

# مبانی مدلسازی کمی و کیفی آب های زیرزمینی

نویسندگان:

مهندس ایمان گلچین

مهندس نیما قصری

|                     |   |                                                                             |
|---------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | : | گلچین، ایمان، ۱۳۶۵                                                          |
| عنوان و نام پدیدآور | : | مبانی مدلسازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی، نویسندگان ایمان گلچین، نیما قسری. |
| مشخصات ناشر         | : | تهران: سیمین، ۱۳۹۱.                                                         |
| مشخصات ظاهری        | : | ۱۲۸ ص. جنول، نمودار.                                                        |
| شابک                | : | ۹۷۸-۶۰۰-۶۲۴۵-۰۴-۱                                                           |
| وضعیت فهرست‌نویسی   | : | فیا                                                                         |
| موضوع               | : | آب‌های زیرزمینی - الگوهای ریاضی                                             |
| سندبه افزوده        | : | قسری، نیما ۱۳۶۲.                                                            |
| رده‌بندی کنگره      | : | ۱۳۹۱، ۲۰، ۵۸/۱۷۶ TC                                                         |
| رده‌بندی دیویی      | : | ۵۵۱/۴۹۰۱۵۱۱۸                                                                |
| شماره کتاب شناس ملی | : | ۲۹۶۳۵۹۰                                                                     |



انتشارات سیمین

مبانی مدلسازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی

مهندس ایمان گلچین، مهندس نیما قسری

ناشر: انتشارات سیمین

چاپ و صحافی: سیمین ۶۶۵۶۵-۶۹

نوبت چاپ: اول، ۱۳۹۱

تیراژ: ۵۰۰ نسخه

قیمت: ۸۵۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۲۴۵-۰۱-۰۰

تهران، خ کارگر جنوبی، لبافی‌نژاد غربی، بن‌پست دوم جنوبی، پلاک ۲۹۰

تلفن: ۶۶۴۳۳۷۲۳-۶۶۵۶۵۰۶۹

فکس: ۶۶۴۳۳۵۸۷

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

## فهرست

| عنوان                                                | صفحه |
|------------------------------------------------------|------|
| مقدمه                                                | ۷    |
| اهداف                                                | ۸    |
| تعریف مدل                                            | ۹    |
| تاریخچه مدل‌های آب زیرزمینی در ایران                 | ۱۰   |
| کاربرد مدل                                           | ۱۳   |
| فصل ۱: مدل ریاضی جریان آب های زیرزمینی               | ۱۷   |
| مبانی مدل سازی جریان آب‌های زیرزمینی (مدل کمی)       | ۱۹   |
| اطلاعات مورد نیاز در مطالعات مدل ریاضی آب زیرزمینی   | ۲۰   |
| داده های منابع آب- هواشناسی                          | ۲۱   |
| انواع مدل‌های آب‌های زیرزمینی                        | ۲۶   |
| مقایسه روش های عناصر محدود (FEM) و تفاضل محدود (FDM) | ۳۷   |
| فرآیند ساخت و توسعه مدل آب‌های زیرزمینی              | ۳۸   |
| تعیین شدت                                            | ۳۸   |
| تهیه مدل مفهومی                                      | ۳۸   |
| انتخاب معادلات حاکم و کد رایانه‌ای                   | ۳۹   |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| طراحی مدل عددی .....                                          | ۴۳  |
| واسنجی .....                                                  | ۵۱  |
| صحت سنجی .....                                                | ۵۸  |
| تحلیل حساسیت .....                                            | ۵۸  |
| خطاهای محاسباتی .....                                         | ۵۹  |
| <b>فصل ۲: مدل ریاضی کیفی آب‌های زیرزمینی</b> .....            | ۶۱  |
| مبانی مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی .....                     |     |
| انواع آلودگی .....                                            | ۶۳  |
| پدیده انتقال املاح و معادلات پایه کیفیت آب‌های زیرزمینی ..... | ۶۷  |
| اهداف مدل‌سازی کیفی آبخوان .....                              | ۷۹  |
| فرآیند مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی .....                    | ۸۱  |
| تهیه مدل مفهومی .....                                         | ۸۵  |
| پیش‌پردازش و پس‌پردازش .....                                  | ۹۰  |
| حل عددی معادلات انتقال و پخش آلودگی در آبخوان .....           | ۹۲  |
| انتخاب مدل عددی و نرم‌افزار مناسب برای آبخوان .....           | ۹۹  |
| طراحی مدل عددی .....                                          | ۱۰۳ |
| واسنجی .....                                                  | ۱۱۳ |
| صحت سنجی .....                                                | ۱۱۸ |
| تحلیل حساسیت .....                                            | ۱۱۸ |
| استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) .....               | ۱۱۸ |
| کاربرد مدل کیفی در مدیریت آبخوان .....                        | ۱۲۲ |
| مراجع .....                                                   | ۱۲۵ |

