

شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی در آبهای زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند

حسین بانژاد*¹، حمید محب زاده²، محمد حسین قبادی³ و مجید حیدری⁴

تاریخ دریافت: 91/02/16 تاریخ پذیرش: 91/08/15

¹ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

² کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

³ دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

⁴ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

*مسئول مکاتبه: Email: hossein_banejad@yahoo.com

چکیده

شبیه‌سازی عددی جریان آب‌های زیرزمینی به دلیل تخمین پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی ابزاری مهم برای مدیریت منابع آب آبخوان‌ها می‌باشد. این تحقیق نتایج حاصل از یک مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت نهاوند واقع در غرب ایران را نشان می‌دهد. برای انجام این کار از کد عددی MODFLOW-2000 که در قالب نرم افزار مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی (GMS) قرار گرفته است، استفاده شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از قبیل اطلاعات زمین شناسی، هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و نقشه‌های توپوگرافی ابتدا مدل سه بعدی هیدروژئولوژیکی دشت با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه و اطلاعات ارتفاعی لایه سطحی دشت تهیه شد و سپس برای شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار گرفت. پس از شبیه‌سازی اولیه جریان، مدل با استفاده از سعی و خطا و روش تخمین پارامتر و اطلاعات تراز آب چاه‌های منطقه برای حالت پایدار کالیبره گردید. نتایج حاصل از کالیبراسیون نشان می‌دهد که خطای میان تراز مشاهده شده و محاسبه شده با توجه به حد مجاز ± 20 متر در دامنه مطلوب می‌باشد همچنین تراز محاسبه شده توسط مدل نشان دهنده حرکت آب‌های زیرزمینی در جهت شیب غالب منطقه یعنی از جنوب شرقی به شمال غربی است. در نهایت از کد عددی MODPATH که انتقال توده‌ای ذرات را شبیه‌سازی می‌کند برای تخمین مسیر حرکت آلودگی و همچنین مبدأ آلودگی استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: انتقال آلودگی، جریان آب‌های زیرزمینی، GMS، MODFLOW

Numerical Simulation of the Flow and Contaminant Transport in Groundwater, Case Study: Nahavand Plain Aquifer

H Banejad^{1*}, H Mohebzadeh², AG Ghobadi³ and M Heydari⁴

Received: 5 May 2012 Accepted: 5 November 2012

¹-Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric, Bu-Ali Sina Univ, Hamedan, Iran.

²-M.Sc., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric, Bu-Ali Sina Univ, Hamedan, Iran.

³-Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric, Bu-Ali Sina Univ, Hamedan, Iran.

⁴-Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric, Bu-Ali Sina Univ, Hamedan, Iran.

*Corresponding Author E-mail: hossein_banejad@yahoo.com

Abstract

Numerical simulation of the groundwater flow in order to hydraulic and hydrologic parameters estimation is an important tool for management of aquifers. This study presents results of a mathematical model developed for simulation of groundwater flow in Nahavand plain aquifer in southwest of Hamedan province. For this purpose Groundwater Modeling Software (*GMS*) was used which supports the *MODFLOW-2000* code. After gathering required data same as hydrological, hydrogeological data and topography maps, first 3D hydrogeological model of plain was constructed using boreholes and surface elevation data. Then *MODFLOW* was used for simulation of flow. After initial simulation of flow, model was calibrated in steady state with trial-and-error and parameter estimation methods and groundwater table monitoring data. Results of calibration show that error between observed head and computed head is in allowable range ($\pm 20\text{m}$). Also results of computed head with model show that groundwater flow is in direct of dominant slope (southeast to northwest). Finally *MODPATH* code which simulates advective transport of particles was used for estimation of flow path and source of contaminants.

Keyword : Contaminant transport, Groundwater flow, *GMS*, *MODFLOW*

مقدمه

دارند، استراتژی‌های موثر برای مدیریت و حفاظت منابع آب‌های زیرزمینی برای اجتناب از اثرات محیطی برگشت ناپذیر مانند کاهش شدید کیفیت این آب‌ها و نابودی آنها لازم است (هاردن 2000). از این رو مدل‌سازی انتقال و سرانجام آلودگی‌های مختلف در آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در اثر همین افزایش توجه، مدل‌های عددی

مدل‌سازی عددی آب‌های زیرزمینی ابزاری مهم برای مدیریت منابع آب در آبخوان‌ها می‌باشد. این مدل‌ها می‌توانند برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی و همچنین مدیریت منابع آب و پیش بینی چگونگی تغییر یک آبخوان در مقابل تغییرات آب و هوایی و پمپاژ استفاده شوند (رجلی و همکاران 2003). از آنجایی که آب‌های زیرزمینی در معرض آلودگی‌های شدید قرار

سال‌های آینده با خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی مواجه می‌شوند را تعیین کرد و برای جلوگیری از انتشار بیشتر آلودگی اقداماتی را انجام داد. همچنین با شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی می‌توان به خصوصیات هیدرولیکی منطقه از قبیل هدایت هیدرولیکی ساختارهای زمین‌شناسی، تراز سطح آب-های زیرزمینی، مقدار تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق بارش و میزان تخلیه از این منابع پی‌برد.

مواد و روش‌ها

اطلاعات مورد استفاده

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه قسمتی از دشت نهاوند در جنوب استان همدان می‌باشد که مساحت 285 km^2 از کل دشت را به خود اختصاص می‌دهد و در موقعیت 48° تا $48^\circ 15'$ درجه شرقی و $34^\circ 10'$ تا $34^\circ 25'$ درجه شمالی قرار گرفته است. این دشت یکی از دشت‌های حوضه رودخانه کرخه است. شیب عمومی دشت از جنوب شرقی به طرف شمال غربی بوده، مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقاط آن به ترتیب 1650 و 1450 متر از سطح دریا ارتفاع دارند. این دشت از سمت شمال به خط الرأس ارتفاعات چال قیله، آردوشان، شادمانه، کمرزرد، گوین و از سمت جنوب و غرب به کوه گرین محدود می‌گردد. شکل 1 مکان دشت مورد مطالعه در استان همدان و خصوصیات ارتفاعی آن را نشان می‌دهد.

مختلفی برای تحلیل چگونگی حرکت آلودگی در آب‌های زیرزمینی توسعه یافته است.

امروزه استفاده از مدل‌ها برای به تصویر کشیدن واقعیات و فهم بهتر آن‌ها و همچنین اتخاذ تصمیمات درست در مورد هر پدیده‌ای بسیار متداول شده است. مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی یکی از این مدل‌ها می‌باشند که توسط متخصصان در خیلی از کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرند و دقت و صحت نتایج آن‌ها نیز به اثبات رسیده است (هارباگ 2005).

