



## مدل سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه سازی برداشت آب زیرزمینی

مهدی کرد<sup>۱\*</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۲</sup>، محمد نخعی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه کردستان  
۲- استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز  
۳- استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی  
\* نویسنده مسئول: m.kord@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

### چکیده

دشت اردبیل در شمال غرب ایران و در استان اردبیل قرار دارد. این دشت توسط ارتفاعاتی که بخشی از رشته کوه البرز هستند، احاطه شده و با وسعتی در حدود ۹۹۰ کیلومتر مربع جمعیتی در حدود ۵۶۴۰۰۰ نفر را در خود جا داده است. افزایش سریع تقاضای آب طی ۲۵ سال گذشته در دشت اردبیل، منجر به بهره‌برداری زیاد آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح ایستابی به میزان بالغ بر ۱۲ متر شده است. کاهش سطح آب زیرزمینی علاوه بر کاهش ذخیره آبخوان، می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری بر جا بگذارد. تنها در صورت مدیریت برداشت آب زیرزمینی این مسئله قابل کنترل خواهد بود. لذا هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی برداشت آب از این آبخوان به منظور جلوگیری از افت بیشتر سطح ایستابی و در صورت امکان، جبران کاهش ذخیره آن است. در این پژوهش بر اساس پروتکل مدل سازی، ابتدا مدل مفهومی آبخوان دشت اردبیل تهیه گردید. بدین منظور پایگاه داده‌ای، شامل داده‌های کیفی و کمی در محیط ArcGIS تشکیل و روش‌های کریجینگ و منطق فازی برای تهیه انواع نقشه‌های پهنه‌بندی، به کار رفتند. پس از تعیین هندسه آبخوان، پارامترهای ورودی و خروجی، سیستم جریان آب زیرزمینی و پارامترهای هیدرولیکی، از کد Modflow 2005 به وسیله نرم‌افزار PMwin8، برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل استفاده شد. بعد از مدل سازی جریان آب زیرزمینی، بر اساس مقدار افت، آبخوان دشت اردبیل به پانزده بخش، زون‌بندی و پس از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار PEST، مقادیر برداشت مجاز محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده برای تعادل بخشی سطح ایستابی آبخوان، بیشترین بهره برداری مربوط به شرق آبخوان و کمترین بهره‌برداری مربوط به مرکز دشت می‌باشد. واژه‌های کلیدی: آبخوان دشت اردبیل، بهینه‌سازی، مدیریت آب زیرزمینی، مدل سازی عددی.

### مقدمه

مدل سازی آب زیرزمینی یکی از ابزارهای استفاده شده در علوم هیدروژئولوژی برای ارزیابی پتانسیل منابع و پیش‌بینی اثرات آینده تنش‌های مختلف وارد شده به رژیم آب زیرزمینی است (گوش و شارما، ۲۰۰۶). مطالعات زیادی در خصوص مراحل مختلف تهیه مدل ریاضی از قبیل مرحله آنالیز حساسیت، واسنجی، صحت‌سنجی و تعیین اعتبار مدل صورت گرفته است که از آن میان می‌توان به ارائه روشی سازمان یافته جهت

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب کشور، یکی از اهداف اصلی برای آینده است. مخصوصاً زمانی که با افزایش تقاضای آب آشامیدنی سالم این مناطق مواجه باشیم. مدیریت آب زیرزمینی نیازمند فهم سیستم آب زیرزمینی، پایش آب زیرزمینی و مدل سازی است. از آنجا که مدیریت به معنی استفاده از ابزارها برای اتخاذ تصمیم است،

رابطه بین بار هیدرولیک و چند پارامتر از پارامترهای مؤثر بر آن، به علت نقص داده، تنظیم می‌گردند. لذا بر اساس پروتکل مدل سازی، استفاده از مدل‌هایی مانند مادفلو که دقیقاً معادلات حاکم بر آبخوان را به کار می‌برند، از ارجحیت نسبی برخوردار است. در دشت اردبیل حدود ۵۶۴۳۶۵ نفر در وسعتی حدود هزار کیلومتر مربع زندگی می‌کنند که در دو شهر (اردبیل و آبی‌بیگلو) و ۸۸ روستا ساکن می‌باشند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰). محدودیت پتانسیل آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت اردبیل و عدم توجه به میزان برداشت مجاز و عدم تغذیه کافی به علت مقدار کم بارش در سال‌های کم‌آبی و خشک دوره‌های کلیماتولوژی موجب گردیده که این آبخوان طی ۲۵ سال گذشته با کاهش حجم مخزن و افت ۱۲ متری سطح ایستابی روبرو شود. افت سطح ایستابی می‌تواند مشکلات متعددی را در آبخوان ایجاد کند که شامل مواردی از قبیل: افزایش هزینه پمپاژ، کاهش کیفیت آب پمپاژ شده، ایجاد و توسعه مخروط‌های افت و نشست زمین، می‌باشد. لذا مطالعه و بررسی علمی و اصولی منابع آب زیرزمینی، به منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی در این دشت ضروری است. از این‌رو، آبخوان دشت اردبیل با هدف مدل‌سازی و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت این آبخوان با استفاده از بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت.

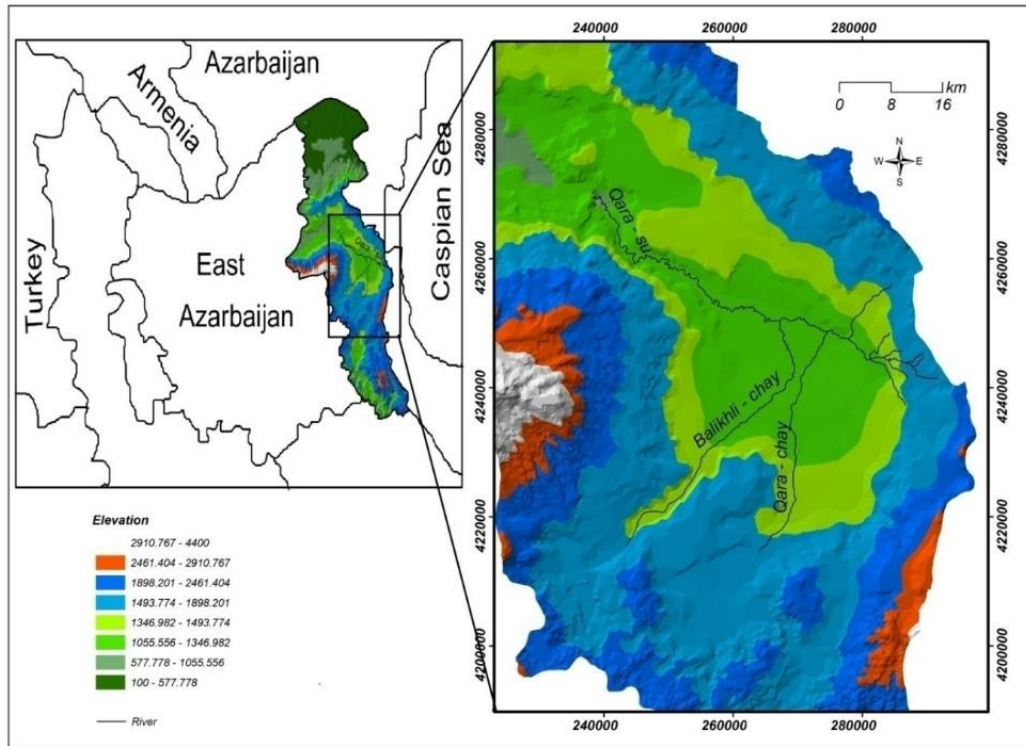
### مواد و روش‌ها

#### محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت اردبیل در محدوده طول شرقی  $48^{\circ}40'$  -  $48^{\circ}00'$  و عرض شمالی  $38^{\circ}30'$  -  $38^{\circ}00'$  قرار گرفته است. از نظر توپوگرافی بخش پیرامونی منطقه، کوهستانی بوده و بخش مرکزی آن دشت آبرفتی است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بیشترین ارتفاع مربوط به قله سبلان با ارتفاع ۴۸۱۰ متر از سطح دریا و کمترین ارتفاع مربوط به ناحیه خروجی در شمال غربی دشت با ارتفاع ۱۱۷۰ متر از سطح دریا

