۱۰، با افزایش ۳۰ درصد مقدار هدایت هیدرولیکی واریانس خطا از ۰,۱۲۷ به ۰,۲ متر در روز افزایش می‌یابد. در حالی که کاهش ۳۰ درصد این ضریب باعث افزایش واریانس به ۰,۳ می‌شود. بنابراین هر چه هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد، افزایش واریانس با شیب بیشتری نسبت به بالا رفتن هدایت هیدرولیکی صورت می‌گیرد. این مطلب نشان می‌دهد مدل به کاهش هدایت هیدرولیکی حساسیت بیشتری دارد. در نتیجه با تخمین کمتر هدایت هیدرولیکی در کل



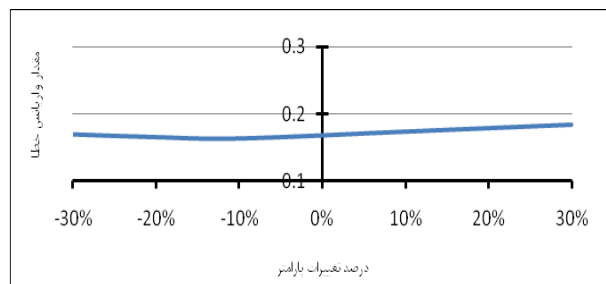
چاهک‌هایی که در نزدیکی زهکش قرار گرفته‌اند تغییرات اندکی مشاهده می‌شود و در سایر چاهک‌ها تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که تأثیر رسانایی هیدرولیکی زهکش بیشتر محدود به چاهک‌های مشاهده‌ای است که در مجاورت کانال زهکش قرار گرفته‌اند و در کل مدل تأثیر چندانی ندارد.

نتایج پژوهش Karimipour *et al.* (2010)، که به منظور آنالیز حساسیت آب‌خوان دشت شیراز صورت گرفت، نشان داد مدل به ترتیب نسبت به مقدار تغذیه، هدایت هیدرولیکی، و ضریب آب‌دهی ویژه حساس است. آن‌ها تأثیر رسانایی هیدرولیکی زهکش را فقط در نزدیک‌ترین پیژومترها در محدوده زهکش برآورد کردند. پژوهش Pour Seyed and Kashkooli (2012) در آنالیز حساسیت آب‌خوان دشت جیرفت نشان داد مدل نسبت به تغییرات تغذیه بیشترین و به مقادیر آب‌دهی ویژه کمترین حساسیت را دارد. شکل ۱۲ نتایج تحلیل حساسیت مدل در پژوهش حاضر را در مقایسه با پارامترهای مورد نظر نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییرات رسانایی هیدرولیکی زهکش

شماره چاهک مشاهده‌ای	فاصله از زهکش (متر)	وارianس خطا	شاخص حساسیت
U-۷	-۱۰۰۰	۰٫۱۱۳	۱
U-۳	-۵۰	۰٫۱۶۶	۱
U-۱	-۱۰	۰٫۱۷۴	۱
D-۴	۲۵۰	۰٫۱۵۳	۱
D-۳	۵۰	۰٫۱۶۲	۱
D-۱	۱۰	۰٫۱۷۱	۱

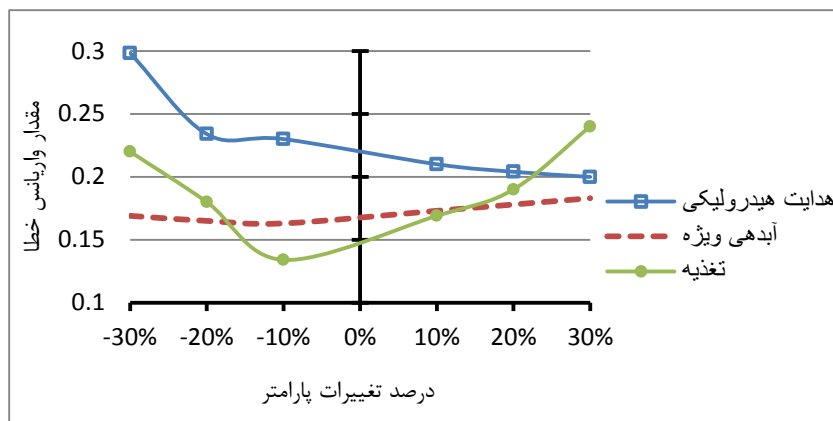
ویژه کمتر است دامنه نوسانات سطح آب بیشتر است. طبق نتایج موجود در نمودار حساسیت مدل نسبت به افزایش تغذیه بیشتر از کاهش آن است؛ طوری که افزایش ۳۰ درصدی تغذیه واریانس خطا را به ۰٫۱۸ می‌رساند. در حالی که کاهش ۳۰ درصدی این مقدار واریانس خطا را به کمتر از ۰٫۱۷ کاهش می‌دهد. شیب نسبتاً ملایم نمودار نشان می‌دهد حساسیت مدل به این پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر کمتر است.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت مدل به تغییرات مقدار آب‌دهی ویژه