## مقدمه

در سال‌های اخیر تهیه مدل آب‌های زیرزمینی به صورت بخش عمده تعداد زیادی از پروژه‌های مربوط به بهره‌برداری، حفاظت و پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی درآمده است. با ادامه پیشرفت سخت افزاری و نرم‌افزاری رایانه و تهیه سهل‌تر آن‌ها نقش مدل‌ها در علوم مهندسی و زمین، نظیر مهندسی آب و هیدروژئولوژی نیز، افزایش می‌یابد. اما ضروری است که هر نوع مدل آب‌های زیرزمینی تفسیر شود و به طور مناسب مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت‌های مدل نیز باید درک شود. مدل‌های آب‌های زیرزمینی در صورتی که درست ساخته شوند به عنوان یک ابزار پیش‌بینی کننده ارزشمند در حفاظت و مدیریت منابع آب زیرزمینی به کار می‌رود. البته کاملاً مشخص است که اعتبار پیش‌بینی انجام شده با استفاده از مدل آب‌های زیرزمینی بستگی به این دارد که مدل تا چه اندازه قادر است شرایط صحرائی را شبیه‌سازی کند. زیرا فرضیات و ساده سازی‌هایی در معادلات ریاضی مدل آ‌های زیرزمینی و نیز عدم قطعیت‌هایی در مقادیر داده‌های مورد نیاز مدل وجود دارد. یک مدل باید به عنوان یک تقریب و نه یک نسخه دوم از شرایط واقعی در نظر گرفته شود. مدل‌های آب‌های زیرزمینی، حتی به صورت تقریب، یک ابزار تحقیقی مفید می‌باشند که به منظور کاربردهای متعددی از آن‌ها ممکن است استفاده شود. تعدادی از این کاربردها عبارتند از :

## ۸ + مبانی مدل‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی

- ارزیابی و بررسی تأثیر منابع سطحی آب زیرزمینی، رودخانه، دریاچه و غیره بر روی منابع آب زیرزمینی،
  - پیدا کردن مسیرهای ممکن حرکت آلاینده‌های آب زیرزمینی،
  - طراحی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای،
  - ارزیابی تأثیر برداشت آب زیرزمینی بر روی سطح آب و تعیین میزان افت،
  - پیش‌بینی امکان آلودگی و مهاجرت آلاینده‌ها به منظور ارزیابی خطرات آن،
  - شناسایی منطقه مورد نیاز برای حفاظت از چاه‌های بهره‌برداری.
- بسته به شرایط و ویژگی‌های سیستم آب زیرزمینی ممکن است کاربردهای بسیار متعددی برای مدل‌های آب زیرزمینی وجود داشته باشد.

