

## مدل سازی آب های زیرزمینی به منظور پیش بینی پراکنش نیترات در آبخوان های بحرانی (مطالعه موردی: شهر مشهد)

اکبر باغوند<sup>۱</sup>

علی وثوق<sup>۲\*</sup>

[ali.vosoogh@gmail.com](mailto:ali.vosoogh@gmail.com)

سعید گیوه چی<sup>۳</sup>

علی دریابیگی زند<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** در حال حاضر به علت عدم اجرای مدیریت صحیح، بیشتر آبخوان های کشور ایران به خصوص در نواحی خشک از جمله دشت مشهد در طی سال های اخیر با افت سطح ایستابی و کاهش حجم ذخیره مواجه بوده و بعضاً نیز در معرض آلودگی انواع آلاینده ها قرار دارند. با توجه به این که یکی از شاخص های اصلی آلوده بودن آبخوان ها، آلودگی آن ها به نیترات می باشد، در این تحقیق نیز سعی شده است تا با تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان دشت مشهد، رفتار آبخوان با تکیه بر یون نیترات برای ۱۲ سال آینده شبیه سازی و پیش بینی گردد.

**روش بررسی:** به منظور تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان شهر مشهد، آمار و اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی با استفاده از نرم افزار Surfer Ver. 8، کد کامپیوتری Modflow 2000 و پروسسور GMS مورد تحلیل قرار گرفت، پس از انجام عملیات واسنجی<sup>۴</sup> و صحت سنجی<sup>۵</sup> مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان شهر مشهد به دست آمد.

**یافته ها:** نتایج تحقیق مبین آن است که در سال ۱۴۰۰ شمسی مشکل آلودگی نیترات برای بخش های عمده ای از مرکز و شرق آبخوان شهر مشهد کماکان پابرجا بوده و غلظت آلاینده نیترات در این مناطق از ۱۰ تا ۹۰ میلی گرم در لیتر متغیر می باشد. بر این اساس در

۱- دانشیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

۲- کاندیدای دکتری رشته مهندسی عمران- مهندسی آب دانشگاه علم و صنعت ایران،\* (مسوول مکاتبات)

۳- استادیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

اکثر مناطق، میزان غلظت نیتрат بیشتر از حد مجاز (۴۵ میلی گرم در لیتر) و میزان متوسط افت سالیانه این آبخوان (۰/۹۰ متر) ، نشان دهنده بحرانی بودن این آبخوان می باشد. .

**بحث و نتیجه گیری:** دلیل عمده افزایش این نوع آلودگی در طی سال های اخیر در اثر جمع آوری و دفع غیراصولی فاضلاب تولیدی این شهر به چاه های جاذب و نفوذ از این چاه ها به آبخوان دشت مشهد بوده است.

**واژه های کلیدی:** آبخوان، مدل سازی، صحت سنجی، واسنجی، پیش بینی، نیترات

## **Ground Water Modeling to Estimate Nitrate Dispersion in Critical Aquifers (A Case Study: Mashhad City)**

**Akbar Baghvand<sup>1</sup>**

**Ali Vosoogh<sup>2\*</sup>** (*Corresponding Author*)

[ali.vosoogh@gmail.com](mailto:ali.vosoogh@gmail.com)

**Saeed Givchi<sup>2</sup>**

**Ali Daryabeigi Zand<sup>3</sup>**

### **Abstract**

**Background and Objective:** At present, due to inefficient and incorrect management, most domestic aquifers in Iran, particularly in dry regions, including the Mashhad plain, face lowering levels of lakes and ponds in water storage and are sometimes subject to various pollutants. In fact, a main and significant index which shows the aquifers infections is that nitrate is found in water. In this research, an attempt has been made to prepare a mathematical model for qualitative and quantitative value of the Mashhad plain aquifer. Consequently, the aquifer's behavior is predicted and simulated based on nitrate ion during the last twelve years.

**Method:** In order to develop a mathematical model for qualitative and quantitative value of Mashhad plain's aquifer, meteorological, hydrological and hydro geological data and statistics were analyzed using Surfer Ver. 8 software, computer code Modflow 2000 and GMS processor. After calibration settings and verification, this mathematical model is achieved.

**Findings:** L Results indicate that in the year 2022 the problematic issue of nitrate infections will remain intact for most central and eastern parts of the Mashhad aquifer and its density in these regions varies from 10 to 90mg. Based on this information, in most regions nitrate density is more than the permitted amount (45mg per liter) and the annual mean drop value for this aquifer (0.90 meter) shows its critical situation.

**Discussion and Conclusion:** The main reason for this aquifer's pollution during recent years is non-standard waste gathering and sewage burying methods and combination with water wells, thus its penetration through these water wells into the aquifer.

**Key words:** aquifer, model building, verification, calibration, forecast, nitrate

---

1- Associate Professor-Faculty of Environment-University of Tehran

2- Ph.D candidate-civil &water engineering-Iran University of Science and Technology

3- Assisstant Professor -Faculty of Environment-University of Tehran

## مقدمه

به طور کلی در بسیاری از مناطق جهان، آب مورد نیاز برای مصارف مختلف از طریق منابع آب زیرزمینی به دست می آید (۱ و ۲). افزایش میزان جمعیت و افزایش تقاضا برای آب و غذا موجب افزایش تنش در کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی از یک سو (۳، ۴، ۵، ۶ و ۷) و کاهش منابع با ارزش آب زیرزمینی می شود (۸). در این راستا افزایش تقاضا برای غذا می تواند موجب آلوده شدن منابع آب زیرزمینی به وسیله نیترات شود. این امر به این دلیل است که یکی از منابع اصلی توزیع نیترات در آب های زیرزمینی، استفاده از کودهای نیترا ته مرتبط با فعالیت های کشاورزی می باشد (۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳).

میزان غلظت زیاد نیترات در آب آشامیدنی موجب بروز بیماری متاموگلوبینما<sup>۱</sup> در نوزادان و سرطان معده در بالغین می شود (۱۴ و ۱۵). در این راستا US EPA<sup>۲</sup> حداکثر میزان غلظت (MCL<sup>۳</sup>) نیترات را ۱۰ میلی گرم در لیتر برحسب NO<sub>3</sub>-N اعلام کرده است (۱۶).

آلاینده های آب های زیرزمینی را می توان به دو دسته نقطه ای و غیرنقطه ای تقسیم بندی نمود. منابع غیرنقطه ای نیتروژن شامل مصرف کودها، کاشت محصولات غلات، نیتروژن محلول در رسوبات و پساب های برگشتی از کشاورزی می باشد. منابع نقطه ای هم چون سیستم های سپتیک و مخازن فاضلاب نیز می توانند از منابع اصلی آلودگی نیترات باشند (۱، ۳، ۷، ۱۱، ۱۲، ۱۷، ۱۸ و ۱۹).

به طور کلی مطالعه در مورد سطوح آب زیرزمینی اطلاعات زمانی و مکانی خوبی را در خصوص محیط آبخوان آشکار می سازد. به منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی روش های عددی قادر هستند با شرایط محدود کننده خاص، ساختار پیچیده ای از آبخوان ها را شامل سطوح آب زیرزمینی در آینده پیش بینی نمایند (۲۰).

در این تحقیق نیز سعی شده است تا با استفاده از مدل سازی آب های زیرزمینی، پراکنش میزان نیترات در محدوده آبخوان

شهر مشهد با استفاده از قابلیت ها و با استفاده از نرم افزارهای Surfer Ver 8، کد کامپیوتری Modflow 2000 و پروسسور GMS پیش بینی گردد.

تاکنون در ایران و جهان به منظور پیش بینی میزان آلاینده های مختلف، از قابلیت های نرم افزار Mod Flow در تحقیقات گوناگون استفاده شده، اما این مورد در خصوص آبخوان های بحرانی که همراه با کاهش سالیانه ذخایر آب زیرزمینی آن ها، میزان آلودگی منابع از جمله نیترات نیز افزایش می یابد مورد بحث قرار نگرفته است. از جمله کارهایی که به منظور نحوه انتقال و جابه جایی نیتروژن در آب های زیرزمینی می توان نام برد، تحقیقی می باشد که در سال ۲۰۰۶ میلادی توسط می سان لی<sup>۴</sup> و همکاران در محلی به نام بوسلتن<sup>۵</sup> واقع در غرب استرالیا انجام گردیده است (۲۱). در این تحقیق مدل ریاضی محدوده مطالعات توسعه یافته و در نهایت با استفاده از مدل اصلاح شده نحوه جابه جایی و انتقال نیترات در آبخوان محدوده به دست آمده است. هم چنین در تحقیق دیگری که توسط المصری<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۹ میلادی انجام گردیده است آلودگی آبخوان ها به واسطه نیترات و به کمک مدل AHP مورد بررسی قرار گرفته است (۲۲). شایان ذکر است تحقیق دیگری نیز توسط آقای کارسنبرگ<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی انجام گردید. هدف از تحقیق فوق ایجاد یک قالب نرم افزاری میان نرم افزار Mod Flow و زبان برنامه نویسی MATLAB بوده است (۲۳).