کالیبراسیون مدل‌های جریان آب زیرزمینی در شرایط پایدار در سال ۱۹۹۵ توسط یه و ماک (۱۹۹۵) و نیز کالیبراسیون اتوماتیک مدل‌های آب زیرزمینی توسط هیل (۱۹۹۸) اشاره کرد. پریکت و لانکوئیست (۱۹۷۱) نیز به منظور پیش‌بینی عکس‌العمل آبخوان ناحیه شیکاگو در مقابل پمپاژ، از روش تفاضلات محدود استفاده کردند (به نقل از سوییتزرنلد، ۱۹۹۹). برای بررسی رفتار پیچیده سیستم آب زیرزمینی و تعیین بهترین شیوه مدیریتی، ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. از مواردی که به منظور بررسی مشکلات مهم مدیریت آب زیرزمینی از ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی آب زیرزمینی با ابزار بهینه‌سازی استفاده شده، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. نیشیکاوا (۱۹۹۸) از مدل عددی مادفلو و مدل بهینه‌سازی لیندو برای مدیریت بهینه منابع آب سانتا‌باربارای کالیفرنیا استفاده کرد. وی از مادفلو برای مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی و از لیندو برای کمینه کردن هزینه تأمین آب با در نظر گرفتن قیود تقاضای آب و بار هیدرولیکی برای کنترل پیش‌روی آب شور استفاده کرد. همچنین سلیمان خرمة (۲۰۰۷) از مادفلو برای بدست آوردن مقدار بهینه پمپاژ آب زیرزمینی آبخوان ائوسن در بیابان جنین در محدوده طرابلس استفاده کرد. در ایران نیز موارد زیادی از مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌وسیله مادفلو وجود دارد. یکی از این موارد، شبیه‌سازی و مدیریت بهره‌برداری از آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر است (میرعباسی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵). آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار PMwin و تعریف سناریوهای مختلف وضعیت کاهش سطح ایستابی این دشت و پیشروی آب شور به داخل آبخوان را بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که کاهش برداشت بیشترین تأثیر را در کاهش این مشکل دارد. استفاده از مدل‌های جعبه سیاه در بسیاری از مطالعات بررسی سطح ایستابی، بسیار رایج شده است (مانند: نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۵). اما در مورد این مدل‌ها این نکته را همیشه باید مورد توجه داشت که از معادلات حاکم بر آبخوان استفاده نشده و صرفاً بر اساس ایجاد

می‌باشد. این دشت دارای سه رودخانه اصلی قره‌سو، بالخلوچای و نوران چای، هیرچای و شهریبورچای نیز از دیگر رودهای این دشت و قوری چای می‌باشد.



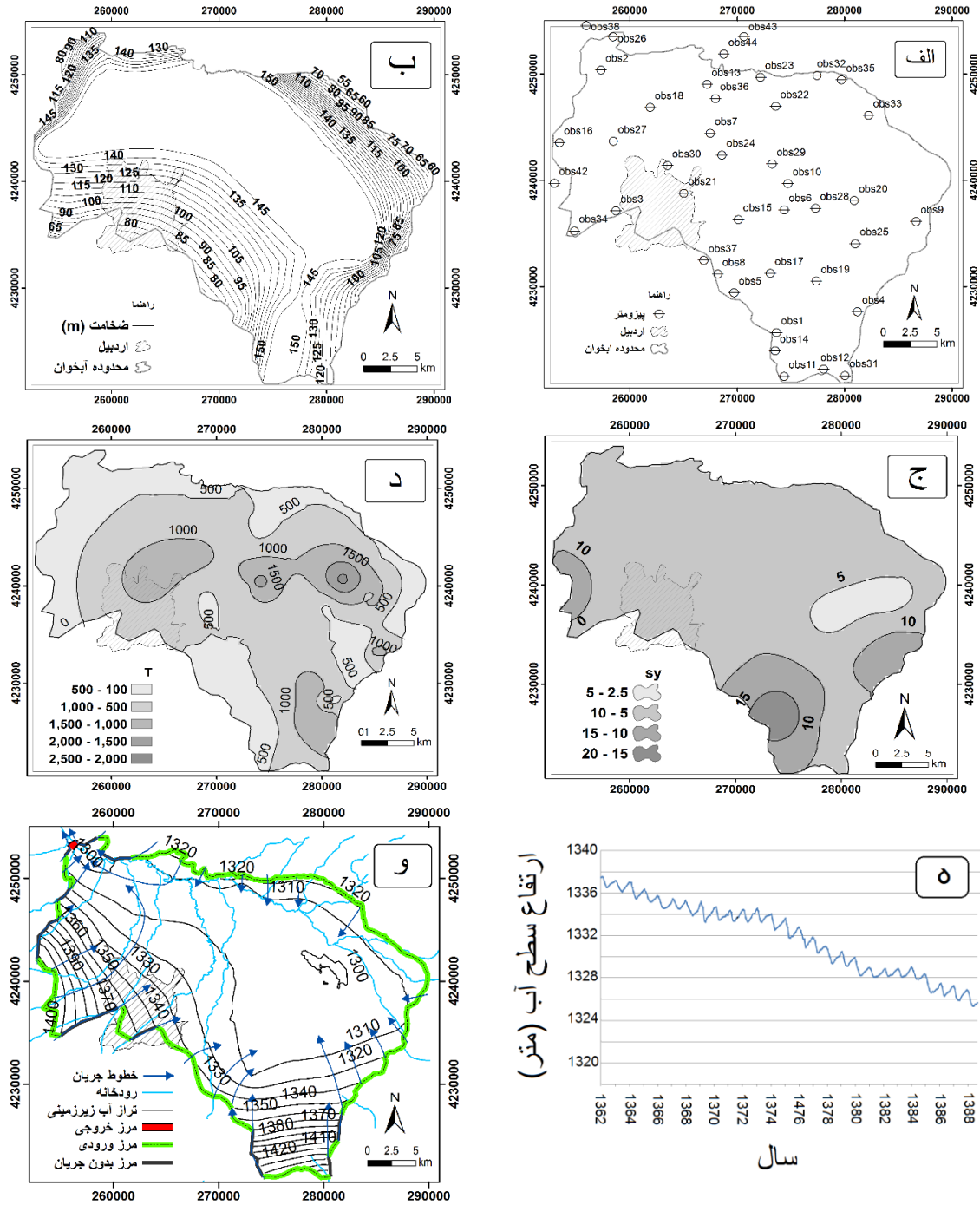
شکل ۲- موقعیت جغرافیایی پهنه مطالعاتی.

در پژوهش حاضر سعی گردید که با نهایت دقت به بررسی آبخوان دشت اردبیل از جنبه‌های مختلف هیدروژئولوژی پرداخته شود. داده‌های خام به محیط نرم‌افزار ArcGIS منتقل گردید و نقشه‌های لازم به کمک این نرم‌افزار استخراج گردیدند. در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی از نرم‌افزار GS+ که یک نرم‌افزار تخصصی برای درون‌یابی است، استفاده گردید. مقادیر پارامترهای ورودی آبخوان، مرزهای هیدرولیکی، ضخامت آبرفت، جهت جریان، مقادیر تخلیه از آبخوان، روند تکامل هیدروشمیایی آب و ... تخمین زده شدند و نتایج حاصل در قالب فایل‌های تصویری، متنی و ASCII برای مدل‌سازی تولید شدند. در شکل ۲ تعدادی از نقشه‌های تولید شده به عنوان نمونه آورده شده است.

به منظور تهیه و طراحی یک مدل آب زیرزمینی مناسب، بایستی از یک پروتکل مدل‌سازی مناسب تبعیت کرد (اندرسون و ووسنر، ۱۹۹۲). در این تحقیق مراحل تهیه مدل ریاضی آبخوان دشت اردبیل شامل مراحل زیر است:

- ۱- تعیین هدف از مدل‌سازی ۲- جمع‌آوری آمار و اطلاعات و تهیه مدل تفهیمی آبخوان ۳- انتخاب معادله حاکم و کد کامپیوتری ۴- طراحی و ساخت مدل ۵- واسنجی ۶- آنالیز حساسیت ۷- صحت‌سنجی ۸- بهینه‌سازی برداشت آب از آبخوان.

#### مدل مفهومی



شکل ۲- الف) محل پیزومترها، ب) نقشه هم‌ضخامت آبخوان تولید شده با استفاده از ژئوفیزیک و لاگ حفاری چاه‌های اکتشافی، ج) نقشه هم‌ $T$ ، د) نقشه هم‌ $Sy$ ، ه) میانگین سالانه آب زیرزمینی، و) مرزهای ورودی، خروجی و مرزهای بدون جریان آبخوان.

معادلات حاکم بر آبخوان آزاد استفاده شود. معادله کلی جریان در آبخوان آزاد که به معادله بوزینسک معروف است، با رابطه ۱ نشان داده می‌شود.

### انتخاب معادله حاکم و کد کامپیوتری

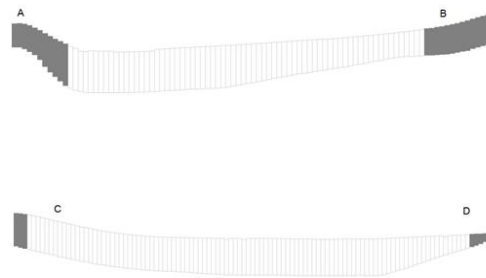
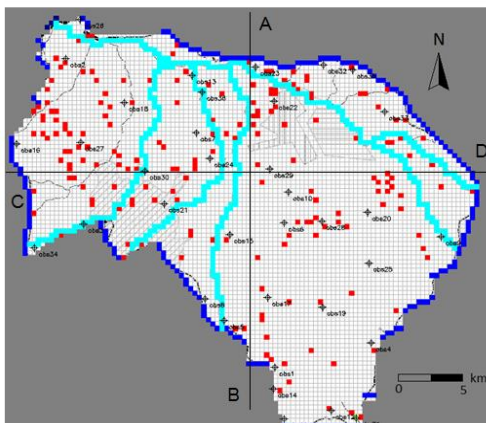
بر اساس مدل مفهومی، آبخوان دشت اردبیل، آبخوان آزاد می‌باشد. لذا برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی باید از