### اهداف

- اهداف عمومی از تهیه مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی عبارتند از :
- ارتقای دانش هیدروژئولوژیک (تولید داده)،
  - شبیه‌سازی آبخوان (ارزیابی رفتار کمی و کیفی آبخوان)،
  - طراحی راه‌حل‌های کاربردی برای رسیدن به اهداف خاص (طراحی مهندسی)،
  - مدیریت منابع (ارزیابی سیاست‌های موجود)،
  - پیش‌بینی اثرات گزینه‌های هیدروژئولوژیکی یا طرح‌های توسعه‌ای (برای کمک در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی)،
  - آنالیزهای حساسیت و عدم قطعیت (به منظور راهنمایی در گردآوری داده‌ها و تصمیم‌گیری و خطرپذیری).
- می‌توان گفت به طور کلی فعالیت‌های مدل‌سازی آب زیرزمینی به دو منظور انجام می‌گردد:

- الف) پیش‌بینی (Prediction)، که وضعیت آینده آبخوان را پیش‌بینی می‌نماید.
- ب) تفسیر سامانه (Interpretation)، که به مواردی همچون تعیین مرزهای آبخوان، میزان آب موجود در سامانه، میزان نفوذ و غیره، می‌پردازد.

## تعریف مدل

مدل به مفهوم نمایش یک پدیده حقیقی و یا نمایش مادی یک پدیده است که هدف آن واضح ساختن رفتار پدیده حقیقی تحت شرایط خاص می باشد. در مبحث آب های زیرزمینی، مدل توسط محققین به صورت های مختلف تعریف شده است که تمام تعاریف در مفهوم مشابه می باشند.

مراکز مختلف تعاریف مختلفی را از مدل ارائه نموده اند که تعدادی از آن ها عبارتند از:

- مدل آب های زیرزمینی عبارت است از یک تفسیر غیر منحصر به فرد، ساده شده و ریاضی از یک سیستم آب زیرزمینی موجود که کمیت های سیستم را توأم با یک زبان برنامه نویسی به صورت یک نرم افزار رایانه ای قانونمند درآورده است. این مجموعه باید قابلیت، شبیه سازی شرایط مرزی، پارامترهای سیستم و استرس های وارد بر سیستم را دارا باشد.

- مدل یک بیان و تفسیر ساده شده از یک سیستم فیزیکی است.

- مدل جریان آب های زیرزمینی کاربردی از یک مدل ریاضی برای نمایش یک سیستم جریان در یک محدوده مشخص است.

- مدل ریاضی نسخه ای است المثنی از قسمتی از یک سیستم یا موضوع در جهان واقعی.

- مدل عبارت است از روایتی ساده شده از یک سیستم واقعی در این جا آب های زیرزمینی) که قادر باشد به طور تقریبی پاسخ تحریکات اعمال شده به سیستم را در ارتباط با آینده شبیه سازی کند. ساده سازی واقعیت در ابتدا در شکل بعدی فرضیات که بیان کننده درک ما از طبیعت حاکم بر سیستم و رفتار آن می باشد، شروع می شود. برخی از عواملی که در ارتباط با این فرضیات می باشند عبارتند از: هندسه دامنه مورد بررسی، طبیعت محیط متخلخل (مانند هموژن یا غیر هموژن بودن محیط، میزان ناهمسانی و میزان شکل پذیری)، طبیعت سیال و نوع رژیم جریانی که در نظر گرفته می شود.

- مدل ابزاری برای نمایش ساده تر واقعیت است.

- مدل هر ابزار و وسیله‌ای است که نشان دهنده شرایط صحرایی می‌باشد.
- هر سیستمی که بیانگر و نشان دهنده عکس العمل سیستم آب زیرزمینی باشد، می‌تواند مدل آن سیستم نامیده شود.