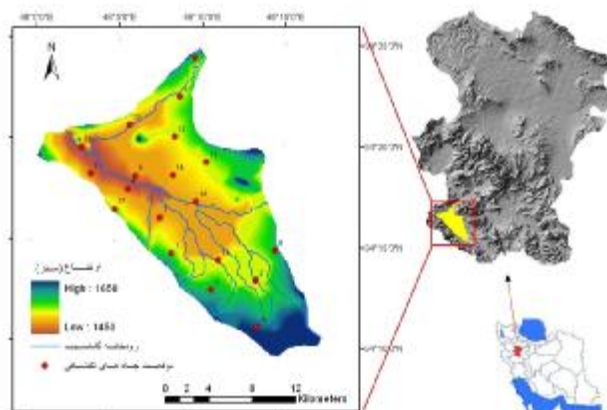
یائوتی و همکاران (2008) از مدل *MODFLOW* برای بررسی تغییرات شرایط هیدروژئولوژیکی و شبیه‌سازی رفتار جریان، تحت فشارهای مختلف در آبخوان غیر محصور بو، آرگ¹ استفاده کردند و با استفاده از روش سعی و خطا به شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نوسانات بار هیدرولیکی به تغییرات فصلی تغذیه از بارش و آبیاری بستگی دارد.

لارون و همکاران (2005) تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی را بر روی جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان صحرای جودین² واقع در فلسطین اشغالی مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از مدل *MODFLOW* نحوه جریان آب‌های زیرزمینی و همچنین نفوذ آن از یک آبخوان به آبخوان دیگر و از یک زیرحوضه به زیرحوضه دیگر را مورد ارزیابی قرار دادند.

بررسی کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت نهاوند به دلیل تأمین بخش عمده‌ای از آب کشاورزی و آشامیدنی از اهمیت خاصی برخوردار است. با دانستن کیفیت آب‌های زیرزمینی این منطقه و شبیه‌سازی انتقال آلودگی‌های احتمالی موجود در این آب‌ها می‌توان به جهت و سرعت انتقال آلودگی پی برده مناطقی را که در

¹ Bou-Areg

² Judean



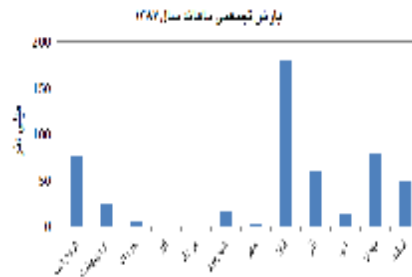
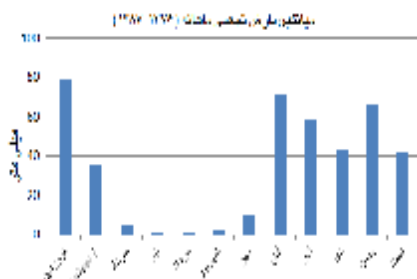
شکل 1- نقشه دشت نهاوند در استان همدان و موقعیت چاه‌های لاگ برداری

نشان می‌دهد که بیشترین بارش در ماه‌های آبان تا اردیبهشت و کمترین آن در ماه‌های خرداد تا مهر اتفاق می‌افتد.

رودخانه گاماسیاب که بزرگترین رودخانه استان همدان است در این محدوده جریان دارد. این رودخانه پس از دریافت سایر جریان‌های سطحی دیگر حوضه‌های مجاور نظیر ملایر، تویسرکان، اسد آباد و کنگاور در نهایت در محلی به نام دوآب واقع در جنوب غربی استان همدان از منطقه خارج می‌گردد.

اطلاعات هیدرولوژیکی

در این مطالعه به دلیل کمبود ایستگاه‌های باران-سنجی در منطقه از اطلاعات بارش ثبت شده ایستگاه وسج در فواصل سال‌های 1376 تا 1387 برای انجام محاسبات مربوط به تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق بارش استفاده شد. نمودار 1 به ترتیب بارش تجمعی ماهانه برای سال 1387 و میانگین ماهانه آن را برای دوره آماری 1376 تا 1387 نشان می‌دهد. مقدار کل بارش در سال 1387 و همچنین مقدار آن از سال 1376 تا 1387، 407/7 و 412/1 میلی‌متر در سال می‌باشد. نمودار رسم شده برای دوره آماری 1376 تا 1387

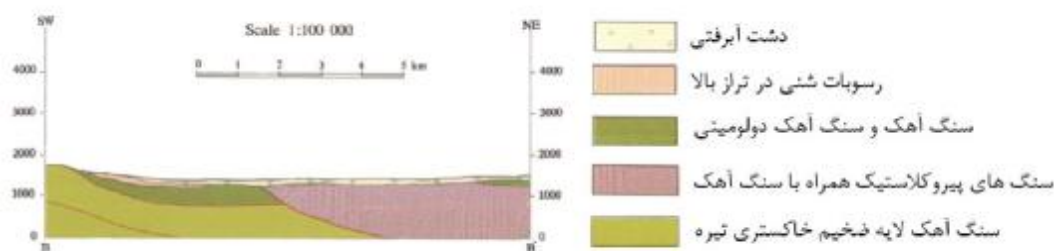


شکل 2- بارش تجمعی ماهانه سال 1387، میانگین بارش تجمعی ماهانه دوره آماری 1376 تا 1387

اطلاعات زمین‌شناسی

عمدتاً آهکی تا آهک کریستالیزه بوده و در سمت جنوب دارای آثار فرعی آتشفشانی می‌باشند. رنگ این آهک سفید خاکستری تا خاکستری تیره بوده و در مواردی لایه‌های آهکی مارنی تا مارنی در بین آن‌ها مشاهده می‌گردد. به سبب فعالیت زمین ساختی شدید حاوی درز و شکاف فراوان در جهات مختلف هستند که بعضاً توسط مواد رسی و کلسیت پر شده‌اند. بر روی این آهک‌ها کنگلومرای پلیستوسن قرار می‌گیرد. مقطع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که لایه‌هایی از سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی و سنگ‌های پیروکلاستیک همراه با سنگ آهک بعنوان سنگ بستر در زیر رسوبات شنی قرار گرفته اند (شکل 3).