ستون و ۹۵ ردیف با سلول‌های ۳۵۰ متری شبکه‌بندی گردیده است. اطلاعات هیدرولیکی مربوط به دشت اردبیل از چاه‌های پمپاژ و سطح ایستابی نیز از چاه‌های پیزومتر به دست می‌آیند. این اطلاعات مربوط به ضخامتی است که چاه پمپاژ و یا چاه پیزومتر در آن نفوذ کرده است و برآیند خصوصیات لایه‌های تشکیل دهنده آبرفت می‌باشد. بر این اساس، مدل یک لایه در نظر گرفته شده است. پس از شبکه‌بندی شرایط مرزی مدل تعیین می‌گردد. در محیط PMwin8 شرایط مرزی بار ثابت با عدد ۱-، مرز بدون جریان یا سلول‌های غیرفعال با عدد صفر و سلول‌های فعال داخل محدوده شبیه‌سازی با عدد ۱ مشخص می‌شوند. شرایط مرزی آبخوان دشت اردبیل بر اساس مدل مفهومی شامل مقاطع ورودی، مرز بدون جریان و سطح با بار ثابت می‌باشند. مرزهای ورودی با استفاده از چاه‌های تزریق شبیه‌سازی شدند که در شکل ۳ با رنگ آبی کمرنگ مشخص شده‌اند. با توجه به مدل مفهومی مرز با بار ثابت در پهنه کوچکی از شمال غربی دشت قرار دارد که با رنگ آبی پررنگ نشان داده شده است. دوره مدل‌سازی با مقایسه نتایج بیلان آب زیرزمینی و تغییرات ذخیره آبخوان تعیین گردید. مقادیر محاسبه شده اجزای بیلان در جدول ۱ و خلاصه سالانه بیلان در جدول ۲ آورده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h^2}{\partial z} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm 2W$$

که در آن  $h$  بار هیدرولیکی  $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_z$  هدایت هیدرولیکی به ترتیب در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$ ،  $S_y$  آب‌دهی ویژه و  $W$  مؤلفه تغذیه یا تخلیه است. در این معادله مؤلفه تغذیه با علامت منفی و مؤلفه تخلیه با علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های تفاضل محدود برای برنامه‌نویسی ساده‌تر بوده، به داده کمتری نیاز داشته و برای ورود داده به آن‌ها کاربر پسندتر هستند. نرم‌افزار مادفلو نیز از طریق تفاضل محدود جریان سه بعدی آب را شبیه‌سازی می‌کند که بسیار قابل اطمینان، تصحیح شده و کارا برای مدل‌سازی است. یکی از بسته‌های نرم‌افزار گرافیکی که بسیار مورد توجه مدل‌سازان است، پروسیسینگ مادفلو پرو<sup>۲۹</sup> است (چیانگ و کینزلباخ، ۲۰۰۱؛ چیانگ، ۲۰۰۱) که دارای چندین ضمیمه، بسته‌های نرم‌افزاری گرافیکی پیش و پس‌پردازش‌گر برای مادفلو است و ورود داده و به تصویر کشیدن خروجی را بسیار آسان می‌کند. در این پژوهش از PMwin8 استفاده شده است. طراحی شبکه در واقع شروع طراحی یک مدل‌سازی کامپیوتری واقعی است.

در پژوهش انجام شده با توجه به وسعت آبخوان، هدف مدل‌سازی و شرایط هیدروژئولوژیکی، محدوده مدل‌سازی به وسیله ۱۰۹



شکل ۳- شبکه‌بندی، شرایط مرزی، مقاطع طولی و عرضی آبخوان (سلول‌های غیرفعال با رنگ خاکستری نشان داده شده‌اند).

جدول ۱- مقادیر برآورد شده برای اجزای بیلان محدوده مطالعاتی بر حسب مترمکعب (سال آبی ۸۷-۱۳۸۶).

ماه	*مجموع تغذیه	**مجموع تخلیه	تغییرات ذخیره
مهر	۱۴۲۸۵۷۳۳	۶۴۵۳۰۸۶/۷	۷۸۳۲۶۴۶/۸
آبان	۱۸۶۲۱۹۴۲	۶۳۸۱۱۰۲/۵	۱۲۲۴۰۸۳۹
آذر	۱۸۸۴۴۰۷۶	۷۱۷۳۰۵۱/۷	۱۱۶۷۱۰۲۴
دی	۱۶۱۴۵۳۶۳	۴۶۸۱۹۴۱/۵	۱۱۴۶۳۴۲۱
بهمن	۱۳۷۵۷۶۳۸	۳۱۰۳۶۲۸/۶	۱۰۶۵۴۰۰۹
اسفند	۱۴۱۹۵۳۰۵	۳۷۹۱۷۴۶/۲	۱۰۴۰۳۵۵۹
فروردین	۱۷۴۹۹۳۸۱	۲۲۳۷۸۸۴۷	-۴۸۷۹۶۶۶/۲
اردیبهشت	۲۱۶۹۴۲۶۳	۲۲۲۲۴۳۹۸	-۵۳۰۱۳۵/۸۹
خرداد	۱۹۷۸۶۶۴۷	۲۲۱۹۳۲۲۰	-۲۴۰۶۵۷۲/۷
تیر	۱۹۶۲۴۵۰۴	۱۷۶۱۶۸۱۸	۲۰۰۷۶۸۶/۳
مرداد	۱۸۲۰۷۶۲۴	۱۷۶۴۶۰۴۵	۵۶۱۵۷۹/۰۷
شهریور	۱۷۰۰۵۸۷۰	۱۷۵۵۹۵۳۲	-۵۵۳۶۶۱/۴۶
پاییز	۵۱۷۵۱۷۵۱	۲۰۰۰۷۲۴۱	۳۱۷۴۴۵۱۰
زمستان	۴۴۰۹۸۳۰۶	۱۱۵۷۷۳۱۶	۳۲۵۲۰۹۹۰
بهار	۵۸۹۸۰۲۹۱	۶۶۷۹۶۴۶۶	-۷۸۱۶۱۷۴/۸
تابستان	۵۴۸۳۷۹۹۸	۵۲۸۲۲۳۹۴	۲۰۱۵۶۰۳/۹
سالانه	۲۰۹۶۶۸۳۴۶	۱۵۱۲۰۳۴۱۷	۵۸۴۶۴۹۲۹

\* شامل: تغذیه حاصل از بارش، برگشتی از کشاورزی، برگشتی از شرب و صنعت، تغذیه زیرزمینی و تغذیه از رودخانه  
\*\* شامل: چاه، چشمه، قنات، تبخیر، زهکشی و تخلیه زیرزمینی

جدول ۲- خلاصه محاسبات بیلان بر حسب میلیون مترمکعب (سال آبی ۸۷-۱۳۸۶).

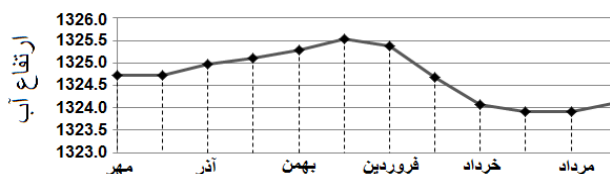
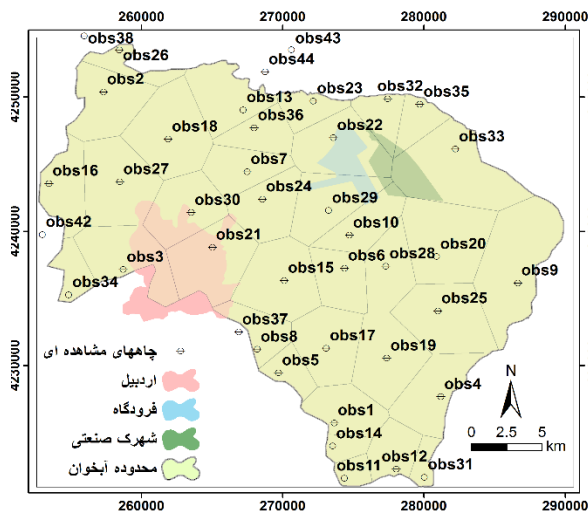
عوامل تغذیه کننده (MCM)	عوامل تخلیه کننده (MCM)
جریان ورودی زیرزمینی	جریان خروجی زیرزمینی
۹۲/۰۱	۰/۲۱
تغذیه از بارندگی	زهکشی طبیعی
۲۱/۲۳	۶/۸۷
نفوذ از آب سطحی	تبخیر از سطح آب زیرزمینی
۴۹/۹۵	۱/۱۴
آب برگشتی کشاورزی	چاه‌های بهره‌برداری چشمه‌ها و قنات
۲۸/۹۵	۱۴۲/۹۹
آب برگشتی شرب و صنعت	
۱۷/۵۲	
مجموع	۱۵۱/۲۰
تغییرات حجم مخزن	۵۸/۴۶

همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، آبخوان دشت اردبیل در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ با افزایش حجم آب در حدود ۵۸/۴۶ میلیون مترمکعب مواجه بوده است. این موضوع با آنچه که در آبخوان اتفاق افتاده است کاملاً در تناقض است. برای بررسی بیشتر موضوع علاوه بر بیلان محاسبه شده، با استفاده از هیدروگراف واحد آب زیرزمینی نیز مقدار تغییرات ذخیره آبخوان محاسبه شده است. بدین ترتیب پس از تهیه نقشه تیسن و با اعمال نمودن میزان تغییرات سطح آب هر چاه در سطح پلی‌گون مربوطه و تقسیم حجم ارقام مذکور به سطح کل پلی‌گون‌های منطقه، هیدروگراف واحد که نمایشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد، ترسیم گردید (شکل ۴). با توجه به هیدروگراف، تراز سطح آب زیرزمینی در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶،

شده است. بدین ترتیب پس از تهیه نقشه تیسن و با اعمال نمودن میزان تغییرات سطح آب هر چاه در سطح پلی‌گون مربوطه و تقسیم حجم ارقام مذکور به سطح کل پلی‌گون‌های منطقه، هیدروگراف واحد که نمایشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد، ترسیم گردید (شکل ۴). با توجه به هیدروگراف، تراز سطح آب زیرزمینی در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶،

ضریب ذخیره آبخوان، مقدار کاهش ذخیره آبخوان برابر ۲۱/۵۷- میلیون مترمکعب می‌باشد.