به طور کلی می‌توان گفت هر وسیله‌ای که تقریبی از شرایط صحرایی را ارائه نماید مدل نامیده می‌شود. مدل‌های فیزیکی از قبیل مخزن‌های ماسه آزمایشگاهی، جریان آب‌های زیرزمینی را مستقیماً شبیه سازی می‌کنند. مدل‌های ریاضی، جریان آب‌های زیرزمینی را به صورت غیر مستقیم توسط معادله‌ای، شامل فرآیندهای فیزیکی موجود در سیستم نشان می‌دهند. این مدل‌ها سیستم را در قالب معادلاتی که بار آبی و جریان را در طول مرزهای مدل (شرایط مرزی) توصیف می‌کنند شبیه سازی می‌نمایند. در مسایل با شرایط ناپایدار، به یک معادله که توزیع اولیه بار آبی در سیستم را توصیف نماید، نیاز می‌باشد (شرایط اولیه). مدل‌های ریاضی را می‌توان به صورت تحلیلی یا عددی حل نمود. هنگامی که فرضیات استفاده شده برای به دست آوردن حل تحلیلی در مسأله مورد نظر سیار ساده و محاسبه ارزیابی شود ممکن است مدل عددی انتخاب گردد. برای مثال در حل‌های تحلیلی معمولاً محیط متخلخل همگن فرض می‌شود و این فرض اغلب با شرایط فیزیکی مطابقت ندارد. هرچه فرضیات ساده کننده کمتری برای فرموله کردن یک مدل به کار رود پیچیدگی مدل بیشتر می‌شود.

کاربرد مدل‌های آب زیرزمینی نیاز به اطلاعات صحرایی وسیعی برای اطلاعات ورودی و برای واستجی دارد. یک روش مدل‌سازی خوب، اطلاعات در نتایج مدل‌سازی را افزایش خواهد داد. مدل، شبکه‌ای را برای ترکیب اطلاعات صحرایی و برای آزمایش ایده‌ها درباره چگونگی کار سیستم فراهم می‌کند. مدل‌ها می‌توانند در پدیده‌هایی که قبلاً در نظر گرفته نشده‌اند، هشدار برای مدل‌ساز باشند. مدل‌ها می‌توانند مناطقی را که به اطلاعات صحرایی بیشتری نیاز دارند، مشخص نمایند.

### تاریخچه مدل‌های آب زیرزمینی در ایران

دوره جدید هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی از سال ۱۹۳۵ با معادله تاپس آغاز گردید. در

دهه های ۴۰ و ۵۰ میلادی ژاکوب<sup>۱</sup> و هانتوش<sup>۲</sup> روابطی را در زمینه حل مسایل جریان چاه ها ارائه نمودند. از همین زمان بود که روش های نظری در حل مسایل آب های زیرزمینی بسیار معمول گردید و اکثر فرمول ها و روش های تجربی در قالب معادلات ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در دهه ۱۹۵۰ میلادی بنت<sup>۳</sup> و اسکویتزکی<sup>۴</sup> در سازمان زمین شناسی ایالات متحده<sup>۵</sup>، یک سامانه آبخوان را با استفاده از شبیه سازی الکتریکی که مجموعه ای از مقاومت ها و اسیلوسکوپ ها بود و بر اساس روش تفاضل محدود عمل می کرد، مدل سازی الکتریکی نمودند. یکی از مزایای شبیه سازی مذکور در آن است که تفکیک زمانی صورت نگرفته و زمان به صورت پیوسته در نظر گرفته می شود که این مسأله موجب می شد مدل بی قید و شرط ماندگار باشد. وجود ماشین های حسابگر سریع و کامپیوترهای دیجیتال در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی باعث گردید که بسیاری از مسایل پیچیده آب های زیرزمینی مدل شود. در دهه ۱۹۵۰ ریاضیدانان و مهندسين مخازن نفت، روش های حل عددی را برای معادله جریان در صنعت نفت مورد آزمایش قرار دادند و از آن زمان به بعد این روش نیز به مجموعه مدل ها پیوست. این در حالی بود که هنوز مدل های تشابهی برای حل جریان یک سیال منفرد استفاده می شد، ولی نمی توانست برای مسایل چند فازي به آسانی استفاده شود. این نارسایی موجب شد که مدل های عددی سیر تکاملی خود را تا امروز طی کنند. به طوری که از دهه ۱۹۷۰ به بعد استفاده از مدل های تشابهی تقریباً کنار گذاشته شد و روش های عددی در حل مسایل آب شناسی بسیار متداول شد و برنامه های زیادی به زبان های برنامه نویسی مختلف توسط افراد مختلف نوشته شد.