## محدوده مطالعات

محدوده مورد مطالعه (محدوده شهر مشهد) جزئی از دشت مشهد بوده و در حوضه آبریز کشف رود واقع می باشد. این حوضه در شمال استان خراسان رضوی و در طول جغرافیایی ۲۰' - ۵۸° تا ۸' - ۶۰° عرض و ۴۰' - ۳۵° تا ۳' - ۳۶° واقع

4- Mee Sun Lee

5- Busseleton

6- Almasri

7- Karssenber

1- methemoglobinemia

2-US Environmental Protection Agency

3- maximum contaminant level

می دهد. این منطقه دربرگیرنده نواحی دشتی و کوه های موجود می باشد که در این رابطه در جدول ۱ تفکیک مساحت هر یک مشخص شده است.

جدول ۱- تفکیک کوه و دشت در حوضه آبریز مشهد

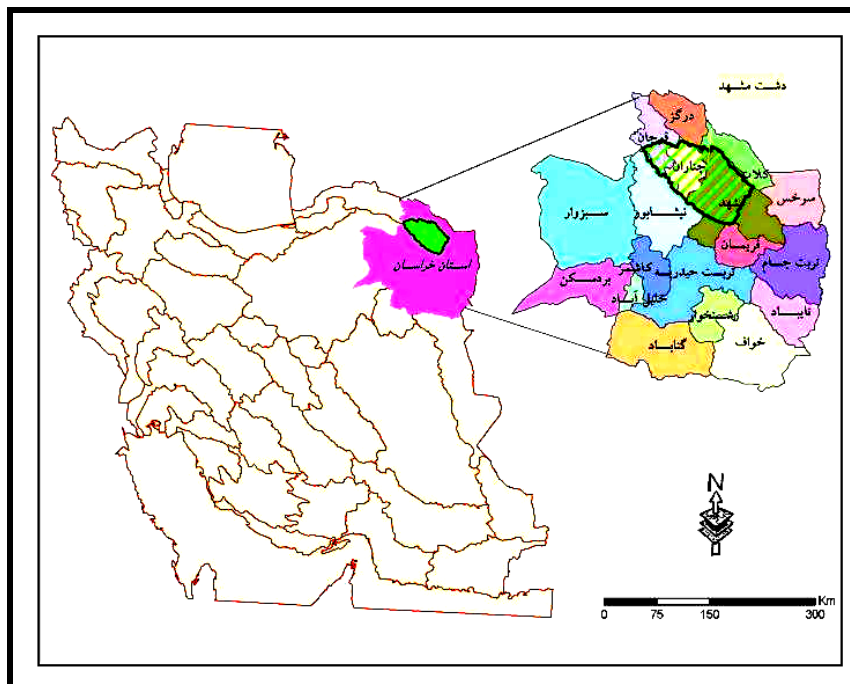
| نام محدوده | مساحت دشت (کیلومتر مربع) | درصد  | مساحت کوه (کیلومتر مربع) | درصد  |
|------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
| حوضه مشهد  | ۳۷۷۶                     | ۳۸/۱۱ | ۶۱۳۳                     | ۶۱/۸۹ |
| مجموع      | ۹۹۰۹                     |       |                          |       |

آن چه از این تفکیک بر می آید نشان گر کوهستانی بودن بخش اعظم منطقه مورد مطالعه می باشد. در این رابطه شکل ۲ وضعیت نواحی کوه و دشت در محدوده مورد مطالعه را نمایش می دهد.

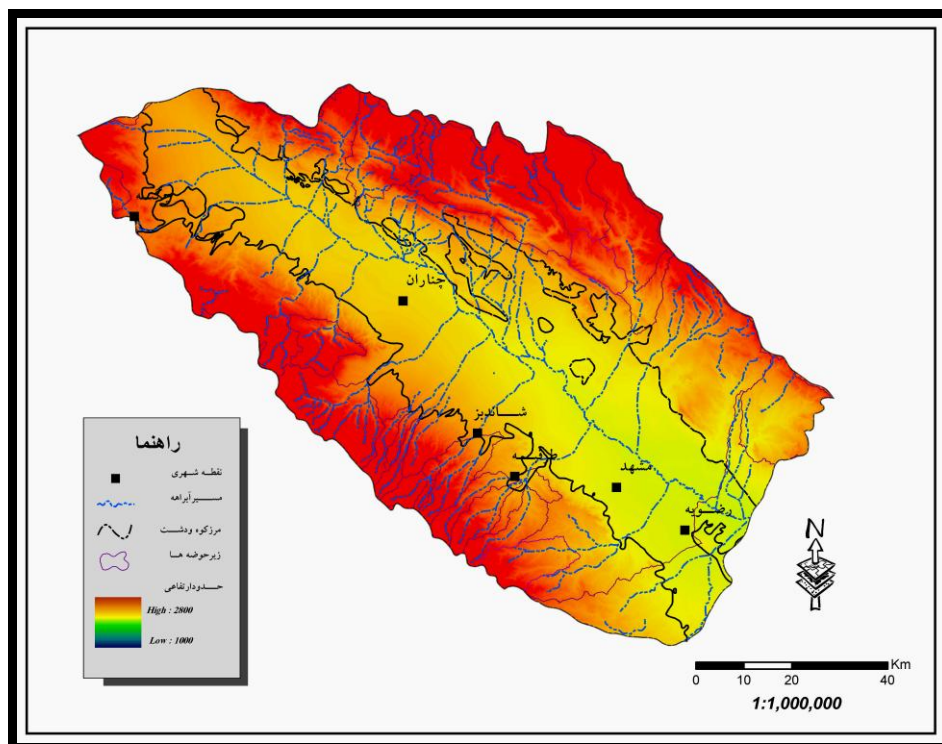
شده است و از شمال به خط الراس ارتفاعات هزارمسجد (کپه داغ)، از جنوب به ارتفاعات بینالود و از شمال غرب به حوضه آبریز رودخانه اترک و از جنوب شرق به حوضه آبریز جامرود محدود می شود.

شهر مشهد به عنوان پایتخت معنوی کشور دارای جمعیتی بالغ بر ۳/۵ میلیون نفر ساکن و بالغ بر ۲۰ میلیون نفر جمعیت متحرک (زائر)، مهم ترین مرکز جمعیتی حوضه بوده که با وسعتی حدود ۲۸ هزار هکتار از منابع آب های سطحی و زیر زمینی قابل ملاحظه ای که بتواند آینده ای پایدار برای توسعه شهر را فراهم آورد برخوردار نبوده و منابع آب زیرزمینی آن نیز در معرض آلودگی قرار دارد.

از جمله عوامل اصلی آلودگی آبخوان شهر مشهد می توان به بروز پدیده خشک سالی در سال های اخیر (از سال ۱۳۷۷)، رشد نامتناسب جمعیت، دفع سنتی فاضلاب در چاه های جذبی، استاندارد نبودن و فرسودگی تاسیسات توزیع، شرایط زیارتی شهر مشهد (جمعیت میلیونی زائر) و عدم رعایت حریم های مورد نیاز منابع آب (سد، رودخانه و چاه) اشاره نمود. شکل ۱ موقعیت مکانی محدوده نسبت به کل کشور را نمایش



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعات



شکل ۲- وضعیت نواحی کوه و دشت در محدوده مورد مطالعه

در جدول ۲ مقادیر برخی از شاخص های اقلیمی مربوط به ایستگاه سینوپتیک مشهد ارایه شده است.

جدول ۲- شاخص های اقلیمی منطقه - ایستگاه مشهد

| پارامترهای اقلیمی             | دی ماه    | تیر ماه | سالانه    |
|-------------------------------|-----------|---------|-----------|
| میانگین دما (درجه سانتیگراد)  | ۱/۷       | ۲۶/۳    | ۱۴/۲      |
| تعداد روزهای یخبندان          | ۲۵        | ۰       | ۸۵        |
| رطوبت نسبی (درصد)             | ۷۲/۷      | ۳۵/۹    | ۵۵/۲      |
| بارندگی (میلی متر)            | ۳۶/۴      | ۱       | ۲۶۱/۴     |
| سرعت متوسط باد (متر بر ثانیه) | ۱/۳       | ۲/۹     | ۱/۲       |
| جهت وزش باد غالب              | جنوب شرقی | شرقی    | جنوب شرقی |

سازند زمین شناسی منطقه از شیست و کوارتزیت تشکیل شده و مربوط به قبل از دوران اول زمین شناسی (پروکامبرین) است. این سازند در حوالی معدن آق دریند واقع در شرق حوضه رخنمون دارد. سازندهای دوران اول زمین شناسی به صورت آهک دولومیتی، شیل، سنگهای آذرین و دگرگونی در ارتفاعات بینالود به طور محدود دیده می شود. سازندهای دوران دوم شامل سنگهای رسوبی از نوع آهک، ماسه سنگ، ماسه سنگ و شیل در ارتفاعات شمالی دشت مشهد (هزار مسجد- کپه داغ)

آبخوان شهر مشهد در سیستم طبقه بندی دومارتن در آب و هوای نیمه خشک شدید قرار دارد. هم چنین بر اساس روش آمبرژه نیز این حوضه دارای آب و هوای خشک سرد و منطقه خشک نیمه مرطوب سرد می باشد.

#### زمین شناسی

آبخوان شهر مشهد که در دشت مشهد واقع گردیده است، در راستای شمال شرقی- جنوب غربی به موازات رشته کوه های کپه داغ در شمال و بینالود در جنوب امتداد دارد. قدیمی ترین

وجود دارد. سازندهای دوران سوم زمین شناسی از کنگلومرا، ماسه سنگ، آگلومرا، توف و آندزیت تشکیل شده و در نقاط مختلف حوضه به ویژه در شمال شرق و جنوب رخمون دارند. رسوبات دوران چهارم که عمدتاً از آبرفت‌ها تشکیل شده است، آبخوان های آبرفتی، مخروط افکنه‌ها، رسوبات سیلابی و تراس ها را شکل داده اند.