۰/۵۲ متر کاهش ارتفاع داشته و این روند به علت برداشت بی رویه آب زیرزمینی در دوره خشک بوده است. با در نظر گرفتن



$\Delta V$ (m)	$\Delta h$ (m)	
3424161.535	0.082963356	مهر
-298502.1357	0.007232351	آبان
9777325.558	0.236892955	آذر
5621533.772	0.136203069	دی
7761946.923	0.188062731	بهمن
10535122.08	0.255253463	اسفند
-6776135.939	-0.164177705	فروردین
-29002178.68	-0.702688253	اردیبهشت
-17557390.38	-0.425394661	خرداد
-14156639.32	-0.342998513	تیر
-8581.289822	-0.000207914	مرداد
9107313.810	0.220659368	شهریور
-21572024.07	-0.522664455	سالانه

شکل ۴- پلی‌گون بندی برای محاسبه هیدروگراف واحد دشت، تغییرات ماهانه ارتفاع آب زیرزمینی و تغییرات ذخیره آبخوان دشت اردبیل برای سال آبی ۸۷-۱۳۸۶.

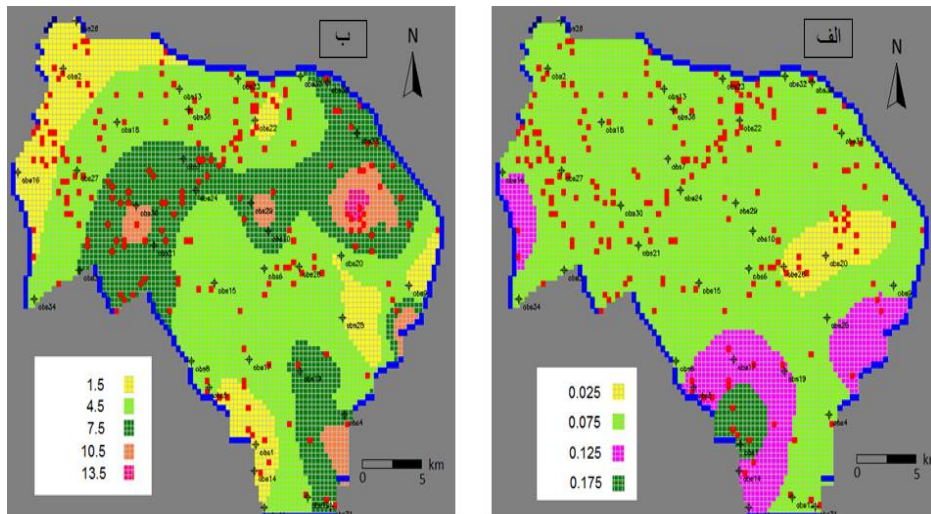
کاملاً کاربردی و واقع بینانه به مسئله نگریسته شده است، لذا به دلیل عدم اطلاعات کافی از مقادیر واقعی برداشت آب زیرزمینی، از مدل‌سازی برای ماه‌های دیگر صرف نظر شده است. مادفلو برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به شرایط بار هیدرولیکی اولیه نیاز دارد.

این مقایسه نشان می‌دهد که تنها در ماه اسفند است که نتایج حاصل از دو روش مذکور به هم نزدیک هستند و در ماه‌های فصل بهار نتایج از هم بسیار دور می‌باشند. با مشاهده این نتایج، اولین فرضیه‌ای که مطرح شد این بود که این اختلاف ناشی از در نظر گرفتن مقادیر ورودی به آبخوان، بیشتر از مقادیر واقعی بوده است. اما پس از بررسی و محاسبه مجدد اجزای بیلان و حتی در نظر گرفتن حداقل مقادیر ورودی، بازهم بیلان آبخوان مقدار مثبتی را نشان داد. بنابراین فرضیه دومی مطرح شد که ممکن است مقدار برداشت آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها به مراتب بیشتر از آن چیزی باشد که در آماربرداری ثبت گردیده است. با این فرض، پس از بررسی گزارش‌های و مطالعات پیشین، وجود تعداد متنابهی از چاه‌های غیرمجاز در دشت محرز گردید. از طرفی به دلیل اینکه بهار فصل آبیاری مزارع بوده و در زمستان کمترین بهره‌برداری از چاه‌ها صورت می‌گیرد، اختلاف نتایج بیلان و ذخیره آبخوان در فصل بهار بیشتر و در فصل زمستان کمترین بوده است.

شرایط اولیه عددی است که به سلول‌های مدل برای شروع محاسبات داده می‌شود. مقادیر بار هیدرولیکی اولیه در سلول‌های با بار ثابت بسیار مهم می‌باشند. زیرا در طول مدل‌سازی تغییر نمی‌کنند. مقادیر در دیگر سلول‌ها به صورت حدس اولیه‌ای برای حل به روش تکرار هستند. در مدل‌سازی دشت اردبیل، سطح ایستابی بهمن ماه به عنوان سطح اولیه آب به مدل وارد شده است. از دیگر موارد مورد نیاز برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، وارد کردن پارامترهای هیدرولیکی می‌باشد. پارامترهای لازم برای آبخوان آزاد شامل نفوذپذیری و آب‌دهی ویژه هستند.

به همین دلیل مدل برای ماه اسفند، به دلیل هم‌خوانی نتایج بیلان با تغییرات ذخیره آبخوان، اجرا شده است. از آنجا که با دید

برای اعمال تنش‌های هیدرولیکی موجود در محدوده آبخوان نیز از بسته‌های جریان موجود در PMwin8 استفاده شده است که شامل بسته چاه، بسته رودخانه و بسته تغذیه است.



شکل ۵- الف) اعمال آبدهی ویژه به مدل ب) اعمال قابلیت انتقال به مدل.

### اجرای مدل

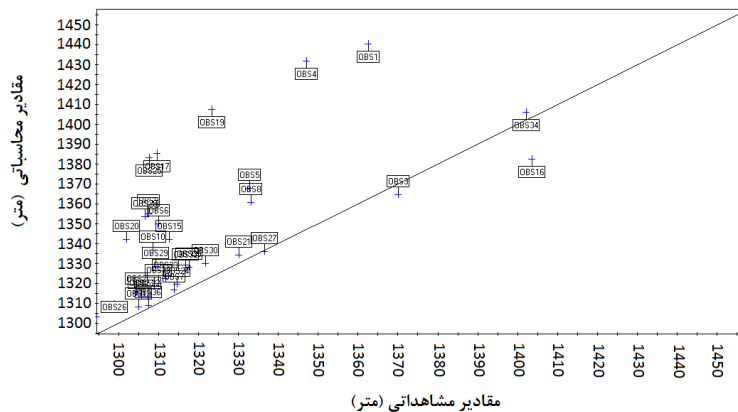
که تمام روش‌های فوق آزمایش شوند و بهترین آن‌ها انتخاب شود.

### اجرای مدل در حالت ماندگار

پس از طراحی هندسه آبخوان و تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه، پارامترهای مدل و تنش‌های هیدرولیکی آبخوان، مدل برای اولین بار و برای حالت ماندگار اجرا گردید (شکل ۶). در حالت ماندگار، مدل‌سازی بدون پارامتر آبدهی ویژه انجام می‌شود.

نقطه مشترک اغلب بسته‌های محاسباتی، معیار تغییر بار و

ماکزیمم تکرار مجاز برای همگرایی مدل است. هنگامی که مقدار بیشینه مطلق تغییرات در بار محاسباتی سلول کمتر یا مساوی معیار تغییرات بار هیدرولیکی در نظر گرفته شده در بسته محاسباتی باشد، فرآیند محاسبه متوقف می‌شود. بسته‌های محاسباتی موجود در PMwin8 شامل بسته‌های DE45 و PCG2 و SIP و SSOR و GMG می‌باشند. برای هر مدل‌سازی بهتر است



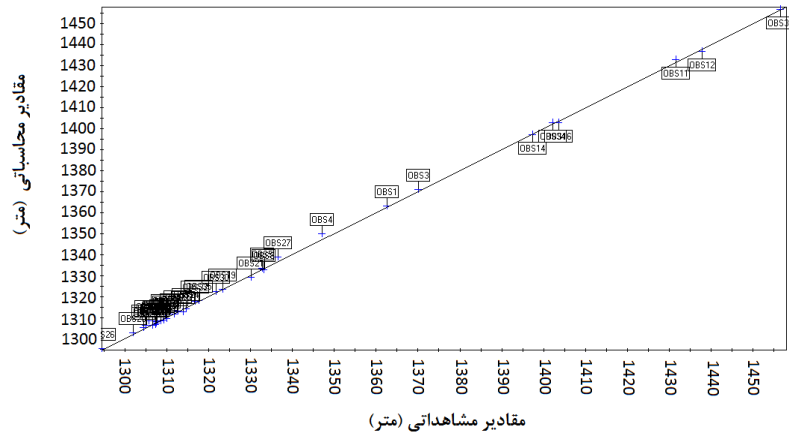
شکل ۶- دیاگرام متقابل داده‌های محاسباتی و مشاهداتی برای شرایط ماندگار (اسفند ماه سال آبی ۸۷-۱۳۸۶).