مطالعات مدل سازی در ایران برای اولین بار توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) انجام شده است. در پی این مطالعات مدل ریاضی دشت ورامین تهیه شد و در ادامه تعدادی مدل با همکاری مشاورین فرانسوی تهیه شده است. از آن به بعد تعداد زیادی آبخوان در سراسر کشور توسط دانشگاه ها در قالب پایان نامه های دانشجویی و طرح های

- 
1. Jacob
  2. Hantush
  3. Bennett
  4. Skivitzke
  5. USGS

پژوهشی در مراکز تحقیقاتی و شرکت‌های مشاوره‌ای و سازمان‌های آب منطقه‌ای شیبه سازی شده‌اند. مطالعات مربوط به مدل آب‌های زیرزمینی در ایران از دیرباز تاکنون با مشکلاتی روبه‌رو بوده است که از جمله این مشکلات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نبود شناخت کافی و ناقص بودن اطلاعات موجود در مورد خصوصیات فیزیکی

نپشته‌های ابرفتی دشت‌ها که اصلی‌ترین مخزن آب‌های زیرزمینی می‌باشد،

- نبود آمار و اطلاعات کامل و منظم از پارامترهای هواشناسی و اقلیم شناسی در

محدوده دشت‌ها برای برآورد مولفه‌های بیلان آب،

- نبود یک شبکه پیرامتری مناسب یا ناکافی بودن تعداد پیزومترها در محدوده دشت به منظور واسنجی مدل،

- نبود چاه‌های اکتشافی کافی در محدوده دشت‌ها به منظور شناخت خصوصیات

فیزیکی و هندسی آب‌ها (اعم از ضخامت، تغییرات، خصوصیات فیزیکی در

عمق و در عرض، موقعیت سنگ کک، تخلخل و غیره)،

- نبود آزمایش‌های پمپاژ کافی در محدوده دشت‌ها و در نتیجه نبود اطلاعات کافی از

ضرایب هیدرودینامیک آبخوان‌ها،

- عدم شناخت کافی از رفتار هیدرولیکی سازندهای حاشیه دشت‌ها و ارتباط آن‌ها با

آبرفت جهت تعریف شرایط مرزی مناسب

- نبود اطلاعات کافی از ارتباط هیدرولیکی آب‌های سطحی (دریاچه‌ها رودخانه‌ها

زهکش‌ها و غیره) با آب زیرزمینی،

- نبود آمار و اطلاعات کافی و دقیق جهت تهیه بیلان آبخوان‌های ابرفتی به منظور

استفاده در واسنجی مدل،

- نبود آمار و اطلاعات کافی و دقیق در رابطه با نحوه و میزان بهره‌برداری از آب‌های

زیرزمینی،

- عدم شناخت کافی از خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی منطقه غیراشباع جهت

برآورد میزان نفوذ سطحی آب برگشتی تبخیر و تعرق و غیره،

- نبود اطلاعات کافی در برآورد میزان آب برگشتی کشاورزی، فاضلاب‌های شهری و

صنعتی،

- نبود نیروی با تجربه و متخصص و عدم رعایت ترکیب مناسب تخصص‌های مورد نیاز در پروژه مدل‌سازی،
- عدم نظارت کافی بر مراحل و نتایج تهیه مدل.

### کاربرد مدل

بیشتر تلاش‌های مدل‌سازان آب‌های زیرزمینی به قصد پیش‌بینی نتایج فعالیت پیشنهاد شده می‌باشد. با این وجود کاربردهای مهم دیگری نیز برای مدل وجود دارد. رایج‌ترین کاربردهای مدل برای مطالعات آبخوان‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در دشت‌هایی که مطالعات اولیه در آن‌ها مشخص نموده که دارای پتانسیل هستند، مدل به منظور انتخاب مناسب‌ترین روشی از میان روش‌های موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به کار می‌رود،
- در دشت‌هایی که مطالعات اولیه در آن‌ها افت شدید آب را آشکار نموده است، مدل به منظور پیدا نمودن مناسب‌ترین راه حل جهت کنترل افت سطح آب و بهره‌برداری مجاز از آب زیرزمینی به کار می‌رود،
- استفاده از مدل به منظور بررسی پارامترهای آبخوان و میزان اهمیت هر یک از آن‌ها در مطالعه آبخوان.