دشت نهاوند از نظر زمین‌شناسی در منطقه زاگرس رورانده یا مرتفع قرار گرفته است. ارتفاعات منطقه عمدتاً متشکل از سنگ‌های رسوبی و یا دگرگونی هستند. سنگ‌های رسوبی منطقه از جنس سنگ آهک-های کارستی شده و کنگلومرا می‌باشند. تشکیلات دگرگونی شامل آهک‌های متبلور و شیل‌های کم‌متمورف است که بیشترین گسترش را از خود نشان می‌دهند. به طور کلی می‌توان گفت که سازندهای شمال شرق نهاوند بیشتر مربوط به قبل از ژوراسیک می‌باشند. این سازندها در شمال، سنگ‌های آهکی کریستالیزه و طبقات آهکی و شیلی دگرگون شده می‌باشند که آثاری از توده‌های آندزیتی کرتاسه نیز در آن‌ها به چشم می‌خورد. در جنوب غرب نهاوند سازندها



شکل 3- مقطع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (بی نام، 1991)

نهاوند شامل لایه‌هایی از رس و سیلت، شن و ماسه، ماسه ریز، شن دانه درشت، آهک و شیست بوده و با توجه به لاگ چاه‌ها جنس غالب دشت از لایه‌های رس و سیلت، شن و ماسه می‌باشد. به دلیل عدم آزمایش پمپاژ اطلاعاتی در مورد هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل دهنده دشت در دسترس نمی‌باشد. موقعیت چاه‌ها در شکل 1 نشان داده شده است.

ساخت مدل عددی و ورود اطلاعات مورد نیاز به آن در این مطالعه از کد عددی MODFLOW که در قالب نرم افزار GMS 7.1¹ قرار گرفته است برای

با توجه به مقطع زمین‌شناسی دشت و موقعیت سازندهای قرار گرفته در زیر آن، ضخامت آبخوان حدود 100 متر می‌باشد که فرض می‌شود این ضخامت در تمام مساحت دشت همین مقدار است.

اطلاعات هیدروژئولوژیکی

در این مطالعه از اطلاعات مربوط به تراز آب و همچنین لاگ 19 چاه مشاهده‌ای که در سطح منطقه پراکنده‌اند استفاده می‌شود. متأسفانه اطلاعاتی در مورد دبی برداشتی از این چاه‌ها در دست نمی‌باشد. عمق این چاه‌ها از 15 تا 70 متر متغیر بوده و اطلاعات بدست آمده از لاگ‌ها نشان دهنده این امر می‌باشد که دشت

¹ Groundwater Modeling System

تخمین تغذیه حاصل از بارش به آب‌های زیرزمینی نتایج حاصل از چاه‌های مشاهده‌ای دشت نهاوند حاکی از این است که آبخوان این دشت آبخوانی آزاد یا نامحصور⁸ بوده و به همین دلیل قادر است به طور مستقیم توسط بارش تغذیه شود. در این مطالعه برای محاسبه تغذیه از روش بیلان آب استفاده شد اما بدلیل در دسترس نبودن اطلاعاتی از تبخیر در منطقه از این فاکتور صرفنظر و تغذیه از طریق محاسبه رواناب حاصل از بارش و تفاضل آن از مقدار بارش محاسبه شد.

برای محاسبه میزان رواناب از روش *CNI* که اصلاحی از روش *NRCS-CN*⁹ می‌باشد و توسط پاتیل و همکاران (2008) ارائه شده، استفاده گردیده است.

$$Q = \frac{p^2}{S + P} \quad [1]$$

که در این معادله P : بارش سالانه بر حسب میلی‌متر و S : ضریب نگهداشت خاک می‌باشد. برای محاسبه رواناب به روش *CNI* ابتدا با استفاده از نقشه-های کاربری اراضی منطقه و گروه هیدرولوژیکی خاک های آن نقشه CN^{10} با استفاده از نرم افزار-*Hec-GeoHms* به صورت رستر¹¹ تهیه شد. سپس با استفاده از معادله 2 که رابطه‌ای را میان ضریب نگهداشت خاک و مقدار CN برقرار می‌کند مقدار ضریب نگهداشت خاک نیز به صورت نقشه رستر تهیه شد.

$$S = \frac{25400}{CN} - 2 \quad [2]$$

پس از محاسبه ضریب نگهداشت خاک، با استفاده از معادله 1 که رابطه‌ای میان این پارامتر و باران تجمعی برقرار می‌کند مقدار رواناب و به تبع آن مقدار تغذیه حاصله از بارش قابل محاسبه خواهد بود.

مطالعه فرایندهای هیدروژئولوژیکی آب‌های زیرزمینی دشت نهاوند استفاده شد. *MODFLOW* مدلی از نوع تفاسل محدود¹ می‌باشد که قادر است به شبیه‌سازی سه بعدی جریان در حالت پایدار² و گذرا³ در آبخوان-های با لایه‌های ناهمگن⁴ بپردازد (یائوتی و همکاران (2008).

در این مطالعه ابتدا اطلاعات هیدرولوژیکی شامل میزان بارش وارده به منطقه، اطلاعات هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی شامل نقشه زمین-شناسی منطقه همراه با مقطع زمین‌شناسی آن و موقعیت چاه‌های منطقه به همراه لاگ این چاه‌ها و در نهایت نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک‌های آن برای اجرای مدل از سازمان‌های مربوطه (سازمان آب منطقه‌ای، سازمان هواشناسی همدان و سازمان زمین‌شناسی ایران) جمع آوری شدند. سپس مرز منطقه مورد مطالعه مشخص و مدل مفهومی⁵ آن که شامل موقعیت رودخانه گاماسیاب، میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای بود، ساخته شد. برای وارد کردن ویژگی-های هیدروژئولوژیکی مانند هدایت هیدرولیکی افقی مواد تشکیل دهنده دشت اقدام به ساخت مدل سه بعدی هیدروژئولوژیکی⁶ شد. برای کالیبره کردن مدل مقادیر هدایت هیدرولیکی و تغذیه با استفاده از روش سعی و خطا و سپس روش *PEST*⁷ تغییر داده شدند تا نتایج حاصل از مدل با مشاهدات بدست آمده از تراز چاه‌های مشاهده‌ای بهترین انطباق را داشته باشند. مدل برای سال 1376 کالیبره و میزان آب ورودی و خروجی به آبخوان دشت در این سال محاسبه شد.