### اجرای مدل در حالت ناماندگار

شده است. با توجه به نتایج محاسبات بیلان، مدل برای اسفند ماه اجرا شده است (شکل ۷). در این مدل‌سازی مقادیر آبدهی ویژه نیز از ضروریات مسئله می‌باشد.

علاوه بر اجرای مدل برای شرایط ماندگار، جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل برای شرایط ناماندگار نیز شبیه‌سازی





شکل ۷- دیاگرام متقابل داده‌های محاسباتی و مشاهداتی بار هیدرولیکی برای شرایط ناماندگار (اسفند ماه سال آبی ۸۷-۱۳۸۶).

### کالیبراسیون

می‌شود، اجرای اولیه مدل در شرایط ناماندگار به سبب آماده-سازی خوب داده‌های ورودی به مدل، به مراتب بهتر از اجرای اولیه مدل در شرایط ماندگار بوده و با جریان انتظاری آب زیر-زمینی هم‌خوانی دارد. با بررسی داده‌های طولانی مدت سطح آب زیرزمینی در دشت اردبیل و حتی کوتاه مدت آن شواهدی دال بر شرایط ماندگار جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل دیده نمی‌شود. با توجه به نتایج اولیه اجرای مدل برای شرایط ماندگار و ناماندگار، و با توجه به آنچه که در بالا ذکر گردید، کالیبراسیون برای شرایط ناماندگار اجرا شده است. زیرا در این مسئله، کالیبراسیون شرایط ماندگار ما را از واقعیت دور خواهد کرد. دو روش کالیبراسیون وجود دارد. (۱) روش سعی و خطا و (۲) کالیبراسیون اتوماتیک. برای کالیبراسیون مدل آبخوان دشت اردبیل، ابتدا کالیبراسیون دستی بر اساس دید کارشناسی و بررسی عدم قطعیت انجام شده و سپس برای بهبود نتایج از کالیبراسیون اتوماتیک استفاده شده است. بررسی اولیه نتایج مدل‌سازی آبخوان دشت اردبیل حاکی از آن است که پارامترهای هیدرولیکی آبخوان مسئول اختلاف بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی می‌باشند. به همین خاطر برای سنجش حساسیت مدل به تغییرات این پارامترها، مدل برای مقادیر ۲ برابر و همچنین ۰/۵ برابر این پارامترهای هیدرولیکی اجرا شد. نتایج در جدول ۳ به صورت خلاصه آورده شده است.

کالیبراسیون که به صورت تقریبی انجام می‌شود، طولانی‌ترین و مهم‌ترین قسمت فرآیند مدل‌سازی است. اگرچه اغلب در گزارش‌های، مدل‌سازی، کالیبراسیون و آنالیز حساسیت به صورت جداگانه آورده می‌شوند، اما این مراحل از هم جدا ناشدنی‌اند و هر دو دارای یک فرآیند هستند. کالیبراسیون فرآیند، یافتن مجموعه شرایط مرزی، تنش‌های هیدرولیکی و پارامترهای هیدرولیکی است که طی آن نتایجی تولید می‌شود که به اندازه‌گیری‌های صحرائی بارهای هیدرولیکی و جریان بسیار نزدیک است.

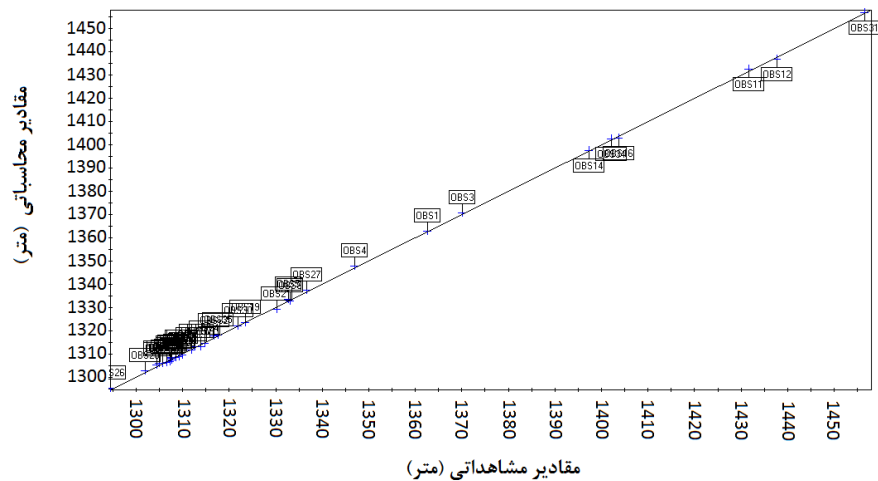
با توجه به نتایج بیلان، تنها ماه مناسب برای شبیه‌سازی جریان آب، ماه اسفند می‌باشد؛ اما شرایط جریان آب در این ماه ماندگار نیست. به همین دلیل پس از اجرای مدل در شرایط ماندگار، بارهای هیدرولیک محاسباتی از مشاهداتی فاصله بسیار دارند. بر اساس توصیه اندرسون و وسنر کالیبراسیون می‌تواند برای شرایط ماندگار، ناماندگار و یا هر دو انجام شود. اگرچه کالیبراسیون برای شرایط ماندگار مرسوم شده است، اما به دلیل اینکه شرایط طبیعی جریان آب زیرزمینی ناماندگار است و معمولاً توسط فعالیت‌های انسان‌ها تغییر می‌کند، باید تمام تلاش در جهت کالیبراسیون مدل برای شرایط ناماندگار صورت گیرد (اندرسون و ووسنر، ۱۹۹۲). از این رو همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت.