مقدار بارندگی در محدوده حوضه از متوسط سالیانه ۳۰۸ میلی  
متر در ارتفاعات تا ۲۰۴ میلی متر در نواحی کم ارتفاع دشت

| عوامل تغذیه                                    |        | عوامل تخلیه              |       |
|------------------------------------------------|--------|--------------------------|-------|
| شرح                                            | مقدار  | شرح                      | مقدار |
| نفوذ بارندگی                                   | ۶۱/۴۵  | زهکشی آبخوان             | ناچیز |
| نفوذ از جریانات سطحی                           | ۱۳۰/۹  | تبخیر از سطح آبخوان      | ناچیز |
| نفوذ آب برگشتی کشاورزی و شرب                   | ۲۸۶/۶  | بهره‌برداری از آبخوان    | ۸۱۹/۶ |
| جبهه ورودی آب زیرزمینی                         | ۲۱۳/۴  | خروجی زیرزمینی از آبخوان | ۱/۵   |
| جمع                                            | ۶۹۲/۳۵ | جمع                      | ۸۲۱/۱ |
| تغییرات حجم ذخیره آبخوان در دوره بیلان: ۱۲۸/۷۵ |        |                          |       |

آبخوان آبرفتی دشت مشهد، آبخوانی آزاد، در بعضی بخش‌ها نشتی و چند لایه است. نقشه‌های هم پتانسیل آبخوان دشت مشهد نشان می‌دهد که جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شمال غرب به طرف جنوب شرق (در جهت شیب عمومی دشت) می‌باشد. جنس رسوبات نیز بر اساس محیط رسوبی از رسوبات متنوع محیط‌های رودخانه‌ای، مخروط افکنه‌ای و

[illegible]

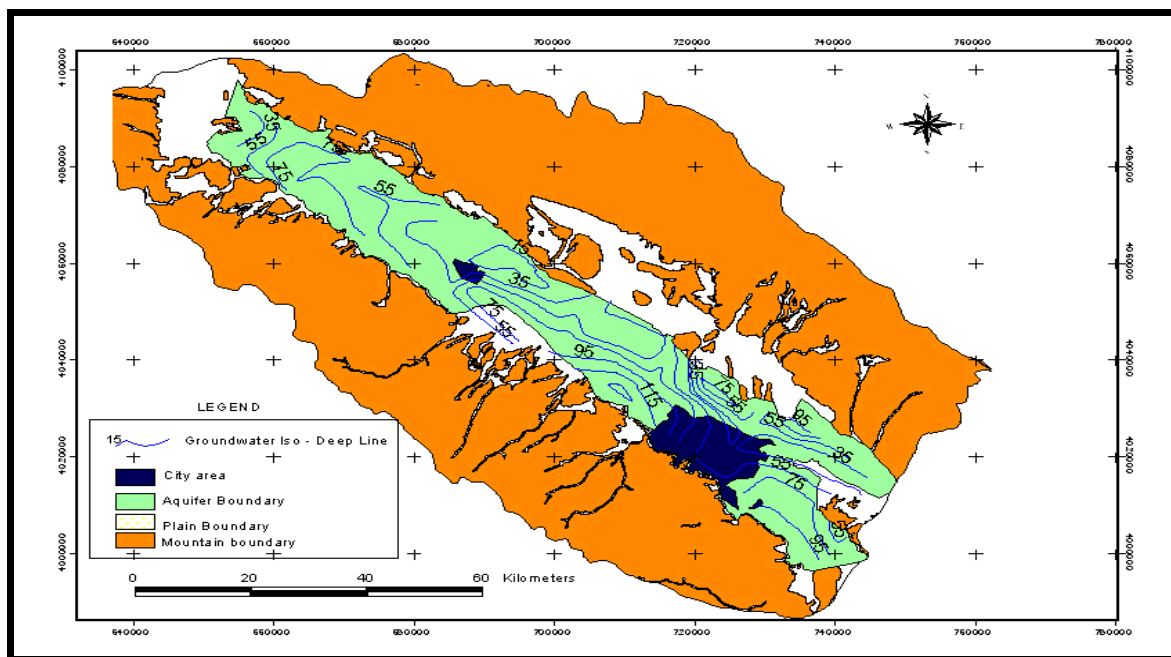
ضرایب هیدرودینامیک دشت مشهد بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته در جدول ۵ ارایه شده است. بر اساس جدول مذکور حداقل، متوسط و حداکثر ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره در محدوده دشت مشهد به ترتیب ۰/۰۱۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۰۰۱۷، ۰/۰۲ و ۰/۰۰۰۱۷ و ۰/۰۰۰۰۱۷ به دست آمده است.

جدول ۵- ضرایب هیدرودینامیک حاصل از آزمایش‌های پمپاژ در دشت مشهد

| ردیف | مختصات جغرافیایی (UTM) |         | T(m <sup>2</sup> /day) | S        | RT    |
|------|------------------------|---------|------------------------|----------|-------|
|      | X                      | Y       |                        |          |       |
| ۱    | ۶۸۷۰۰۰                 | ۴۰۵۸۱۰۰ | ۱۲۱۵                   | ۰/۰۰۱۱   | ۵۰۰۰  |
| ۲    | ۷۴۱۷۵۰                 | ۴۰۱۶۰۵۰ | ۲۶۸۱                   | ۰/۰۰۲    | ۶۳۰۰  |
| ۳    | ۷۲۷۷۰۰                 | ۴۰۱۳۲۰۰ | ۳۶۴                    | ۰/۰۰۱۳   | ۷۰۰۰  |
| ۴    | ۶۶۱۵۰۰                 | ۴۰۷۷۰۰۰ | ۸۳۴                    | ۰/۰۰۰۸۶  | ۱۵۰۰  |
| ۵    | ۷۱۵۵۵۰                 | ۴۰۳۷۸۰۰ | ۸۳۴                    | ۰/۰۰۰۱   | ۱۵۰۰۰ |
| ۶    | ۶۹۳۸۵۰                 | ۴۰۶۲۴۵۰ | ۴۵                     | ۰/۰۰۰۰۱۷ | ۲۰۰۰  |
| ۷    | ۶۹۸۲۵۰                 | ۴۰۵۶۷۵۰ | ۵۹۳                    | ۰/۰۰۰۷   | ۷۰۰۰  |
| ۸    | ۶۸۸۷۰۰                 | ۴۰۵۹۱۰۰ | ۱۶۲۴/۵                 | ۰/۰۰۴۴   | ۲۰۰۰  |
| ۹    | ۷۱۳۸۰۰                 | ۴۰۳۹۸۰۰ | ۱۹۳۳                   | ۰/۰۰۱    | ۱۵۰۰۰ |
| ۱۰   | ۷۰۵۷۵۰                 | ۴۰۵۵۳۰۰ | ۱۴۳۸                   | ۰/۰۰۶۴   | ۷۰۰۰  |

جهت عمومی جریان آب زیرزمینی عموماً از جهت جریان‌های سطحی و شیب توپوگرافی تبعیت می‌کند و راستای کلی شمال غربی به جنوب شرقی دارد. با توجه به نقشه هم پتانسیل آب زیرزمینی شهرپور ماه ۱۳۸۸، منحنی‌های هم پتانسیل در قسمت غرب دشت با تراز ۱۲۸۰ متر شروع شده و در منتهی الیه شرق دشت به تراز ۸۴۰ متر می‌رسد. به عبارت دیگر در فاصله حدود ۱۲۳ کیلومتر، تراز سطح ایستابی حدود ۴۴۰ متر

کاهش می‌یابد. نقشه ۱ نقشه هم پتانسیل آب زیرزمینی مربوط به شهریور ماه ۱۳۸۸ دشت مشهد را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه مذکور، عمق آب زیرزمینی در محدوده دشت مشهد از حداقل ۱۵ متر در حوالی شمال شرق و شرق تا حداکثر ۱۳۵ متر در محدوده چاه مشاهده ای تغذیه مصنوعی شاندریز در نوسان است.