¹ Finite difference

² Steady state

³ Transient

⁴ Heterogeneous

⁵ Conceptual model

⁶ 3D Hydrogeological model

⁷ Parameter estimation

⁸ Unconfined

⁹ Natural Resources Conservation Services Curve Number

¹⁰ CurveNumber

¹¹ Raster

محاسبه تغذیه برای دوره آماری

برای محاسبه تغذیه در این حالت از اطلاعات بارش کل دوره آماری (1376-1387) استفاده شد. طبق محاسبات میزان بارش تجمعی سالانه برای ایستگاه وسج 412/1 میلی‌متر می‌باشد. ابتدا با استفاده از این مقدار و با توجه به روش CNI سعی در محاسبه میزان رواناب حاصل از این بارش شد. پس از انجام محاسبات مقدار رواناب 377-226 میلی‌متر در سال و با کم کردن این مقدار از بارش سالانه میزان تغذیه 185-34 میلی-متر در سال یا 0/0005068-0/0000952 متر در روز بدست آمد.

توسعه مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آبهای زیرزمینی

مدل جریان در آبهای زیرزمینی با چگالی ثابت و مواد متخلخل با شرایط متعادل توسط معادله دیفرانسیل جزئی (معادله 3) نمایش داده می‌شود (مک دونالد و هارباگ 1998).

$$\left[3\right] \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

که در این معادله k_{xx} ، k_{yy} و k_{zz} به ترتیب هدایت هیدرولیکی در جهات x ، y و z بوده و دارای بعد (LT^{-1}) می‌باشند. h تراز پیزومتریک (L) می‌باشد.

جریان آبهای زیرزمینی در دشت توسط کد عددی MODFLOW-2000 شبیه‌سازی شد. این کد جریان را با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌کند. لایه‌ها در آن می‌توانند به صورت محصور¹ و غیر محصور در نظر گرفته شوند و همچنین قادر است استرس‌های وارد بر جریان از طریق چاه‌ها، تبخیر، زهکشی و رودخانه‌ها را شبیه‌سازی کند (هارباگ 2005).

در این مطالعه از MODFLOW که در قالب نرم افزار GMS 7.1 قرار گرفته است استفاده شد. نرم افزار

GMS نرم افزاری با واسط گرافیکی² است که با داشتن ابزار متفاوت کاربر را قادر می‌سازد تا به ساخت مدل مفهومی، شبکه‌بندی و حل معادله جریان و در نهایت نمایش نتایج حاصل بپردازد (لای 2002). شبیه‌سازی در این نرم افزار در سه مرحله پیش پردازش³، پردازش⁴ و پس پردازش⁵ صورت می‌گیرد.

مدل سه‌بعدی هیدروژئولوژیکی

برای ساخت مدل سه‌بعدی هیدروژئولوژیکی دشت از اطلاعات لاگ 19 چاه موجود استفاده شد. بدلیل عدم انطباق اطلاعات چاه‌ها با یکدیگر، سعی در ساده‌سازی اطلاعات شد و لایه‌هایی که در اکثر چاه‌ها وجود داشتند به عنوان لایه‌های تشکیل دهنده آبخوان در نظر گرفته شدند. همانطوری که قبلاً مطرح گردید این لایه‌ها رس و سیلت، شن و ماسه می‌باشند.

در اطلاعات لاگ چاه‌ها محل سنگ بستر مشخص نشده بود به همین دلیل برای تعیین محل سنگ بستر از مقطع زمین‌شناسی دشت استفاده شد. طبق این مقطع لایه‌های زیرین دشت به طور عمده از جنس آهک کریستالیزه می‌باشند که تقریباً در عمق 100 متری قرار گرفته و دارای نفوذ پذیری پایینی هستند به همین دلیل این لایه‌ها به عنوان سنگ بستر در نظر گرفته شدند و مدل هیدروژئولوژیکی با ضخامت تقریبی 100 متر بر روی سنگ بستر ایجاد شد.

ابتدا اطلاعات لاگ چاه‌ها وارد GMS شد و پس از تعریف لایه‌های مختلف دشت مدل سه بعدی زمین شناسی آن تهیه گردید. پس از آن شبکه سه‌بعدی⁶ اولیه⁶ با توجه به اطلاعات موجود و شرایط هیدروژئولوژیکی در ابعاد 150 و 100 سلول در جهت x و y ساخته شد این شبکه دارای 91506 گره⁷ و 75000

² Graphical interface

³ Pre-processing

⁴ Processing

⁵ Post-processing

⁶ 3D grid

⁷ Node

¹ Confined

مفهومی به صورت زهکش³ با قابلیت انتقال⁴ مشخص در نظر گرفته شد. پوشش سوم مربوط به تراز آب 18 چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه می‌باشد که لازم است اطلاعات تراز آب این چاه‌ها نیز برای استفاده از آن‌ها در کالیبراسیون مدل و مقایسه تراز مشاهده‌ای و محاسبه‌ای وارد مدل مفهومی شود. محدوده هر سه پوشش در لایه اول تعریف و سپس مدل مفهومی وارد مدل سه‌بعدی هیدروژئولوژیکی شد.

شرایط مرزی و شرایط اولیه

خصوصیات هیدروژئولوژیکی مجاور و درون محدوده مدل باید توسط شرایط مرزی نمایش داده شوند. خطوط مرزی دشت به صورت مرزهای بدون جریان⁵ در نظر گرفته شدند در حالی که محل ورود رودخانه به مدل به صورت مرز با تراز ثابت⁶ در نظر گرفته شد. تراز اولیه آب‌های زیرزمینی برای اجرای اولیه مدل با استفاده از توپوگرافی منطقه تعریف شد زیرا طبق یافته‌های هابرت (1940) تراز آب از سطح زمین تبعیت می‌کند شکل 6 نحوه تعریف شرایط مرزی را برای مدل نشان می‌دهد.

بعد از تعریف شرایط مرزی با استفاده از بسته LPF^7 که در *MODFLOW* برای حل جریان و تراز آب-های زیرزمینی قرار داده شده است، استفاده شد. این بسته به صورت مجزا هر ساختار هیدروژئولوژیکی را شبیه‌سازی کرده و به محاسبه جریان در هر سلول می‌پردازد (یانگ و همکاران 2009). مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی افقی طبق اعداد ارائه شده توسط تاد (2005) برای لایه‌های رس و سیلت، شن و ماسه به ترتیب 1 و 50 متر در روز در نظر گرفته شد.

75000 سلول می‌باشد. مدل در جهت عمودی به 5 لایه تقسیم گردید تا نمایش گرافیکی نتایج بهتر صورت گیرد. شکل 4 (الف، ب و ج) به ترتیب مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی، شبکه سه‌بعدی اولیه و محدوده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در ادامه شبکه سه‌بعدی اولیه محدود به مرز منطقه شد (شکل 4-د) و مدل سه-بعدی زمین‌شناسی به آن انتقال پیدا کرد و در نهایت لایه سطحی آن توسط اطلاعات ارتفاعی منطقه و از طریق روش وزن‌دهی معکوس فاصله¹ تصحیح شد (شکل 4-ه).