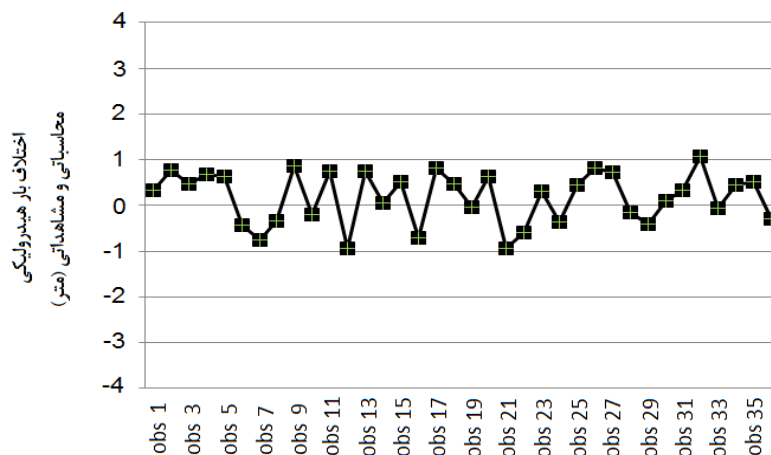
پیزومتر	مشاهداتی	محاسباتی	2k	0.5k	2Sy	0.5Sy
			محاسباتی	محاسباتی	محاسباتی	محاسباتی
OBS1	۱۳۶۲/۵۷	۱۳۶۳/۳۶۳	۱۳۶۲/۷۱۲	۱۳۶۳/۱۱۴	۱۳۶۳/۰۹۸	۱۳۶۳/۷۴۹
OBS2	۱۳۰۴/۴۲	۱۳۰۵/۲۷	۱۳۰۵/۶۳	۱۳۰۵/۰۳۸	۱۳۰۵/۰۲۹	۱۳۰۵/۵۹۹
OBS3	۱۳۷۰/۱۸	۱۳۷۱/۰۴۳	۱۳۷۰/۸۳۴	۱۳۷۱/۱۴۷	۱۳۷۰/۸۱۷	۱۳۷۱/۳۰۷
OBS4	۱۳۴۷/۰۳	۱۳۴۹/۹۶۲	۱۳۵۱/۲۲۳	۱۳۴۹/۱۱۴	۱۳۴۹/۰۶۳	۱۳۵۱/۴
OBS5	۱۳۳۲/۷۵	۱۳۳۳/۴	۱۳۳۳/۳۸۶	۱۳۳۳/۳۳۸	۱۳۳۳/۲۴۶	۱۳۳۳/۶۶۶
OBS6	۱۳۰۹/۹۴	۱۳۰۹/۴۳۸	۱۳۰۹/۲۸۱	۱۳۰۹/۵۷۳	۱۳۰۹/۵۳۸	۱۳۰۹/۳۴۹
OBS7	۱۳۱۳/۹۸	۱۳۱۲/۹۲۵	۱۳۱۲/۷۵	۱۳۱۳/۰۹۶	۱۳۱۳/۰۵۳	۱۳۱۲/۸۶۲
OBS8	۱۳۳۳/۱۵	۱۳۳۲/۷۰۴	۱۳۳۲/۲۵۷	۱۳۳۲/۹۳	۱۳۳۲/۷۴۹	۱۳۳۲/۷۳۲
OBS9	۱۳۰۷/۴۹	۱۳۰۸/۴۶۷	۱۳۰۸/۷۵۶	۱۳۰۸/۲۷۹	۱۳۰۸/۱۹۲	۱۳۰۸/۹۳۲
OBS10	۱۳۰۷/۶۱	۱۳۰۸/۴۰۷	۱۳۰۸/۳۰۲	۱۳۰۸/۴۸۱	۱۳۰۸/۴۴۶	۱۳۰۸/۳۷۱
OBS11	۱۴۳۱/۶۹	۱۴۳۳/۰۰۱	۱۴۳۲/۹۲۵	۱۴۳۲/۶۳۷	۱۴۳۲/۰۹۹	۱۴۳۴/۴۵۶
OBS12	۱۴۳۷/۷۷	۱۴۳۶/۷۶۱	۱۴۳۵/۷۸	۱۴۳۶/۹۶۱	۱۴۳۶/۷۶۷	۱۴۳۶/۶۴۷
OBS13	۱۳۰۵/۰۶	۱۳۰۶/۲۰۹	۱۳۰۶/۵۳۵	۱۳۰۵/۹۹۸	۱۳۰۵/۹۳۶	۱۳۰۶/۵۰۸
OBS14	۱۳۹۷/۴۱۲	۱۳۹۷/۲۲۲	۱۳۹۷/۰۴۹	۱۳۹۷/۳۴۶	۱۳۹۷/۳۲۹	۱۳۹۷/۰۸۲
OBS15	۱۳۱۲/۶۳	۱۳۱۳/۲۷۱	۱۳۱۲/۵۳۳	۱۳۱۳/۰۹۴	۱۳۱۳/۰۶۱	۱۳۱۲/۶۱۹
OBS16	۱۴۰۳/۷	۱۴۰۲/۷۹۹	۱۴۰۱/۹۲	۱۴۰۳/۳۳۱	۱۴۰۳/۰۵۸	۱۴۰۲/۶۴۳
OBS17	۱۳۰۹/۶۶	۱۳۱۱/۲۱۳	۱۳۱۱/۸۶۸	۱۳۱۰/۷۷۱	۱۳۱۰/۷۵	۱۳۱۱/۹۱
OBS18	۱۳۱۰/۰۶	۱۳۱۰/۶۷۸	۱۳۱۱/۰۳۳	۱۳۱۰/۴۸۴	۱۳۱۰/۴۵۳	۱۳۱۱/۱۰۷
OBS19	۱۳۲۳/۴۲	۱۳۲۳/۴۱۲	۱۳۲۳/۶۲۸	۱۳۲۳/۳۳۷	۱۳۲۳/۳۲	۱۳۲۳/۶۶۷
OBS20	۱۳۰۲/۰۶	۱۳۰۲/۷۴۴	۱۳۰۳/۰۷	۱۳۰۲/۵۸۹	۱۳۰۲/۵۶	۱۳۰۲/۹۷۱
OBS21	۱۳۳۰/۲۴	۱۳۲۹/۲۸۵	۱۳۲۹/۰۳۷	۱۳۲۹/۴۹۵	۱۳۲۹/۴۰۳	۱۳۲۹/۲۶۵
OBS22	۱۳۰۷/۳۶	۱۳۰۶/۶۷۷	۱۳۰۶/۶۲۹	۱۳۰۶/۷۹۸	۱۳۰۶/۷۶۷	۱۳۰۶/۶۸۴
OBS23	۱۳۰۵/۷	۱۳۰۸/۵۲۹	۱۳۰۸/۸۳۲	۱۳۰۷/۹۹۵	۱۳۰۷/۷۳۵	۱۳۰۹/۳۹۱
OBS24	۱۳۱۴/۷۲	۱۳۱۴/۳۵۵	۱۳۱۴/۲۲۹	۱۳۱۴/۴۴	۱۳۱۴/۳۴۴	۱۳۱۴/۴۸
OBS25	۱۳۰۷/۶۱	۱۳۰۸/۱۷۳	۱۳۰۸/۴۴۲	۱۳۰۸/۰۱۶	۱۳۰۷/۹۸۱	۱۳۰۸/۵۱۱
OBS26	۱۲۹۴/۵	۱۲۹۵/۳۷۹	۱۲۹۵/۵۸	۱۲۹۵/۲۶۸	۱۲۹۵/۱۷۶	۱۲۹۵/۷۷۹
OBS27	۱۳۳۶/۵۹	۱۳۳۸/۸۲۴	۱۳۳۹/۵۹۸	۱۳۳۸/۱۴۶	۱۳۳۸/۱۲۵	۱۳۳۹/۵۸۳
OBS28	۱۳۰۶/۶۳	۱۳۰۶/۴۶۴	۱۳۰۶/۴۶۸	۱۳۰۶/۴۹۶	۱۳۰۶/۴۳۶	۱۳۰۶/۵۶۵
OBS29	۱۳۰۹/۲۹	۱۳۰۸/۸۶۲	۱۳۰۸/۷۲۹	۱۳۰۸/۹۸۴	۱۳۰۸/۹۵	۱۳۰۸/۸۰۳
OBS30	۱۳۲۱/۸۳	۱۳۲۲/۲۳۴	۱۳۲۳/۲۴۵	۱۳۲۱/۲۹۸	۱۳۲۱/۱۵	۱۳۲۳/۴۱۵
OBS31	۱۴۵۶/۵۹	۱۴۵۶/۸۷۳	۱۴۵۶/۰۴۲	۱۴۵۷/۴۴۸	۱۴۵۶/۹۳۶	۱۴۵۶/۷۷۴
OBS32	۱۳۱۶/۷۷	۱۳۱۷/۸۴۵	۱۳۱۷/۵۰۴	۱۳۱۷/۸۷۲	۱۳۱۷/۶۴۱	۱۳۱۸/۱۲
OBS33	۱۳۱۱/۸۷	۱۳۱۱/۸۰۷	۱۳۱۱/۷۱۷	۱۳۱۱/۸۵۲	۱۳۱۱/۸۱۵	۱۳۱۱/۸۲۷
OBS34	۱۴۰۲/۱۲	۱۴۰۳/۰۳۳	۱۴۰۳/۳۱۵	۱۴۰۲/۷۲۳	۱۴۰۲/۵۶۶	۱۴۰۳/۷۷۹
OBS35	۱۳۱۷/۶۴	۱۳۱۸/۱۸۷	۱۳۱۷/۷۹۳	۱۳۱۸/۳۰۸	۱۳۱۸/۱۳۵	۱۳۱۸/۲۵۴
OBS36	۱۳۰۷/۶	۱۳۰۷/۳۲۱	۱۳۰۷/۳۴۷	۱۳۰۷/۳۶۱	۱۳۰۷/۳۶۷	۱۳۰۷/۴۴۱

بر اساس جدول ۳، چاه‌های مشاهده‌ای ۶، ۱۰، ۱۴، ۱۹، ۲۲، ۲۴، ۲۸، ۲۹، ۳۳، ۳۶ حساسیت زیادی نسبت به تغییرات  $S_y$  و  $K$  نشان نمی‌دهند. پیزومترهای ۱، ۲، ۴، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۳۰ و ۳۴ با کاهش  $K$  و افزایش  $S_y$  بهبود خواهند یافت. پیزومترهای ۳ و ۳۲ با افزایش  $K$  و افزایش  $S_y$  بهبود خواهند یافت. همچنین پیزومترهای ۳۱ و ۳۵ تنها با افزایش  $K$  و پیزومترهای ۵ و ۱۹ نیز تنها با افزایش  $S_y$  به

مقدار مشاهداتی نزدیک خواهند شد. بر همین اساس اقدام به تنظیم و کالیبراسیون مدل شد. در برخی موارد با اندکی تغییر در محدوده پلی‌گون‌ها و در برخی موارد نیز با تغییر مقدار پلی‌گون‌ها اقدام به کالیبراسیون مدل گردید. پس از انجام کالیبراسیون دستی از روش کالیبراسیون اتوماتیک برای بهبود نتایج استفاده شد. نتایج حاصله در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- دیگرام متقابل داده‌های محاسباتی و مشاهداتی بار هیدرولیکی بعد از کالیبراسیون برای شرایط ناماندگار (اسفند ماه سال آبی ۸۷-۱۳۸۶).



شکل ۹- اختلاف داده‌های مشاهداتی و محاسباتی مدل پس از کالیبراسیون، در پیزومترهای محدوده مورد مطالعه.

نتایج آنالیز حساسیت و پارامترهای هیدرولیکی تخمین زده شده، پارامترهای هیدرولیکی به روش دستی، آورده شده و در پاراگراف

حین انجام کالیبراسیون اتوماتیک در شکل ۱۰ آورده شده است. آخر مقادیر به دست آمده از کالیبراسیون اتوماتیک بعد از چهار

در این شکل، در پاراگراف اول مقادیر تخمین زده شده تکرار ذکر شده‌اند.