نقشه ۱- توزیع و پراکندگی عمق آب زیرزمینی در محدوده آبخوان دشت مشهد (شهریورماه ۱۳۸۸)

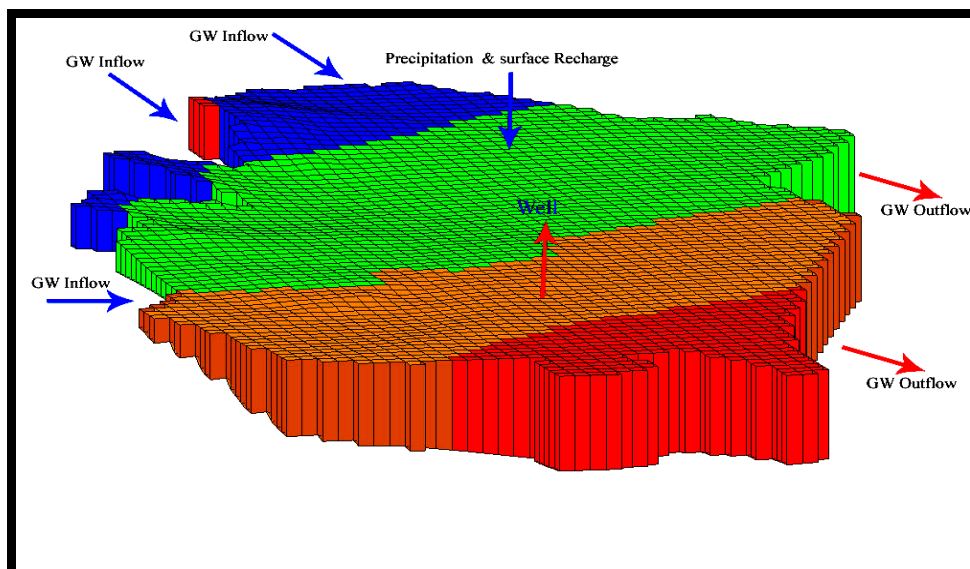
#### مواد و روش ها

##### مدل مفهومی آبخوان

به طور کلی مدل مفهومی با هدف ساده کردن شرایط واقعی مورد مطالعه و سازماندهی داده های صحرایی تهیه می شود تا به کمک آن سیستم آبخوان مورد مطالعه به طور شفاف تر مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

مدل ریاضی کمی و کیفی آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد با هدف شبیه سازی رفتار آبخوان و پیش بینی وضعیت کمی و

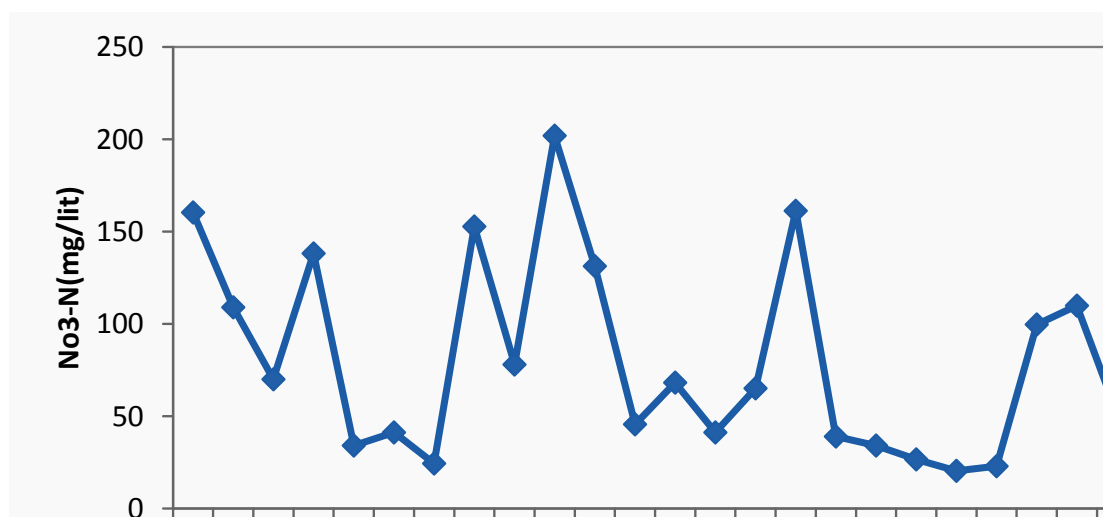
کیفی مواد آلاینده انجام گرفته است. بدین منظور منابع تغذیه و تخلیه، مرز محدوده مدل سازی، زون های تغذیه و تبخیر و تعرق و نیز استراتیگرافی آبخوان شهر مشهد و به عبارت دیگر کلیه عوامل و شرایط تاثیرگذار بر آبخوان مد نظر قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۴ ارایه شده است.



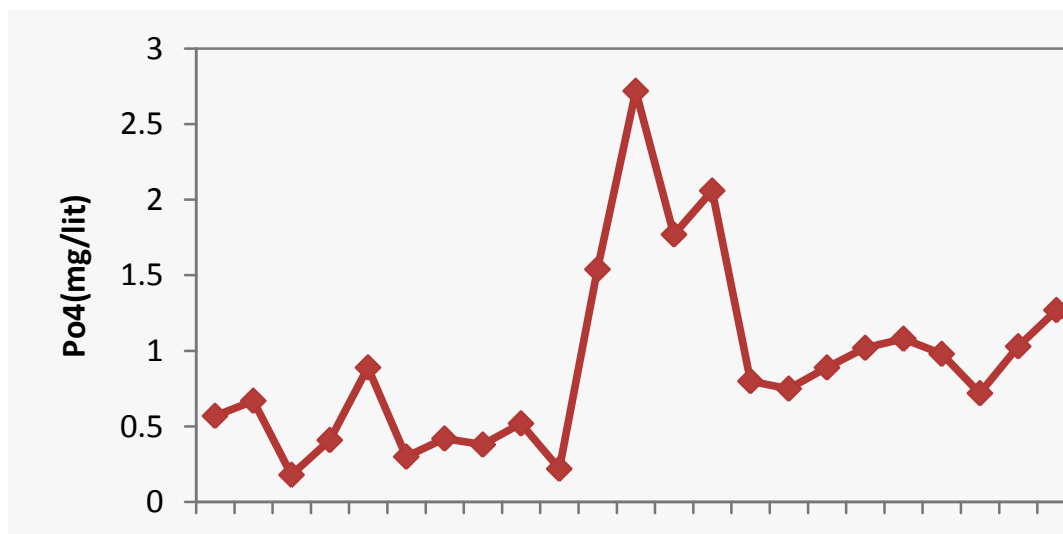
شکل ۴- مدل مفهومی آبخوان دشت مشهد

خانگی قرار دارد. به منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی در محدوده شهر مشهد، نسبت به نمونه برداری از تعداد ۳۰ حلقه چاه در محدوده شهر مشهد و انجام آزمایشات بر اساس روش بیان شده در کتاب (Standard Methods for, 1998), The Examination of Water and Wastewater اقدام گردید که نتایج آن در نمودارهای ۱ تا ۳ ارائه شده است.

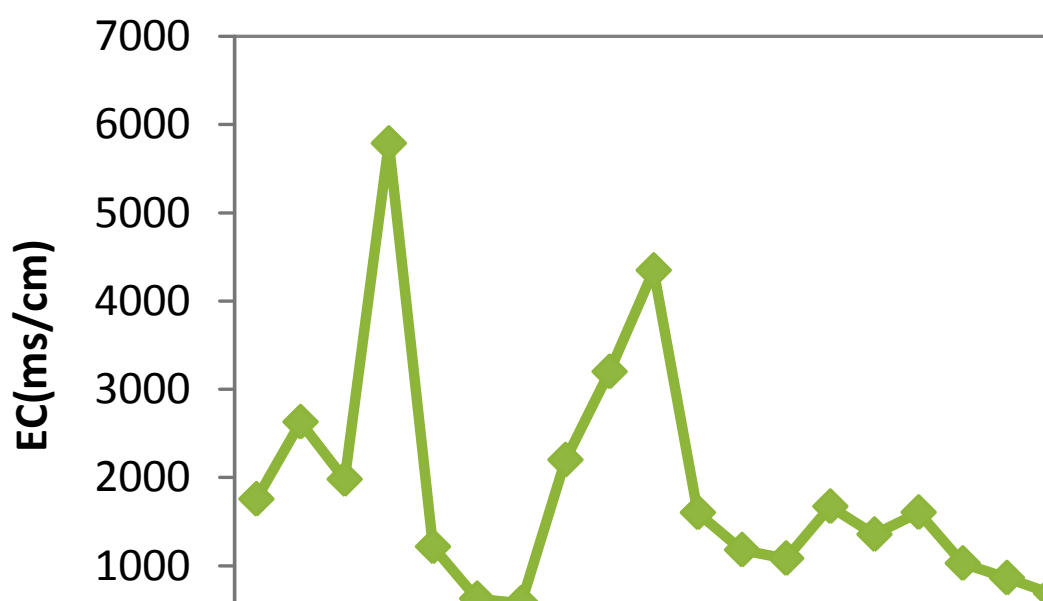
به طور کلی آب زیرزمینی در نواحی تغذیه معمولاً دارای کیفیت بهتر بوده و در نواحی خروجی به دلیل فعل و انفعالات و واکنش های درون آبخوان در طول حرکت آب به سمت پایین دست از کیفیت آن کاسته می شود. از دیدگاه آلودگی به وسیله مواد آلاینده، به طور کلی آبخوان دشت مشهد و بالطبع آب شهر مشهد تحت تاثیر سه نوع منشأ آلودگی کشاورزی، صنعتی و



نمودار ۱- میزان تغییرات غلظت نیترات در چاه های مورد آزمایش



نمودار ۲- میزان تغییرات غلظت فسفات در چاه های مورد آزمایش



نمودار ۳- میزان تغییرات EC در چاه های مورد آزمایش

#### - مدل جریان آبخوان

است. مدل Modflow از روش های سه بعدی اجزاء محدود برای جریان آب های زیرزمینی استفاده می نماید (۲۴). معادله کلی که در این مدل استفاده می گردد در معادله شماره (۱) ارائه شده است.