مدل مفهومی

دقت مدل هیدروژئولوژیکی وابسته به صحت تعریف شرایط فیزیکی منطقه و تخمین صحیح آب ورودی و خروجی به آن است (لارون و همکاران 2005). مدل مفهومی شامل شرایط هیدرولیکی، تغذیه و تخلیه و محدوده منطقه مورد مطالعه می‌باشد همچنین می‌توان با استفاده از آن خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه مانند محل چاه‌ها و رودخانه‌ها را نیز تعریف کرد.

مدل مفهومی در این مطالعه جهت ورود اطلاعات به مدل هیدروژئولوژیکی در چند پوشش² مجزا ساخته شد. پوشش اول مربوط به میزان تغذیه به آب‌های زیرزمینی می‌باشد که این مقدار از محاسبات روش *NRCS-CN* که پیشتر ذکر شد به عنوان ورودی برای تغذیه وارد شد. مقدار ورودی میانگین حد پایین و بالای محاسبات یعنی 0/000301 متر در روز در نظر گرفته شد و فرض شد این مقدار به طور یکنواخت در کل منطقه اتفاق می‌افتد.

طبق مشاهدات انجام شده از منطقه، رودخانه گاماسیاب در اکثر نقاط توسط آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌گردد. (شکل 5) در نتیجه این رودخانه در مدل

³ Drain

⁴ Conductance

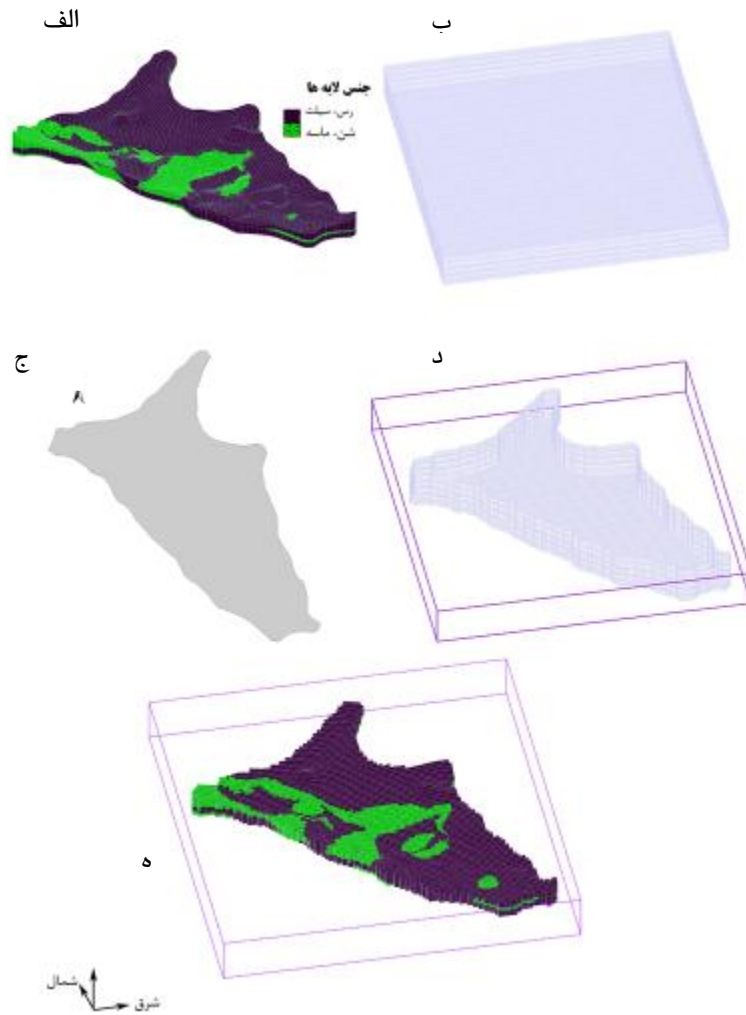
⁵ No flow boundary

⁶ Constant head boundary

⁷ Layer property flow

¹ Inverse distance weighted

² Coverage



شکل 4- مراحل ساخت مدل سه‌بعدی هیدروژئولوژیکی - الف. مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی، ب. شبکه سه‌بعدی اولیه، ج. مرز منطقه مورد مطالعه، د. محدود شدن شبکه سه‌بعدی به مرز منطقه، ه. وارد شدن نقشه زمین‌شناسی سه‌بعدی به شبکه سه‌بعدی و تصحیح لایه سطحی با اطلاعات ارتفاعی



شکل 5- رودخانه گاماسیاب، نمایی از زهکشی آبهای زیرزمینی توسط رودخانه

نتایج و بحث

کالیبراسیون

به طور متداول مدل‌ها توسط فرآیند سعی و خطا که در آن پارامترهای مدل در محدوده معقولی از یک شبیه‌سازی به شبیه‌سازی دیگر تعدیل می‌شوند تا بهترین برازش برای مدل بدست آید، کالیبره می‌شوند (یائوتی و همکاران 2008).

مدل‌ها توسط روش‌های معکوس¹ نیز می‌توانند کالیبره شوند. در این روش‌ها مقادیر بهینه یک پارامتر برای ساختار پارامتر داده شده با استفاده از تکنیک‌های ریاضی مانند رگرسیون غیر خطی² تعیین می‌شوند (کولی و نف 1990). این تکنیک اغلب به عنوان تخمین پارامتر نامیده می‌شود. در این مطالعه از برنامه تخمین پارامتر به دلیل توانایی آن در محدود کردن دامنه مقادیر استفاده شد و عمل کالیبراسیون برای سال 1376 انجام شد.

کالیبراسیون برای سال 1376

مدل برای حالت پایدار با فرض بارش ثابت، تخلیه و تراز ثابت آب‌های زیرزمینی کالیبره شد. در این مطالعه فرض شد که هدایت هیدرولیکی افقی و تغذیه از پارامترهای ناشناخته جریان بوده و روش PEST برای تخمین آن‌ها به کار گرفته شد. عمل کالیبراسیون برای سال 1376 (شروع دوره آماری) انجام شد و مشاهدات استفاده شده برای انجام عمل کالیبراسیون تراز آب چاه‌های منطقه در سال 1376 بودند.