PARAMETER SENSITIVITIES: CASE pestct1

OPTIMISATION ITERATION NO. 1 ----->				OPTIMISATION ITERATION NO. 4 ----->			
Parameter name	Group	Current value	Sensitivity	Parameter name	Group	Current value	Sensitivity
hk_1	g1	1.50000	8.115703E-02	hk_1	g1	0.194911	1.107830E-02
hk_2	g1	3.50000	8.605032E-02	hk_2	g1	1.48774	4.194179E-02
hk_3	g1	7.50000	8.014252E-02	hk_3	g1	6.17049	4.045229E-02
hk_4	g1	10.5000	6.554021E-02	hk_4	g1	36.1723	7.179569E-02
hk_5	g1	13.5000	0.000000	hk_5	g1	13.5000	0.000000
sy_1	g4	2.500000E-02	1.918821E-02	sy_1	g4	0.168929	0.000000
sy_2	g4	9.000000E-02	0.107788	sy_2	g4	0.280000	8.039735E-02
sy_3	g4	0.125000	7.963043E-02	sy_3	g4	0.280000	3.942802E-02
sy_4	g4	0.175000	6.364009E-02	sy_4	g4	0.212083	3.890577E-02
hk_6	g1	0.300000	3.000023E-02	hk_6	g1	7.495478E-02	6.396068E-03

OPTIMISATION ITERATION NO. 2 ----->			
Parameter name	Group	Current value	Sensitivity
hk_1	g1	0.578001	3.067445E-02
hk_2	g1	1.43844	4.338020E-02
hk_3	g1	6.60816	5.076721E-02
hk_4	g1	40.8870	6.522730E-02
hk_5	g1	13.5000	0.000000
sy_1	g4	4.681802E-02	1.918822E-02
sy_2	g4	0.280000	7.648587E-02
sy_3	g4	0.241522	4.045222E-02
sy_4	g4	0.280000	3.384482E-02
hk_6	g1	0.198578	1.566710E-02

OPTIMISATION ITERATION NO. 3 ----->			
Parameter name	Group	Current value	Sensitivity
hk_1	g1	0.175249	1.279216E-02
hk_2	g1	1.25003	3.729503E-02
hk_3	g1	4.27054	3.674264E-02
hk_4	g1	33.8676	7.179564E-02
hk_5	g1	13.5000	0.000000
sy_1	g4	0.116079	6.396086E-03
sy_2	g4	0.280000	8.140868E-02
sy_3	g4	0.238661	4.656407E-02
sy_4	g4	0.280000	2.637167E-02
hk_6	g1	8.457483E-02	1.107832E-02

COMPLETION OF OPTIMISATION PROCESS

Composite sensitivities for all observations/prior info ----->

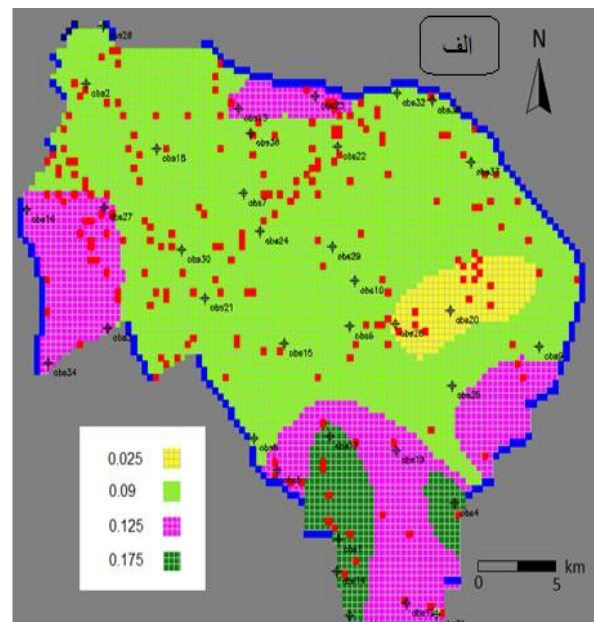
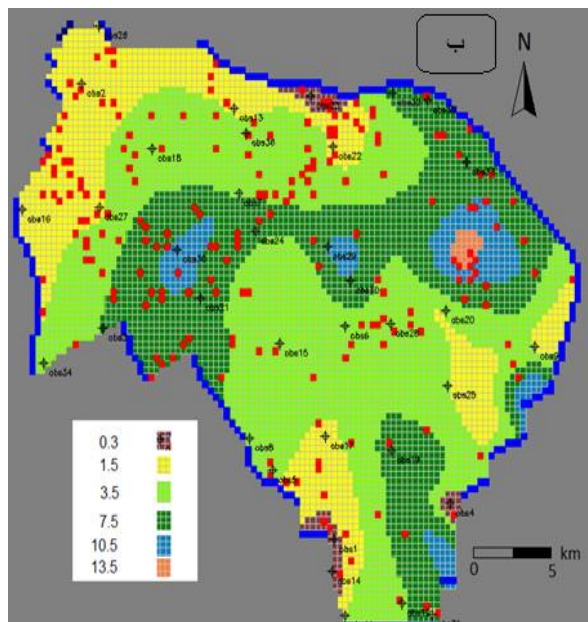
Number of observations with non-zero weight = 36			
Parameter name	Group	Current value	Sensitivity
hk_1	g1	0.194911	1.279216E-02
hk_2	g1	1.48774	3.729503E-02
hk_3	g1	6.17049	3.674264E-02
hk_4	g1	36.1723	7.179564E-02
hk_5	g1	13.5000	0.000000
sy_1	g4	0.168929	6.396086E-03
sy_2	g4	0.280000	8.140868E-02
sy_3	g4	0.280000	4.656407E-02
sy_4	g4	0.212083	2.637167E-02
hk_6	g1	7.495478E-02	1.107832E-02

شکل ۱۰- آنالیز حساسیت حاصل از کالیبراسیون اتوماتیک (اسفند ماه سال آبی ۸۷-۱۳۸۶).

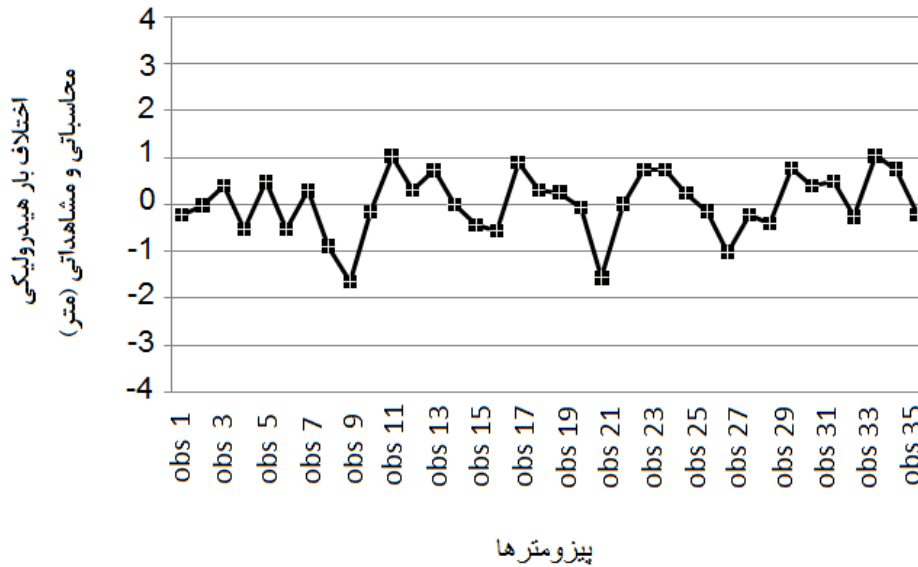
صورت مدل مقبولیت ندارد. به این منظور پس از کالیبراسیون مدل، صحت آن به وسیله داده‌های فصل خشک یعنی تابستان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره تنش مذکور، بر اساس پارامترهای کالیبره شده (شکل ۱۱)، در شکل ۱۲ ارائه شده است.

### صحت‌سنجی

در مرحله صحت‌سنجی، مدل کالیبره شده جریان آب را برای دوره زمانی غیر از دوره زمانی کالیبراسیون شبیه‌سازی می‌کند. اگر مدل قادر به شبیه‌سازی حوادث این دوره زمانی متفاوت باشد، ترکیب پارامترهای به کار رفته درست بوده و در غیر این



شکل ۱۱- مقادیر پارامترهای الف) آبدهی ویژه و ب) هدایت هیدرولیکی آبخوان بعد از کالیبراسیون و صحت‌سنجی.



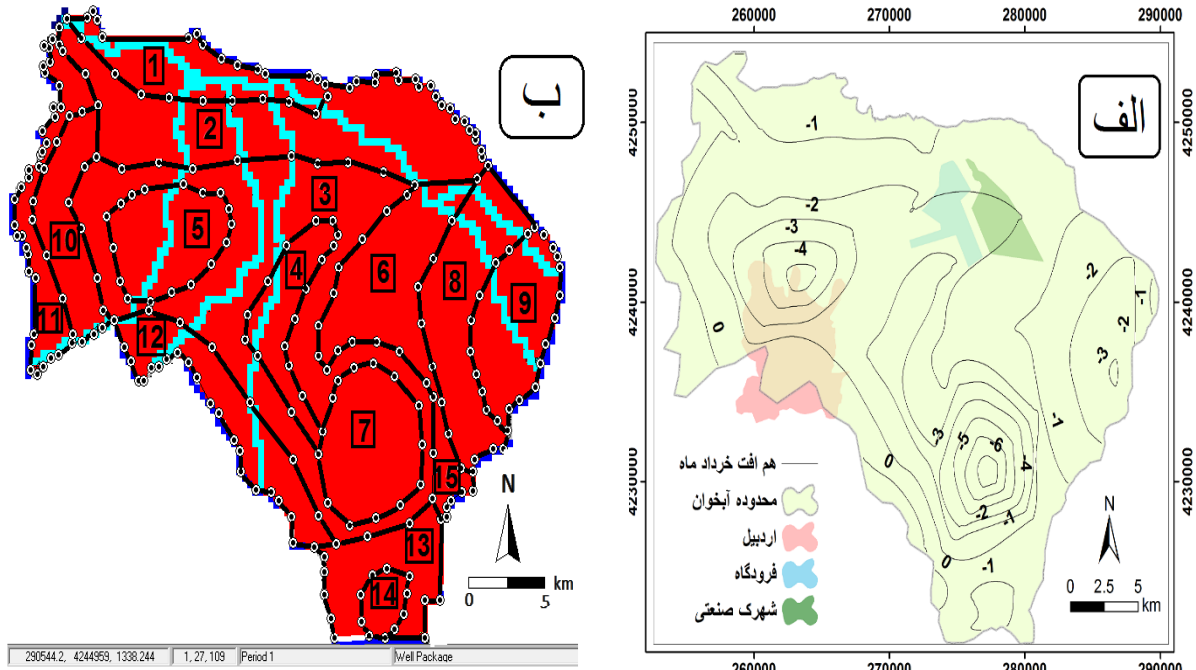
شکل ۱۲- نتایج صحت سنجی (تابستان ۱۳۸۷).