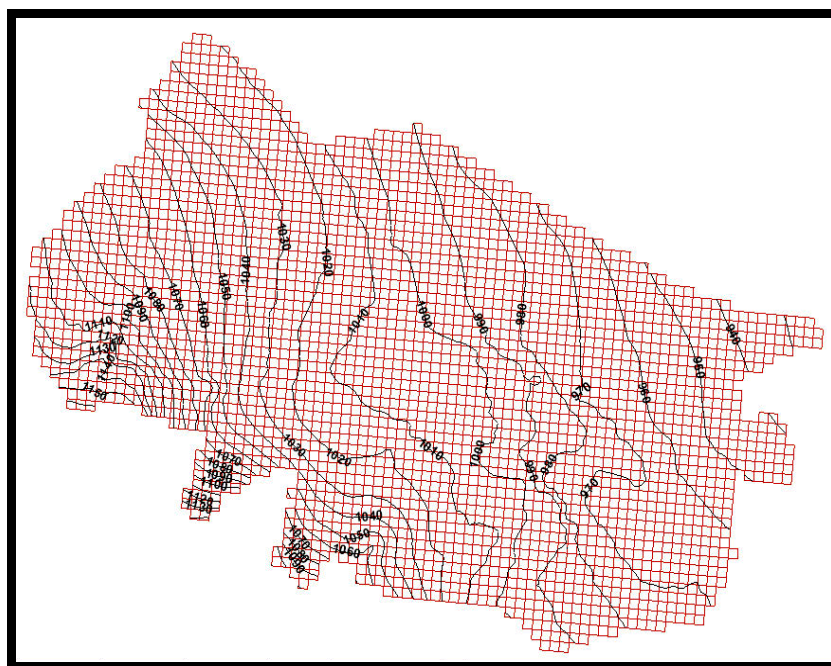
به منظور مدل سازی آبخوان دشت مشهد از کد کامپیوتری Modflow 2000 و پروسسور GMS استفاده شده است. مراحل طی شده جهت برپایی مدل جریان دشت مشهد شامل تعیین محدوده مدل سازی، شبکه بندی محدوده، تقسیم بندی مکانی و زمانی، تعریف مرزهای مدل و چگونگی تخصیص مقادیر پارامتری اولیه به گره های مختلف مدل بوده

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{معادله (۱)}$$

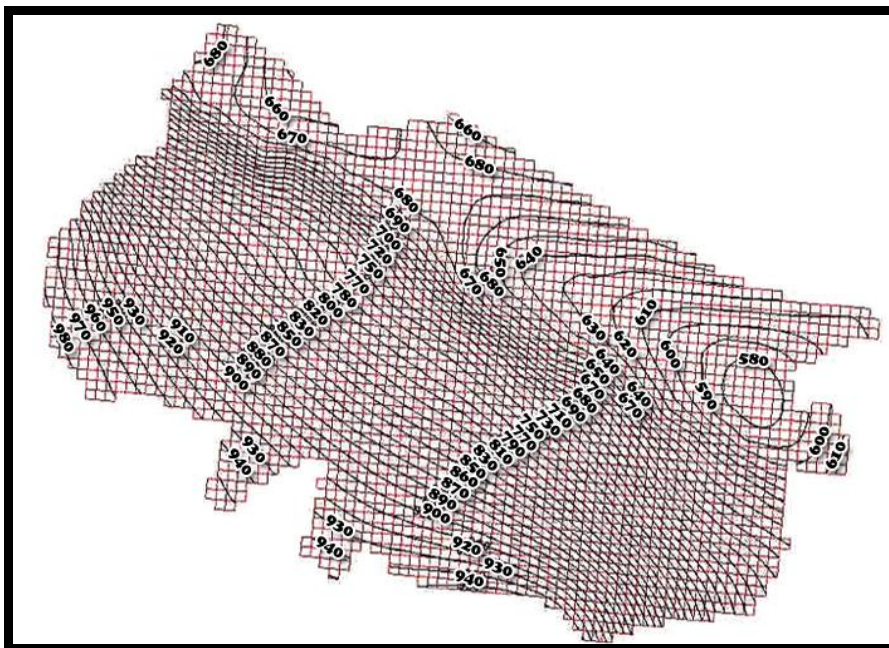
- یکی از عوامل مهم در چگونگی تعریف بازه‌های زمانی، کیفیت آمار و اطلاعات آبخوان است. در مطالعات حاضر با توجه به آمار و اطلاعات موجود، طول دوره‌های تنش شش‌ماه و گام‌های زمانی یک ماه انتخاب گردیده است. از طرفی با توجه به این که در اجرای مدل بررسی سطح زمین و کف محیط آبخوان دارای اهمیت می باشد، نقشه‌های مربوط به این پارامترها (نقشه‌های ۲ و ۳) نیز تهیه شدند.

در این معادله  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  به ترتیب میزان هدایت هیدرولیکی حول محورهای  $X$ ,  $Y$  و  $Z$  می باشد. هم چنین در این معادله میزان  $W$ ، میزان شار جریان (میزان منبع جریان)،  $h$ ، هد جریان آب زیرزمینی،  $S_s$ ، میزان ضریب ذخیره مواد آبخوان و  $t$  زمان می باشد (۲۵ و ۲۶). در ادامه و در خصوص مدل جریان آبخوان دشت مشهد موارد ذیل قابل اشاره می باشد:

- در شبکه بندی آبخوان دشت مشهد، با توجه به ابعاد آبخوان، اطلاعات موجود از آبخوان و اهداف مورد انتظار از مدل، وسعت هر سلول ۲۵۰ مترمربع در نظر گرفته شده است.  
- دوره تطابق و تصحیح مدل (Verification) در مورد مطالعات حاضر به محدوده ۸۸-۱۳۸۷ در نظر گرفته شده است.



نقشه ۲- توپوگرافی سطح زمین در محدوده آبخوان دشت مشهد



نقشه ۳- توپوگرافی سنگ کف در محدوده آبخوان دشت مشهد

#### - مرز و شبکه بندی آبخوان

با توجه به اهمیت محدوده شهر مشهد از لحاظ ایجاد آلودگی در آبخوان، در تحقیق حاضر، محدوده آبخوان شهر مشهد به عنوان محدوده مدل سازی و شبیه سازی در نظر گرفته شده است. هم چنین در مورد آبخوان شهر مشهد، با توجه به ابعاد آبخوان، اطلاعات موجود از آبخوان و اهداف مورد انتظار از مدل، وسعت هر سلول ۲۵۰ مترمربع در نظر گرفته شده است.

#### - دوره تطابق مدل

دوره تطابق و تصحیح مدل (Verification) دوره ای از گذشته آبخوان است که مدل با توجه به آمار و اطلاعاتی که از گذشته موجود است تصحیح و تنظیم می گردد. در مورد مطالعات حاضر دوره زمانی ۸۸-۱۳۸۷، به عنوان دوره تطابق مدل در نظر گرفته شده است.

#### - بازه های زمانی

به طور کلی بازه زمانی تعریف شده ای برای انتخاب طول گام زمانی و دوره تنش وجود ندارد و در واقع یکی از عوامل مهم در چگونگی تعریف بازه های زمانی، کیفیت آمار و اطلاعات آبخوان است، بدین معنی که اگر آمار و اطلاعات با ارزشی از آبخوان موجود نباشد انتخاب بازه زمانی کوچک (دوره تنش و گام

زمانی) هیچ گونه کمکی در افزایش دقت نتایج مدل نخواهد کرد. در مطالعات حاضر با توجه به آمار و اطلاعات موجود، طول دوره های تنش شش ماه و گام های زمانی یک ماه انتخاب گردیده است.

#### - نوع آبخوان

با توجه به نتایج مطالعات و کاوش های زیرسطحی (ژئوفیزیک و حفاری اکتشافی) آبخوان آبرفتی دشت مشهد و بالطبع آن محدوده شهری آبخوان، از نوع آزاد، در بعضی بخش ها نشتی و چند لایه است.

#### - شرایط مرزی مدل

با در نظر گرفتن شرایط مرزی حاکم بر آبخوان دشت مشهد، شرایط مرزی به صورت جریان وابسته به بار در نظر گرفته شده اند که میزان جریان عبوری از مرز، با توجه به دو پارامتر اختلاف بار هیدرولیکی و ضریب رسانایی مرز محاسبه گردیده است.

#### - واسنجی مدل

به طور کلی مدل سازی حالت پایدار برای به دست آوردن حدود کلی پارامترهای مختلف تهیه می شود. پارامترهای مذکور

مدل سازی در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه پارامتر ضریب ذخیره آبخوان حدود ۵ درصد در نظر گرفته شده است. جدول ۶ پارامترهای به کار رفته در حالت ناپایدار را نشان می دهد.