بعد از انجام کالیبراسیون مقدار تغذیه 0/0008211 متر در روز بدست آمد که این مقدار 2/72 برابر مقدار تغذیه ورودی برای مدل می‌باشد. مقدار هدایت هیدرولیکی افقی لایه‌های رس، سیلت و شن، ماسه نیز به ترتیب 5 و 26/52 متر در روز بدست آمد. پس از محاسبه هدایت هیدرولیکی و تغذیه با استفاده از روش سعی و خطا، سعی در محاسبه میزان هدایت رودخانه گاماسیاب برای رسیدن به بهترین برازش

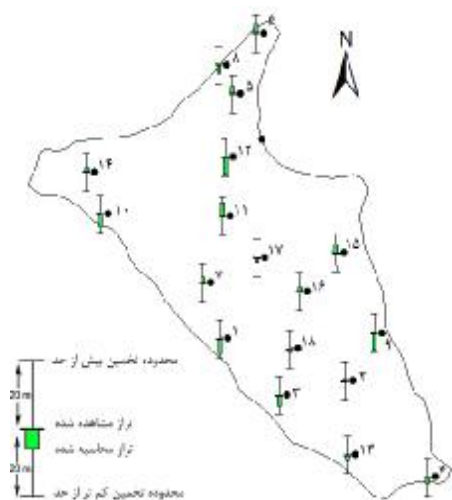
میان محاسبه و مشاهده شد. مقدار این پارامتر بعد از سعی و خطا $5 m^2/d/m$ بدست آمد. شکل 7 نمودار رسم شده برای مقایسه میان تراز مشاهده‌ای و محاسبه‌ای را نشان می‌دهد. در این شکل شاخص کالیبراسیون بیانگر چگونگی انجام عمل کالیبراسیون می‌باشد. این شاخص دارای یک حد پایین و بالا است که میزان حد مجاز برای تخمین بیش از حد³ و تخمین کم تر از حد⁴ را نشان می‌دهد که در اینجا ± 20 متر در نظر گرفته شده است. قسمت میانی این شاخص میزان خطای موجود بین محاسبه و مشاهده را نشان می‌دهد. خطای قرار گرفته در دامنه مجاز به رنگ سبز می‌باشد (یانگ و همکاران 2009).

نحوه کالیبراسیون با پارامترهای آماری ریشه مربع میانگین خطا⁵، میانگین خطای مطلق⁶ و میانگین خطا⁷ بررسی شد که این پارامترها به ترتیب 10/44، 9/1 و 2/86 می‌باشند. با توجه به مقدار میانگین خطا مدل تمایل به تخمین بیش از حد تراز آب دارد.

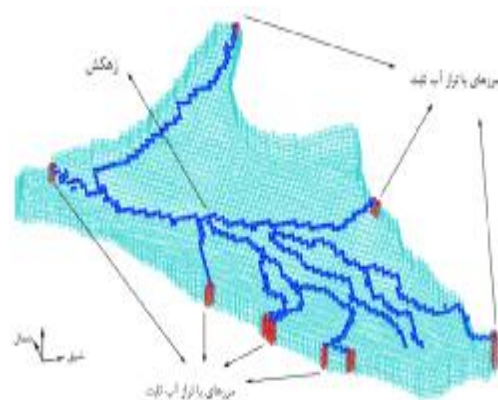
میزان آب ورودی و خروجی به آبخوان برای سال 1376 در جدول 2 آمده است. میزان جریان بر حسب متر مکعب در روز بیان می‌شود و مقادیر مثبت و منفی به ترتیب بیانگر آب ورودی و خروجی به آبخوان هستند. تعادل میان آب ورودی و خروجی با فرض حالت پایدار مطابقت دارد.

شکل 8 (الف و ب) به ترتیب تراز آب محاسبه شده توسط مدل برای لایه 2 و 1 را نشان می‌دهد. مناطق غیر اشباع⁸ در لایه 1 به صورت سلول‌های خشک⁹ تبدیل شده اند. همانطور که در شکل دیده می‌شود جریان آب از شیب عمومی دشت تبعیت می‌کند یعنی از جنوب شرقی به شمال غربی در حال حرکت است.

³ Overestimate⁴ Underestimate⁵ Root Mean square Error (RMSE)⁶ Mean Absolute Error (MAE)⁷ Mean Error (ME)⁸ Unsaturation⁹ Dry cells¹ Inverse methods² Nonlinear regression



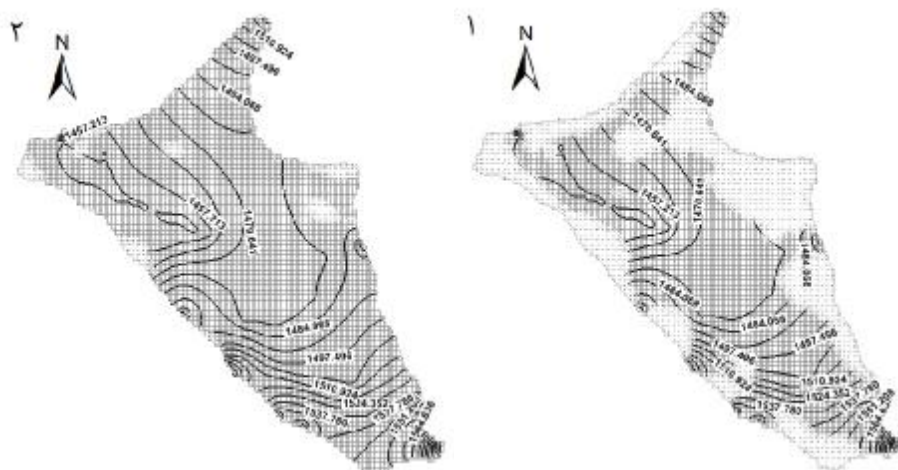
شکل 7- مقایسه میان ترازهای مشاهده شده و محاسبه شده



شکل 6- نحوه تعریف شرایط مرزی برای مدل

جدول 1- مقادیر آب ورودی و خروجی به آبخوان در سال 1376 (m^3/day)

خروجی		ورودی	
0	تراز ثابت	171063/69	تراز ثابت
-407458/32	زهکش	0	زهکش
0	تغذیه	233274/12	تغذیه
-407458/32	کل خروجی	404353/43	کل ورودی
		-3104/88	ورودی - خروجی
		-0/76	درصد تفاضل ورودی و خروجی



شکل 8- تراز آب محاسبه شده توسط مدل برای لایه 1 و 2 در سال 1376 (سلولهای خشک با رنگ سفید نمایش داده شده‌اند)

برای بررسی مبدأ آلودگی از شبیه‌سازی رو به عقب حرکت ذرات استفاده شد. برای این کار 24 ذره در لایه دوم و در مرکز 5 چاه انتخابی در سطح دشت قرار گرفت و حرکت افقی و رو به عقب ذرات برای 10، 20 و 100 سال شبیه‌سازی شد (شکل 10). این شبیه‌سازی نیز برای حالت پایدار سال 1376 انجام شد زیرا تغییرات ماهانه تراز و گرادیان آب تأثیری بر روی حرکت افقی ذرات که در طی ده‌ها سال انجام می‌شود، ندارد. در طول مدت شبیه‌سازی بیشترین مسیر طی شده توسط ذرات از مرکز هرچاه به سمت مبدأ آلودگی تقریباً 8366 متر می‌باشد.