### بهینه‌سازی پمپاژ

پس از صحت‌سنجی و احراز صحت عمل‌کرد مدل، نوبت به بهینه‌سازی مقادیر برداشت از آب زیرزمینی می‌رسد. استراتژی که در این پژوهش برای بهینه‌سازی برداشت آب در دشت اردبیل در نظر گرفته شده است، بر حل مسئله معکوس استوار است. با استفاده از بسته چاه نرم‌افزار PMwin8 مناطق مختلف دشت بر اساس مقدار افت، زون‌بندی شده و مقدار برداشت این زون‌ها با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی PEST محاسبه شدند.

بر این اساس، مجهول فرآیند بهینه‌سازی، مقادیر پمپاژ و تابع هدف اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بار هیدرولیکی چاه‌های مشاهداتی است. اما سؤالی که پیش می‌آید این است که چه تراز آبی باید به عنوان سطح ایستابی هدف در نظر گرفته شود که مقادیر پمپاژ بر اساس آن تنظیم گردند؟ اگر تراز آب خرداد ۸۷ به عنوان سطح ایستابی هدف در پیزومترها قرار گیرد، جواب‌های به دست آمده مقادیر واقعی پمپاژی هستند که رخ داده‌اند. اگر تراز خرداد سال قبل مدل‌سازی قرار گیرد، مقادیر

پمپاژی به دست می‌آیند که بر اساس آن‌ها، تراز آب نسبت به سال گذشته ثابت خواهد بود و این در عمل واقعاً غیرممکن می‌باشد، زیرا از حجم آب برداشتی باید به یک‌باره مقدار زیادی کاست که در این صورت جوابگوی نیاز آبی دشت نخواهد بود. بنابراین منطقی این است که میانگین سطح آب خرداد در سال مدل‌سازی و خرداد سال گذشته به عنوان سطح ایستابی هدف در مدل قرار داده شود. در این صورت با رعایت مقدار برداشت تعیین شده، بعد از گذشت چند سال سطح ایستابی به حالت ثابت خواهد رسید و شاهد افت بیشتری در آبخوان نخواهیم بود. شکل ۱۳-الف و ۱۳-ب به ترتیب نقشه هم‌افت آبخوان و زون بندی چاه‌های بهره‌برداری و جدول ۴ مقادیر تخمین زده شده برای هر زون را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مقادیر به دست آمده برای هر زون، مربوط به هر سلول واقع در آن زون و علامت منفی نشان‌دهنده برداشت آب می‌باشد. بر این اساس، مقدار آب برداشت شده از منابع بهره‌برداری آب زیرزمینی برای فصل بهار حدود ۱۱۲ میلیون مترمکعب خواهد بود.



شکل ۱۳- الف) نقشه هم افت آبخوان (ب) زون بندی چاه های بهره برداری در PMWin 8

جدول ۴- مقادیر اولیه، حدود تعیین شده برای هر پارامتر، و مقدار برداشت آب بهینه شده برای فصل بهار

زون	مقدار اولیه (مترمکعب بر روز)	حد پایین (مترمکعب بر روز)	حد بالا (مترمکعب بر روز)	مقدار برداشت آب (مترمکعب بر روز)
۱	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۴۹۹/۳۵۶۷
۲	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۱۰۱/۲۲۱۲
۳	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۸۳/۱۷۷۳۸
۴	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۴۶۸/۳۷۴۳
۵	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۵۶۹/۶۸۷۲
۶	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۰/۹۰۴۹۱۰۵
۷	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۹۰۸/۴۳۴۴
۸	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۱۴۰/۷۸۷۹
۹	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۷۱۸/۷۷۰۴
۱۰	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۸۲/۹۲۷۷۶
۱۱	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۳/۷۵۷۹۸۲
۱۲	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۱/۰۰۰۰۱
۱۳	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۱۲۳/۱۲۵۷
۱۴	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۱/۱۶۹۵۶۸
۱۵	-۱۰۰	-۱۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۵۹۲/۴۶۳۶

- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. Applied groundwater modeling flow and advective transport. Academic press, Inc. 381 p.
- Chiang, W. H., 2001. 3D-groundwater modeling with PMWIN: A simulation system for modeling groundwater flow and transport processes, Springer, New York.
- Chiang, W. H., Kinzelbach, W., 2001. 3D-groundwater modeling with PMWIN, Springer, New York, 346 p.
- Ghosh, N. C., Sharma, K. D., 2006. Groundwater modeling management. Capital Publishing Company. New Delhi, 594 p.
- Hill, M. C., 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. U. S. Geol. Survey water- Res. Invest. Rep. 98-4005: 90pp.
- Nishikawa, T., 1998. Water resources optimization model for Santa Barbara, California. Journal of Water Resources Planning and Management. 124 (5): 1213 – 1235.
- Sulaiman Kharmah, R. A., 2007. Optimal management of groundwater pumping, the case of the Eocene Aquifer, Palestine. MSc thesis. Faculty of Graduate Studies, at An-Najah National University, Nablus, Palestine, 136 p.
- Switzerland, Z., 1999. Calibration and reliability in groundwater modeling coping with uncertainty. IAHR Model Care. 99: 739-744.
- Yeh, J., Mock, P. A., 1995. A structured approach for calibrating steady- state groundwater flow models. Groundwater. 18(2): 444-450.
- Yan, Q., Ma, C., 2016. Application of integrated ARIMA and RBF network for groundwater level forecasting. Environmental Earth Sciences. 75(5): 1-13.
- Karayannis, N.B., Venetsanopoulos, A.N., 1993. Artificial Neural Network: Learning Algorithms, Performance Evaluation, and Application, Kluwer Academic Publisher. Boston. 523p.
- Mason, J.C., Price, R.K., Tem, m.e., 1996. A neural network model of rainfall-runoff using radial basis functions. Hydraulic Research. 34: 537-548.
- Mishra, A.K., Desai, V.R., 2006. Drought forecasting using feed- forward recursive neural network, Ecological modeling. 98: 127-138.
- Rajaei, T., Mirbagheri, S. A., Nourani, V., Alikhani, A., 2010. Prediction of daily suspended sediment load using wavelet and neuro-fuzzy combined model. Environmental Science and Technology. 7(1): 93-110.

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با بررسی‌های هیدروشیمیایی و هیدروژئولوژیکی انجام شده، یک مدل مفهومی بسیار خوب از منطقه ایجاد شده که بر اساس آن هندسه آبخوان، مرزهای ورودی، مرزهای خروجی، مناطق تبخیر از آب زیرزمینی، ارتباط هیدرولیکی آبخوان، مناطق با افت سطح ایستابی بیشینه و خلاصه آنچه که در بررسی هیدروژئولوژیکی یک منطقه لازم است، تعیین یا تخمین زده شده‌اند. پایش، پیش‌نیاز و ضروری ترین قسمت برای تصمیم‌های مدیریتی است. متأسفانه با تمام تلاشی که در این زمینه صورت می‌گیرد، کیفیت داده‌های آمار برداری شده رضایت‌بخش نیست. محاسبه بیلان آبخوان دشت اردبیل و مدل عددی تأیید کننده آن است که مقادیر بهره برداری که در آماربرداری آورده شده است، بسیار کمتر از آن است که در واقعیت رخ می‌دهد. علت این موضوع را می‌توان به وجود چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز و احتمالاً خطا در آماربرداری نسبت داد. رودخانه‌های جاری دشت از منابع آب بسیار مهم این دشت بوده و رگ‌های حیات‌بخش آبخوان هستند و در حفظ دبی پایه رودخانه باید کوشید. بخش اعظمی از آب زیرزمینی از طریق زهکشی رودخانه‌ها و در قسمت پایین دست، از دشت خارج می‌شود.

## سپاس‌گزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از مساعدت‌های صمیمانه مسئولین محترم شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل در مراحل نمونه‌برداری و انجام تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

## منابع

- نیکبخت، ج.، ذوالفقاری، م.، نجیب، م.، ۱۳۹۵. پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت تسوج-آذربایجان شرقی با کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. هیدروژئولوژی، دوره ۱، شماره ۲، ۹۹-۱۱۵.
- میرعباسی نجف‌آبادی، ر.، ستاری، م. ت.، برقی ولینجق، و.، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی و مدیریت بهره‌برداری از آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر. هیدروژئولوژی، دوره ۱، شماره ۱، ۷۵-۵۷.