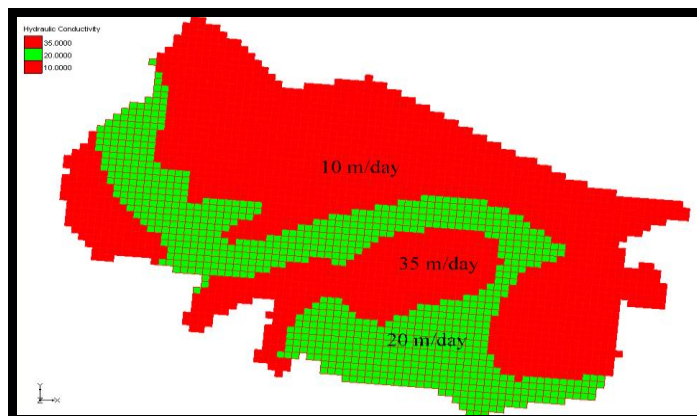
سپس در حالت ناپایدار که حالت واقعی آبخوان می باشد، مورد ارزیابی و تصحیح قرار می گیرند. لذا در ادامه داده های مربوط به مدل سازی حالت ناپایدار آبخوان شهری مشهد ارایه می شود. با توجه به آمار و داده های موجود، دوره زمانی سال آبی ۱۳۸۷-۸۸ به علت وجود داده های بهتر، به عنوان دوره ناپایدار

جدول ۶- پارامترهای به کاررفته در حالت ناپایدار

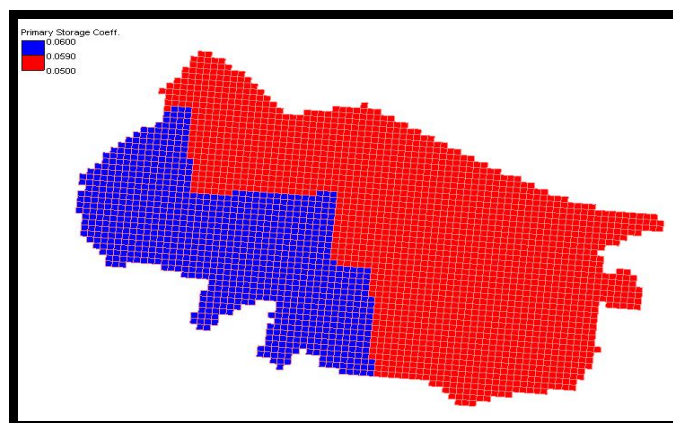
| نوع پارامتر                        | داده استفاده شده جهت تعریف پارامتر                                    |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| مرز هندسی محدوده مطالعات           | مرز محدوده شهری مشهد                                                  |
| توپوگرافی سطح زمین و سنگ کف        | داده های نقشه ۱:۲۵۰۰۰ توپوگرافی و داده های ژئوفیزیک و چاه های اکتشافی |
| مساحت شبکه مدل                     | ۲۵۰ متر مربع                                                          |
| بازه زمانی مدل سازی                | سال آبی ۱۳۸۷-۸۸                                                       |
| طول دوره تنش و گام زمانی (ماه)     | ۶ و ۱                                                                 |
| نوع آبخوان                         | آزاد                                                                  |
| شرایط مرزی اعمال شده در مرزهای مدل | مرز جریان وابسته به بار (GHB)                                         |
| نقاط کنترل سطح آب زیرزمینی         | ۸ حلقه چاه های مشاهده ای                                              |
| ضریب ذخیره اولیه آبخوان            | ۵ درصد                                                                |
| بارندگی                            | داده های بارندگی سال آبی ۱۳۸۷-۸۸                                      |
| جریانات سطحی محدوده                | داده های موجود رواناب                                                 |
| جریان زیرزمینی ورودی و خروجی       | بیان کلی آب زیرزمینی آبخوان                                           |
| منابع آب زیرزمینی                  | مقدار برداشت از منابع آب با ضریب برگشت ۲۵ درصد و ۸۰ درصد              |

مدل در حالت ناپایدار ازداده های مربوط به چاه های مشاهده ای استفاده گردید. نقشه ۶ منحنی های هم پتانسیل اولیه و شبیه سازی شده توسط مدل را نشان می دهد.

نقشه های ۴ و ۵ به ترتیب مقدار و توزیع ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را در محدوده آبخوان نشان می دهد. با توجه به داده های جدول ۶ و پس از برپایی مدل، واسنجی و اجرای مدل در حالت ناپایدار تا دستیابی به نتایج قابل قبول به انجام رسید. هم چنین به منظور کنترل واسنجی



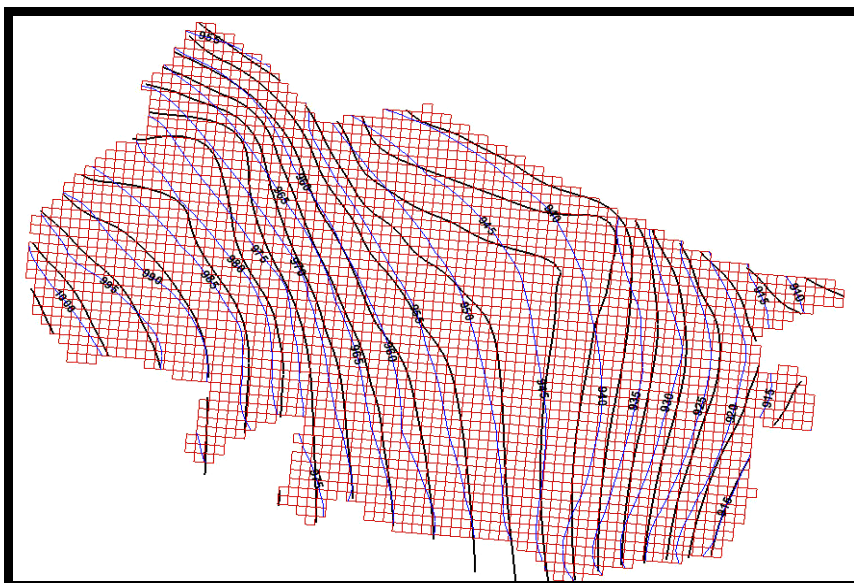
نقشه ۴- هدایت هیدرولیکی کالیبره شده برای محدوده آبخوان شهری مشهد



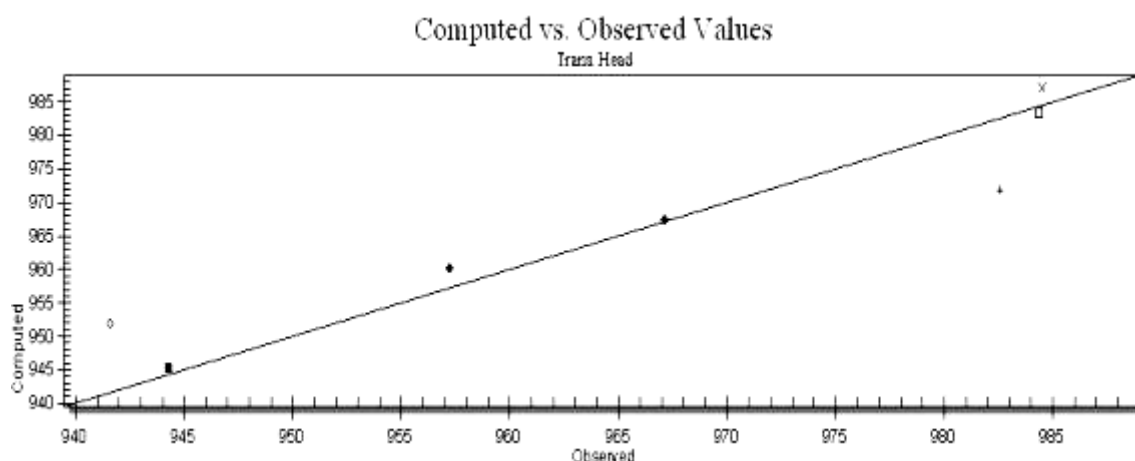
نقشه ۵- ضریب ذخیره کالیبره شده آبخوان شهری مشهد

همچنین در شکل ۵ مقادیر سطح آب شبیه سازی شده و سطح

آب قرائت شده در محل چاه های مشاهده ای ارایه شده است.



نقشه ۶- منحنی های هم پتانسیل شبیه سازی شده (آبی) و منحنی های اولیه سطح آب زیرزمینی (مشکی)  
( گام زمانی دوازدهم - دوره تنش دوم)

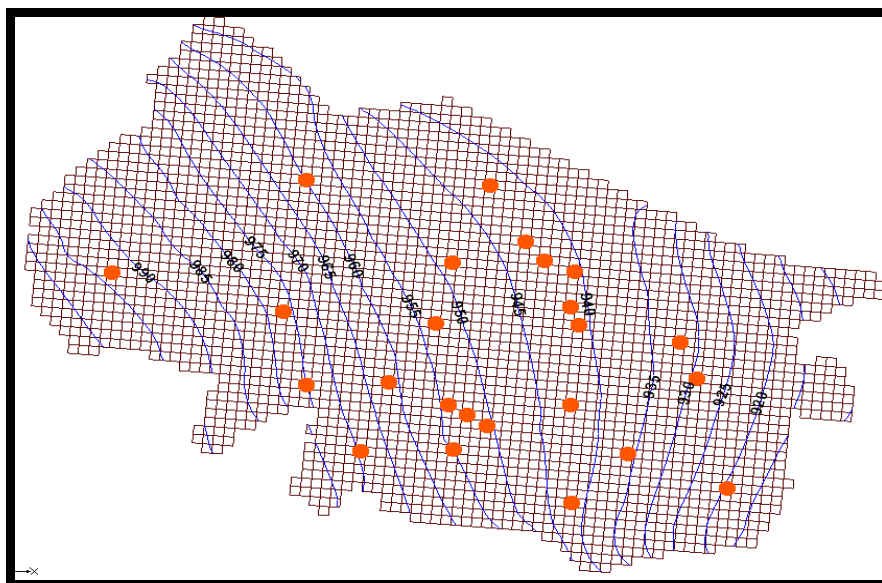


شکل ۵- اسکاتر دیاگرام سطح آب مشاهده شده و شبیه سازی شده در محل چاه های مشاهده ای  
آبخوان شهری مشهد ( گام زمانی دوازدهم - دوره تنش دوم)

#### - پیش بینی مدل کمی

اثرات اجرای هر کدام از آن ها را بر آبخوان مورد ارزیابی قرار داد. پیش بینی مدل کمی آبخوان دشت مشهد با فرض ادامه شرایط حاکم بر آبخوان و برای مدت ۱۲ سال (تا سال ۱۴۰۰ شمسی) انجام گرفته است. شکل ۶ مقادیر هم پتانسیل سطح آب زیرزمینی را برای بخش های مختلف آبخوان دشت مشهد در سال ۱۴۰۰ شمسی نشان می دهد.