طبق یافته‌های یائوتی و همکاران (2008) کلرید (Cl^-) بهترین یون برای انجام عمل ردیابی مسیر ذرات می‌باشد زیرا این یون در طول مسیر حرکت هیچ گونه واکنشی با عناصر اطراف خود ایجاد نمی‌کند. نتایج حاصل از ردیابی ذرات به صورت رو به عقب نیز نشان دهنده این امر می‌باشد که در صورت بروز آلودگی در چاه‌های انتخابی منشأ این آلودگی از نقاط اطراف دشت می‌باشد که پس از طی یک مسیر طولانی وارد چاه‌های قرار گرفته در مرکز آن می‌شود. به این ترتیب با دانستن مسیر حرکت آلودگی و شناسایی مکان‌های آلوده می‌توان با اقدامات مدیریتی از انتقال آن به نقاط دیگر دشت جلوگیری کرد.

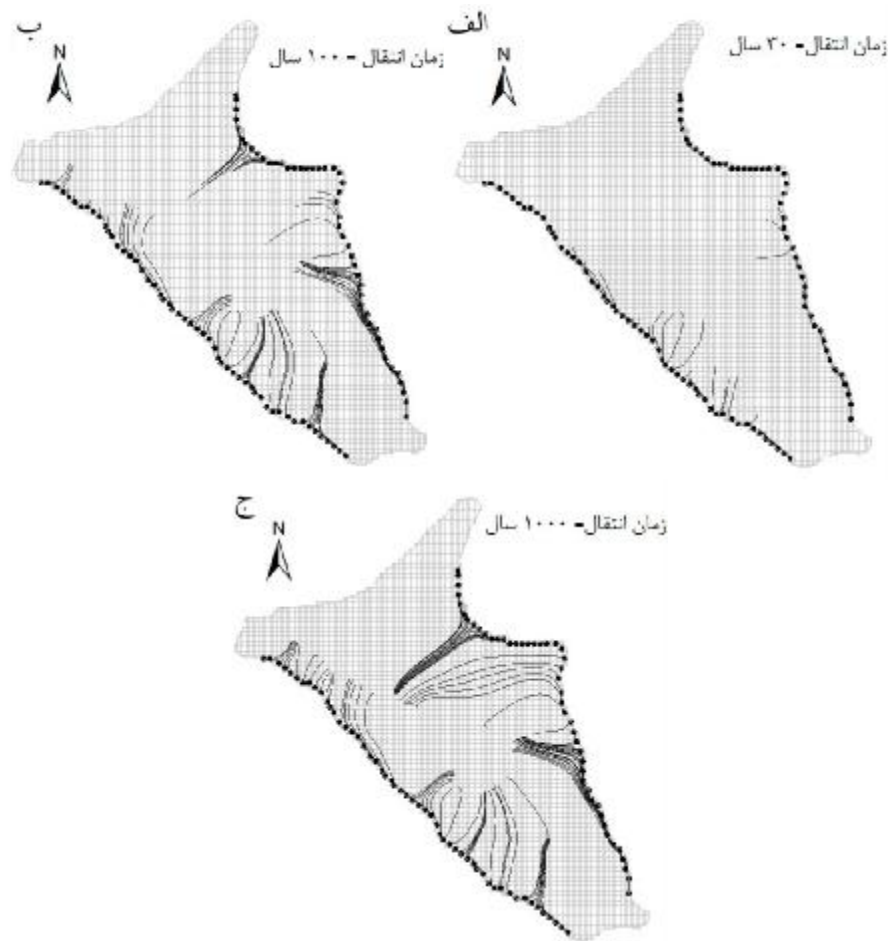
مقادیر تراز آب در جنوب شرقی و شمال غربی به ترتیب 1564 و 1475 متر می‌باشد که با توجه به فاصله تقریبی 28 کیلومتری باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی 0/3% در دشت می‌شود که این امر خود نشانه سرعت کم جریان آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

شبیه‌سازی انتقال آلودگی توسط ردیابی ذرات

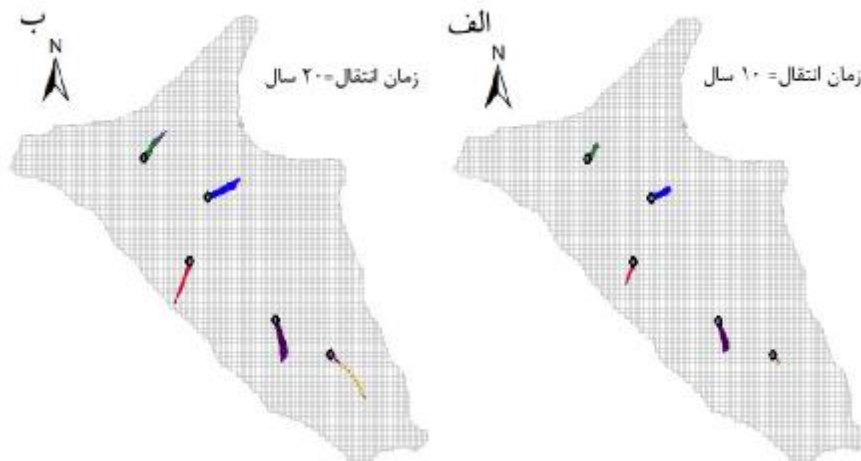
در روش ردیابی ذرات گروهی از ذرات فرضی در مکانی خاص قرار داده شده و جهت و زمان حرکت آن‌ها بر اساس سرعت جریان آب مشخص می‌شود. با مدل‌سازی حرکت ذرات می‌توان حرکت رو به جلو و همچنین رو به عقب آن‌ها را جهت مشخص کردن مبدأ و مقصد آلودگی شبیه‌سازی کرد (بری و همکاران 2009). در این مطالعه برای انجام این کار از کد عددی MODPATH که یک برنامه پس‌پردازش ردیابی ذرات¹ است و توسط پولاک (1994) ارائه شده است جهت تعیین مسیر و زمان انتقال ذرات استفاده شد.