برخی از کاربردهای مدل در زمینه‌های مختلف در جدول ۱-۲ بیان شده است

جدول ۱-۲: کاربرهای مدل

| زمینه های مختلف  | هدف ها                                                                                                                                                                                                                 | مسائل مورد بررسی                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| تأسیسات سطحی     | ایجاد تأسیسات بر روی شبکه جریان های سطحی<br>سدهای ذخیره ای در داخل و یا خارج از محدوده آبخوان<br>شبکه کانال های آب رسانی<br>برداشت آب از رودخانه هایی که آبخوان را تغذیه می کنند<br>پوشش نهرها<br>تأسیسات تغذیه مصنوعی | تغییرات سطح پیرومتری آبخوان در بالادست و پایین دست سدها و محل پروژه های تغذیه مصنوعی<br>بده های نفوذی از کانال های آب رسانی<br>تأثیر پوشش نهرها در تغذیه آبخوان و تغییرات سطح پیرومتر<br>تغییرات ناشی از افزایش و یا کاهش تغذیه آبخوان از جریان های سطحی و تغذیه مصنوعی<br>کنترل تغذیه آبخوان با استفاده از تأسیسات سطحی |
| تأسیسات زیرزمینی | ایجاد سدهای زیرزمینی                                                                                                                                                                                                   | تغییرات سطح پیرومتر<br>تغییرات بده های خروجی زیرزمینی<br>تغییرات بیلان آبخوان<br>جلوگیری از نفوذ آب با کیفیت پایین                                                                                                                                                                                                       |
|                  | ایجاد مجاری و زهکش های زیرزمینی                                                                                                                                                                                        | تغییرات سطح پیرومتری<br>بده های زهکشی                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| آب شهری          | برداشت از آبخوان یا بده معلوم                                                                                                                                                                                          | مدیریت بهره برداری از آبخوان شامل:<br>محل های برداشت<br>افت پیرومتری ناشی از عمل برداشت<br>تأثیر عمل برداشت بر روی بده چاه های موجود و چشمه ها و فئات های مجاور<br>امکان تداخل آب های آلوده سطحی به داخل آبخوان و همچنین پیش روی آب شور در مناطق مورد بهره برداری و در نتیجه خطر کاهش کیفیت آب                           |

|                                                                                                                                                                                                                           |                                                |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|
| <p>بده های قابل تزریق<br/>پیش بینی بالا آمدن سطح آب زیرزمینی<br/>و خطرات باتلاقی شدن محدوده های<br/>شهری</p> <p>بررسی کیفیت آب زیرزمینی<br/>تأثیر نفوذ شیرابه زیاله ها در تعیین محل<br/>مناسب برای دفن زیاله های شهری</p> | <p>تغذیه آبخوان از فاضلاب شهری<br/>و صنعتی</p> |                   |
| <p>بررسی امکانات توسعه بهره<br/>برداری از آبخوان برای تأمین<br/>نیازهای آبی کشاورزی</p> <p>میزان آب قابل بهره برداری<br/>نهایی مناسب برداشت از آبخوان<br/>بررسی آب های نامناسب برای<br/>کشاورزی</p>                       | <p>آبیاری محدوده های<br/>کشاورزی</p>           | <p>آب کشاورزی</p> |
| <p>افت سطح آبخوان در نتیجه ایجاد<br/>شبکه های زهکشی</p> <p>تعیین بده های زهکشی و<br/>مشخصات زهکش ها</p>                                                                                                                   | <p>زهکشی اراضی</p>                             |                   |