به طور کلی یکی از مزایای مطالعات مدل سازی نسبت به سایر مطالعات آب های زیرزمینی، توانایی پیش بینی وضعیت آینده آبخوان است. در مطالعات مدل سازی در واقع بعد از صحت سنجی مدل و رسیدن به حد دقت مورد انتظار، نتیجه کار تولید یک سیستم مشابه آبخوان است که می توان با اعمال سیاست های مدیریتی مختلف در آینده آبخوان به این سیستم،



شکل ۶- منحنی های هم پتانسیل پیش بینی شده سطح آب زیرزمینی در سال ۱۴۰۰ شمسی

#### کالیبراسیون و صحت سنجی مدل

با توجه به آمار و داده های موجود و دوره زمانی مدل کمی، مدل کیفی نیز برای بازه زمانی مذکور تهیه شده و پارامترهای مختلف کیفی مورد صحت سنجی قرار گرفت. به منظور انجام کالیبراسیون مدل از داده های مربوط به ۵ سال اخیر آبخوان دشت مشهد و به منظور صحت سنجی مدل، داده های مربوط به یک سال اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل سازی کیفی آبخوان عموماً پارامترهایی که بر فرآیند پخش مؤثر می باشند همانند ضریب جذب، طول پخش، نسبت های پخش

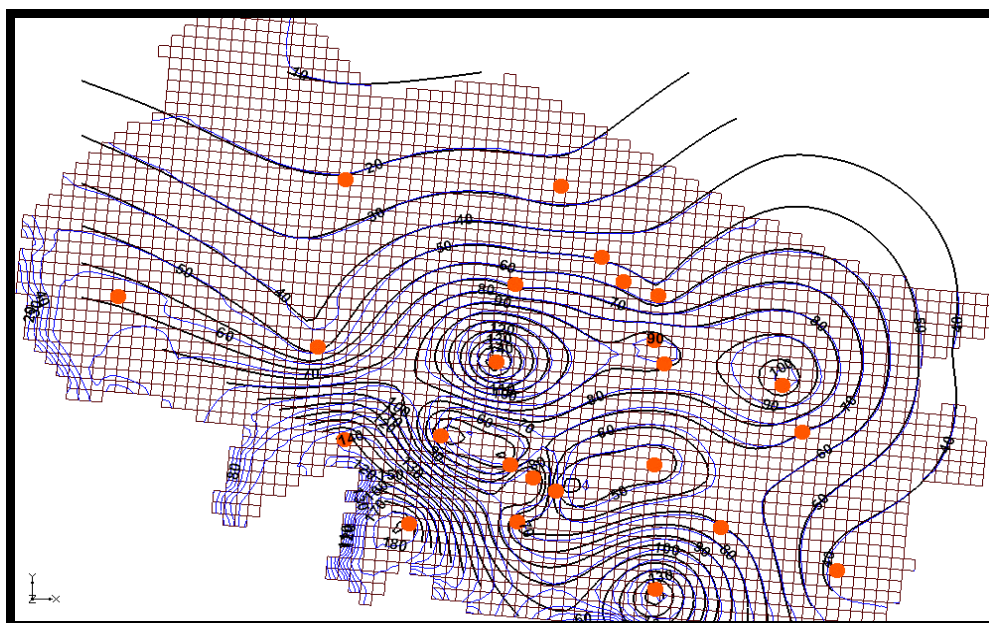
افقی به طول پخش و پخش عمودی به طول پخش، واسنجی می شوند. این پارامترها اصولاً باید از مطالعات آزمایشگاهی به دست آیند اما در مطالعات حاضر به علت عدم وجود اطلاعات آزمایشگاهی، پارامترهای کیفی آبخوان با توجه به مدل های موجود از آبخوان تعیین و در روند مدل سازی کیفی واسنجی گردید. پارامترهای واسنجی شده مدل کیفی در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- پارامترهای کیفی واسنجی شده محدوده آبخوان شهری مشهد

|        |                                      |               |                                      |
|--------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| ۰      | EMDC(ضریب پخش مولکولی مؤثر)          | ۱             | Rt to Ld (نسبت پخش افقی به طول پخش)  |
| ۵۰     | Longitudinal Dispersivity (پخش طولی) | ۰/۱           | Rv to Ld (نسبت پخش عمودی به طول پخش) |
| ۰/۰۰۰۱ |                                      | Kd (ضریب جذب) |                                      |

در ادامه کار جهت کنترل روند واسنجی مدل کیفی از مقایسه منحنی های اولیه و منحنی های شبیه سازی شده پارامتر آلودگی (نیترات) استفاده شده است. مقایسه

منحنی های مذکور در شکل ۷ مشخص شده است. ملاحظه می شود که برای بیشتر بخش های آبخوان با توجه به سطح داده های موجود تطابق قابل قبولی حاصل شده است.



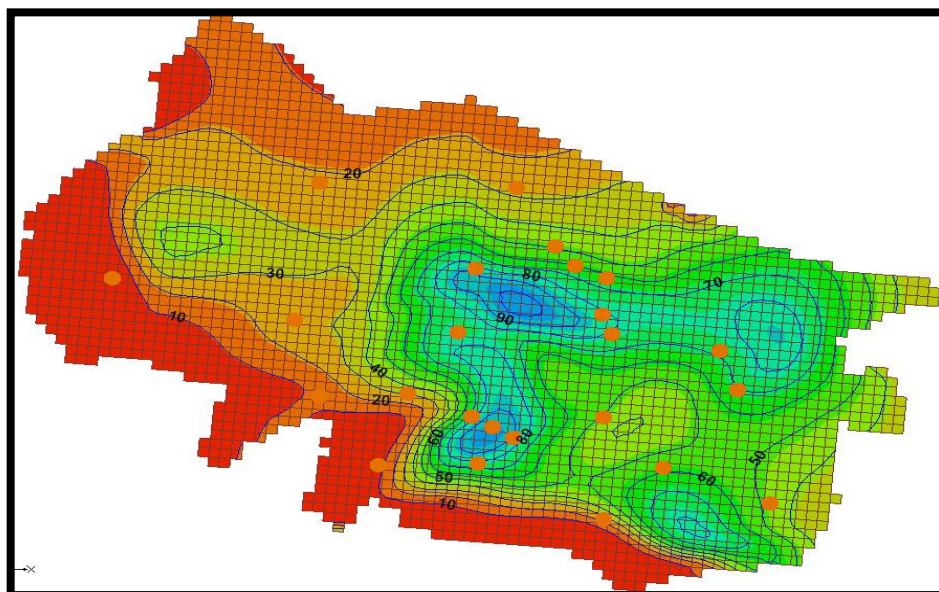
شکل ۷- منحنی های شبیه سازی شده (آبی) و مقادیر اولیه (سیاه) نیترات در محدوده آبخوان

#### – مدل کیفی آبخوان

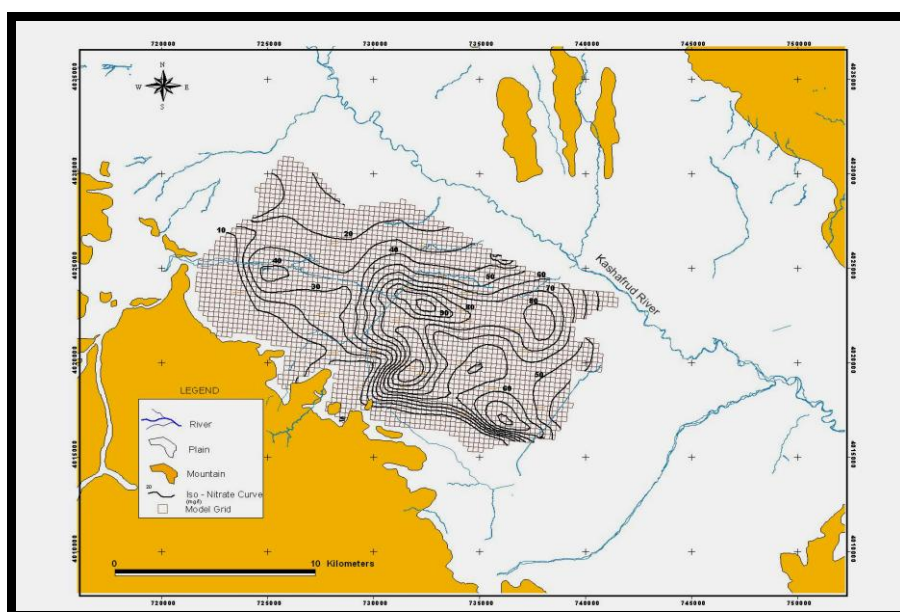
مدل کیفی آب های زیر زمینی در واقع فرم ریاضی معادلات بیلان و حرکت و انتقال مواد محلول در محیط آب زیر زمینی را نشان می دهد که با تطبیق آن ها و با فرض پیوستگی محیط، معادلاتی به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی نتیجه می شود.