### نتایج تحلیل حساسیت مدل به مقدار رسانایی هیدرولیکی زهکش

رسانایی هیدرولیکی زهکش (متر مربع در روز) به هدایت هیدرولیکی آب‌خوان نزدیک به زهکش یا به تعبیری خصوصیات مصالح پرکننده که اطراف زهکش‌ها استفاده می‌شود بستگی دارد. بنابراین برای بررسی حساسیت مدل به رسانایی هیدرولیکی زهکش به طور تصادفی از چند چاهک مشاهده‌ای که در فواصل مختلف نسبت به زهکش قرار گرفته‌اند استفاده شد. نتایج نشان داد تغییرات ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصدی تأثیر چندانی بر مقدار رسانایی هیدرولیکی زهکش ندارد و همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد با ۶۰ برابر کردن این ضریب یعنی تغییر ضریب پس از واسنجی از مقدار ۰٫۱۰۵ متر مربع در روز به سه فقط در



شکل ۱۲. مقایسه تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی



بیشتر در محدوده چاهک‌های مجاور زهکش مشاهده می‌شود که در ناحیه شعاع تأثیر زهکش قرار دارند و در کل مدل تأثیر محسوسی ندارد. بنابراین مقادیر واسنجی شده و آنالیز حساسیت در پژوهش حاضر در محدوده قابل قبولی قرار دارد و با توجه به طبیعت حاکم بر آب‌خوان سازگاری خوبی را نشان می‌دهد.

### سپاس‌گزاری

بدین وسیله از همه کسانی که شرایط مناسب را برای این پژوهش فراهم آوردند، به‌ویژه کارشناس مطالعات پروژه طرح زهکشی حاشیه شورزار قزوین، استاد گرامی آقای مهندس مجتبی اکرم، کمال تشکر و امتنان را دارد.

### REFERENCES

- Abkhan Consulting Engineers (2003). "Optimal operation model of water resources studies of surface and groundwater Qazvin plain". Mathematical model of groundwater, volume 8.
- Aslani, F. and Nazemi, A. H. (2011). "Estimation proper depth and distance of underground drainage based on quality drains". *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2, 139-146. (In Farsi)
- Chitsazan, M. and Saatsaz, S. (2006). "Application of mathematical model of MODFLOW in water Resources management options Ramhormoz Plain". *Journal Science of Shahid Chamran University*, 14, 1-15. (In Farsi)
- Fatehi, M. A., Taei Samiromi, M., Kolahchi, A., and Mirnia, S. Kh. (2011). "Prediction of water table fluctuations of Garbayegan aquifer for the period 1387 to 1437 Using numerical MODFLOW model". *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 34(2), 1-13. (In Farsi)
- Karimipour, A. R. and Rakhshandehroo, Gh. R. (2012). "Evaluating the performance of drainage system in dropping water table elevation in Shiraz Plain". *Journal of Water and Wastewater*, 2, 30-41. (In Farsi)
- Karimipour, A. R. and Rakhshandehroo, Gh. R. (2011). "Sensitivity Analysis for hydraulic behavior of Shiraz plain aquifer using PMWIN". *Journal Water and Wastewater*, 2, 102-111. (In Farsi)
- Katibeh, H. and Hafezi, S. (2004). "Application of Modflow in groundwater management and evaluation of artificial recharge of Ab-barik aquifer (Bam)". *Journal of Water and Wastewater*, 50, 45-58. (In Farsi)
- M. Abbasi, R. and Rahnama, M. B. (2007). "Simulation and Evaluation of Sirjan aquifer, using MODFLOW model and effects on Tangouyeh dam". *Iranian Journal of Water Research, Shahrekord University*, 1, 1-9. (In Farsi)
- Thorley, M. and Callander, P. (2005). "Christchurch city groundwater model". Environment Canterbury report U05/53. 10.
- Pour Seyed, A. and Kashkooli, H. L. (2012). "Study of groundwater status in Jiroft plain using PMWIN model". *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 35(2), 1-13. (In Farsi)
- Todd, W. R. and Kenneth, R. B. (2001). "Report: Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite. Sturgeon Bay, Wisconsin, USA". *Hydrogeology Journal*, 9, 432-450.
- Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z. and Zhou, X. (2008). Application of MODFLOW and Geographical information system to groundwater flow simulation in North plain, China. *Environ Geol*, 55, 1449-1462.

### نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد واسنجی مدل در جریان ناپایدار سبب نزدیک‌تر شدن سطح ایستابی محاسباتی و مشاهداتی به یکدیگر می‌شود؛ طوری که واریانس خطا قبل از واسنجی ۰/۳۳۶ متر و پس از واسنجی به ۰/۱۲۷ می‌رسد. با توجه به میانگین واریانس خطا در شاخص حساسیت (SI) مشخص می‌شود که اولاً مدل به‌ترتیب در برابر ضریب آب‌گذری، پارامتر تغذیه، و آب‌دهی ویژه بیشترین حساسیت را دارد و در نتیجه با تخمین کمتر هدایت هیدرولیکی در کل محدوده مورد نظر نتایج مدل با خطای بیشتری مواجه خواهد بود و ثانیاً حساسیت مدل نسبت به مقدار رسانایی هیدرولیکی زهکش