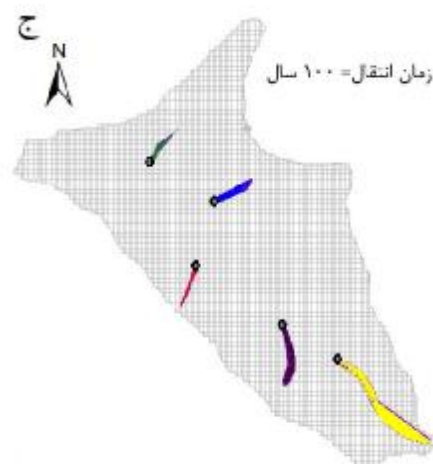
ذرات برای بررسی حرکت رو به جلوی آلودگی در دو طرف دشت قرار داده شده و انتقال آلودگی توسط ردیابی حرکت آن‌ها شبیه‌سازی شد (شکل 9). به دلیل حرکت کند ذرات در آب‌های زیرزمینی و عدم تأثیر تناوب ماه‌های تر و خشک در حرکت ذرات این شبیه‌سازی برای تراز محاسبه شده توسط مدل در سال 1376 انجام شد. زمان انتقال بین 30 تا 1000 سال بود و شبیه‌سازی در لایه دوم انجام شد. همانطوری که در شکل 9 دیده می‌شود نحوه حرکت ذرات منطبق بر گرادیان آب‌های زیرزمینی بوده و آلودگی از هر دو طرف دشت به سمت مرکز دشت حرکت می‌کند. دلیل این امر تفاوت ارتفاعی در مرزها و مرکز می‌باشد که باعث ایجاد گرادیان و هدایت ذرات به مرکز دشت می‌شود. طولانی‌ترین مسیر طی شده ذرات در این بازه زمانی 12232 متر می‌باشد.

¹ Particle tracking post-processing program



شکل 9- شبیه‌سازی مسیر جریان ذرات انتخابی قرار گرفته در دو طرف دشت به صورت حرکت رو به جلو برای شرایط پایدار (1376)- زمان حرکت 30 سال (الف)، 100 سال (ب) و 1000 سال (ج)





شکل 10- شبیه‌سازی مسیر جریان ذرات قرار گرفته در مرکز 5 چاه انتخابی به صورت حرکت رو به عقب برای شرایط پایدار (1376)-زمان حرکت 10 سال (الف)، 20 سال (ب) و 100 سال (ج)

نتیجه‌گیری کلی

شیب غالب منطقه مطابقت دارد. مقادیر تراز آب در جنوب شرقی و شمال غربی به ترتیب 1564 و 1475 متر می‌باشد که با توجه به فاصله تقریبی 28 کیلومتری باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی 0/3% در دشت می‌شود. نتایج حاصل از MODPATH نشان داد که حرکت آلودگی از دو طرف دشت به سمت مرکز دشت می‌باشد اما این حرکت، حرکتی کند است (1000 سال). شبیه‌سازی رو به عقب ذرات از مرکز چاه‌های انتخابی نیز نشان دهنده این موضوع است که با استفاده از این مدل می‌توان نحوه ورود آلودگی به چاه‌های منطقه را از نظر مکانی و زمانی مورد ارزیابی قرار داد.

سپاسگذاری

در اینجا لازم است تا از سازمان آب منطقه‌ای همدان، سازمان زمین‌شناسی ایران و سازمان هواشناسی همدان به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات تراز آب‌های زیرزمینی، بارش، نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه و... تشکر نمائیم.

آبخوان غیر محصور دشت نهاوند با استفاده از کد عددی MODFLOW برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب‌های زیرزمینی در حالت شرایط پایدار مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ساخت مدل ریاضی پارامترهای مختلفی جمع‌آوری شدند. استفاده از مدل مفهومی کمک زیادی در تعریف شرایط مرزی و ویژگی‌های فیزیکی آبخوان کرد. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل نتایج معقولی میان تراز مشاهده شده و محاسبه شده در سال 1376 نشان داد. مقادیر ریشه مربع میانگین خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین خطا به ترتیب 10/44 ، 9/1 و 2/86 بود. مقدار محاسبه شده تغذیه آب‌های زیرزمینی توسط بارش 0/0008211 متر در روز بود که این مقدار 2/72 برابر مقدار اولیه یعنی 0/000301 متر در روز می‌باشد. مقادیر هدایت هیدرولیکی لایه‌های رس، سیلت و شن، ماسه نیز به ترتیب 5 و 26/52 متر در روز محاسبه شد. طبق محاسبه تراز آب برای مدل، جریان آب‌های زیرزمینی از جنوب شرقی به شمال غربی است که این جریان با

منابع مورد استفاده

- Anonymous, 1991. Nahavand geological section. Hamedan Regional Water Organization. Website (www.hmrw.ir)
- Barry F, Ophori D, Hoffman J and Canace R, 2009. Groundwater flow and capture zone analysis of the Central Passaic River Basin, New Jersey. *Environ Geology* 56: 1593–1603.
- Harbaugh AW, 2005. The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model (MODFLOW). U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Harden A, 2000. Brazos G Regional Water Planning Area, Carrizo-Wilcox Ground Water Flow Model and Simulations Results. Associates Inc.
- Hubbert MK, 1940. The theory of ground water motion. *Journal of Geology* 48 (8):785–944.
- Laronne BI, Gvirtzman LH, 2005. Groundwater flow along and across structural folding: an example from the Judean desert, Israel. *Journal of Hydrology* 312: 51–69.
- Luay JF, 2002. Groundwater modelling in quifers with highly karstic and heterogeneous Characteristics (KHC) in Palestine. *Water Resources Management* 16: 369–379.
- Pollock DW, 1994. User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model. Open-File Report 94-464, U.S. Geological Survey.
- Regli C, Rauber M and Huggenberger P, 2003. Analysis of aquifer heterogeneity within a well capture zone, comparison of model data with field experiments: a case study from the river Wiese, Switzerland, *Aquat. Sci* 65: 111-128.
- Todd DK, Mays LW, 2005. *Groundwater Hydrology*. John wiley& sons.
- Yang FR, Lee CH, Kung WJ and Yeh HF, 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project in Taiwan. *Engineering Geology* 103: 39–58.
- Yaouti F El, Mandour A El, Khattach D, Kaufmann O, 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research* 2: 192-209.