شایان ذکر می باشد مدل کیفی شامل نوشتن یک برنامه، کد کامپیوتری و یا انتخاب کد نرم افزاری مناسب می باشد. کدی که در این تحقیق استفاده شده است، MT3D است. از سویی دیگر با توجه به آمار و اطلاعات موجود و در دسترس و نیز درجه اهمیت آلاینده های منابع آب های زیرزمینی به یون نیترات، سعی شده است در این تحقیق مدل کیفی آبخوان دشت مشهد با تکیه بر یون نیترات تهیه و تجزیه و تحلیل شود.

با توجه به مطالب فوق الذکر پیش بینی شرایط آینده کیفی آبخوان یکی از اهداف مدل سازی آبخوان دشت مشهد بوده که با توجه به ادامه شرایط موجود انجام گرفته است. در مورد آبخوان دشت مشهد و با توجه به داده های موجود در مورد مقدار و الگوی توزیع نیترات در محدوده شهرمشهد، مدت زمان پیش بینی برای حدود ۱۲ سال و تا سال ۱۴۰۰ شمسی انجام گرفته است. شکل ۸ مقدار و الگوی توزیع نیترات در دشت مشهد را در سال ۱۴۰۰ شمسی نشان می دهد. با توجه به نتایج مدل ملاحظه می شود که گرچه غلظت نیترات در محدوده های جنوب و جنوب غرب و تا حدی غرب دشت کاهش می یابد ولی غلظت این آلاینده در بیشتر نواحی شرقی و تا حدی مرکزی دشت هنوز از مقدار مجاز بیشتر می باشد.



شکل ۸- الگوی پیش بینی شده آلاینده نیترات در محدوده آبخوان شهری مشهد



نقشه ۸- محدوده شهری مشهد و الگوی پیش بینی شده آلاینده نیترات در محدوده آبخوان شهری مشهد

#### - بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق نیز سعی شده است تا با تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان دشت مشهد، رفتار آبخوان با تکیه بر یون نیترات برای ۱۲ سال آینده شبیه سازی و پیش بینی گردد. به منظور تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان شهر مشهد، آمار و اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی با استفاده از نرم افزار Surfer Ver.8، کد کامپیوتری

در حال حاضر به علت عدم اجرای مدیریت صحیح، بیشتر آبخوان های کشور به خصوص در نواحی خشک از جمله دشت مشهد در طی سال های اخیر با افت سطح ایستابی و کاهش حجم ذخیره مواجه بوده و بعضاً نیز در معرض آلودگی انواع آلاینده ها قرار دارند. با توجه به این که یکی از شاخص های اصلی آلوده بودن آبخوان ها، آلودگی آن ها به نیترات می باشد،

- geographical information system.” J. Environment International. (29), 1009–1017.
2. Thirumalaivasan, D., Karmegam, M., Venugopal, K., (2003). “AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS.” J.Environmental Modelling and Software 18 (7), 645–656.
  3. Joosten, L.T.A., Buijze, S.T., Jansen, D.M., (1998). “Nitrate in sources of drinking water? Dutch drinking water companies aim at prevention.” J.Environmental Pollution (102), 487–492.
  4. Lewis, K.A., Bardon, K.S., (1998). “A computer-based informal environmental management system for agriculture.” J. Environmental Modelling and Software 13(2), 123–137.
  5. Lubna Hajhamad, Mohammad N. Almasri, (2009).” Assessment of nitrate contamination of groundwater using lumped-parameter models.” J.Environmental Modelling & Software (24), 1073–1087.
  6. De Santa Olalla, F.M., Dominguez, A., Ortega, F., Artigao, A., Fabeiro, C., (2007).”Bayesian networks in planning a large aquifer in Eastern Mancha, Spain. Environmental Modelling and Software” 22 (8), 1089–1100.
  7. Tait, N.G., Davison, R.M., Leharne, S.A., Lerner, D.N., (2008). “Borehole

Modflow 2000 و پروسسور GMS مورد تحلیل قرار گرفت و پس از انجام عملیات واسنجی<sup>۱</sup> و صحت سنجی<sup>۲</sup> مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان دشت مشهد به دست آمد.

نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که در حال حاضر میزان غلظت نیترات در بخش هایی از دشت مشهد فراتر از حد استاندارد می باشد. با توجه به این موضوع، میزان غلظت نیترات در ۱۲ سال آینده در آبخوان شهری این دشت از ۱۰ تا ۹۰ میلی گرم در لیتر تغییر خواهد نمود. بر این اساس، اکثر مناطق این آبخوان دارای میزان نیترات حدود ۴۵ میلی گرم در لیتر خواهد بود.

نتایج دیگر تحقیق نشان دهنده این موضوع است که بیشترین میزان غلظت نیترات در محدوده های مرکزی و جنوبی آبخوان شهر مشهد می باشد. دلیل این امر بالابودن میزان تراکم جمعیت شهر در این مناطق و استفاده از چاه های جاذب برای دفع فاضلاب می باشد. لذا پیشنهاد می گردد با توجه به این که میزان جمعیت ساکن و متحرک شهر مشهد (به دلیل زیارتی بودن شهر) سالیانه در حال افزایش می باشد و از سویی با توجه به بحرانی بودن دشت مشهد و عدم امکان تامین منابع آبی جدید برای نیازهای این شهر، از روند افزایش آلودگی منابع آب به خصوص منابع آب زیرزمینی جلوگیری به عمل آید. از نتایج تحقیق حاضر و بررسی محدوده مطالعات می توان پیشنهاد نمود که می بایستی در مدت زمان کوتاهی نسبت به احداث و تکمیل شبکه های جمع آوری فاضلاب و تصفیه فاضلاب های ورودی به آن اقدام گردد.

#### منابع

1. Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Terao, H., Kato, K., Ohta, K., (2003). “Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using

1- Calibration  
2- Verification

- Environmental Modelling and Software 20 (7), 851–871.
13. Mao, X., Prommer, H., Barry, D.A., Langevin, C.D., Panteleit, B., Li, L., (2006). "Three dimensional model for multi-component reactive transport with variable density groundwater flow." J. Environmental Modelling and Software 21 (5), 615–628.
  14. Lee, Y.W., Dahab, M.F., Bogardi, I., (1991). "Nitrate risk management under uncertainty." J. Water Resources Planning and Management .118 (2), 151–165.
  15. Wolfe, A.H., Patz, J.A., (2002). "Reactive nitrogen and human health: acute and longterm implications." J. Ambio 31 (2), 120–125.
  16. U.S. Environmental Protection Agency, (2000). Drinking Water Standards and Health Advisories. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 822-B-00-001, 12 pp.
  17. Stournaras, G., (1998). "Groundwater and nitrates in Greece – an overview". J. Environmental Hydrology (6), 4–13
  18. Mitchell, R.J., Babcock, R.S., Gelinas, S., Nanus, L., Stansey, E., (2003). "Nitrate distribution and sources identification in the Abbotsford-Sumas aquifer, Northwestern Washington State." J. Environmental Quality (32), 789–800.
  19. Santhi, C., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Williams, J.R., (2006). "A modeling approach to evaluate the Optimisation System (BOS) – a case study assessing options for abstraction of urban groundwater in Nottingham, UK." J. Environmental Modelling and Software 23 (5), 611–621.
  8. Ataie-Ashtiani, B., (2007). "MODSharp: regional-scale numerical model for quantifying groundwater flux and contaminant discharge into the coastal zone." J. Environmental Modelling and Software 22 (9), 1307–1315.
  9. Konikow, L.F., Person, M., (1985). "Assessment of long-term salinity changes in an irrigated stream-aquifer system." J. Water Resources Research 21 (11), 1611–1624.
  10. Shamrukh, M., Corapcioglu, M.Y., Hassona, F.A.A., (2001). "Modeling the effect of chemical fertilizers on ground water quality in the Nile Valley Aquifer, Egypt." J. Ground Water 39 (1), 59–67.
  11. Wolf, J., Beusen, A.H.W., Groenendijk, P., Kroon, T., Rötter, R., van Zeijts, H., (2003). "The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emissions from agriculture in the Netherlands." J. Environmental Modelling and Software 18 (7), 597–617.
  12. Almasri, M.N., Kaluarachchi, J.J., (2005). "Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data." J.

- Wesseling. (2009). Linking external components to a spatio-temporal modelling framework: Coupling MODFLOW and PCRaster Environmental Modelling & Software .1–12.
24. Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., McDonald, M., (2000). "MODFLOW-2000, the US Geological Survey Modular Ground-Water Model" – User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey.
25. Laura K. Lautz, Donald I. Siegel,. (2005). "Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D."
26. Benenson, I., Torrens, P.M,. (2004). Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena. Wiley, Chichester.
- impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas."J. Environmental Modelling and Software 21 (8), 1141–1157.
20. Wong, H., Ip, W.C., Zhang, R.Q., Xia, J,. (2007)." Non-parametric time series models for hydrological forecasting." J. Hydrology 332 (3–4), 337–347.
- Mee-Sun Lee, Kang-Kun Lee, Yunjung Hyun, T. Prabhakar Clement and David Hamilton, (2006).
21. Nitrogen transformation and transport modeling in groundwater aquifers. Ecological Modelling Volume 192, Issues 1-2, Pages 143-159.
22. Lubna Hajhamad, Mohammad N. Almasri. (2009). Assessment of nitrate contamination of groundwater using lumped-parameter models.
23. O. Schmitz [a,\\*](#), D. Karssenberg [a](#), W.P.A. van Deursen [b](#), C.G.